



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et Technologies
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Métallurgie
Spécialité : Métallurgie

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Khaizar Elmehdi

Le : mardi 11 juin 2024

Les procédés de Nitruration Des aciers

Jury :

Pr.	Zakaria Boumerzoug	Professeur	Université de Biskra	Président
Dr.	Toufik Djimaoui	MCA	Université de Biskra	Examineur
Dr.	Salim Messaoudi	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2023 - 2024

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mon père

A la mémoire de ma mère

A ma femme et mes filles

A mes frères et mes sœurs

A tous mes amis

A tous mes collègues

Remerciements

Je remercie particulièrement et chaleureusement le Dr. Messaoudi Salim, qui a assuré l'encadrement de ma mémoire au quotidien. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance pour sa disponibilité et sa patience.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'arbitrer ce travail. Pr. Zakaria Boumerzoug et Dr. Toufik Djimaoui.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les enseignants de la Branche Métallurgie qui ont participé à ma formation.

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى تقديم رؤية تفصيلية ومقارنة لعمليات النيترة المختلفة. وكجزء من هذا البحث، سنقدم عمليات نيترة مختلفة، ونتناول مبادئ إنتاجها التي تميزها، والمعلومات التي تتحكم في فعاليتها، وتطبيقاتها. وسنعرض أيضاً تطور بعض العمليات ونناقش بعض مزاياها وعيوبها.

كلمات مفاتيح: النتردة، النتردة الصلبة، النتردة السائلة، النتردة الغازية، النتردة الأيونية، معالجة سطحية

Résumé

Ce mémoire a pour but d'offrir une vision détaillée et comparative des différents procédés de nitruration. Dans le cadre de cette recherche, on présentera des différents procédés de nitruration, en abordant leurs principes de réalisation qui les différencient, les paramètres qui contrôlent leur efficacité, et leurs applications. On présentera également de l'évolution de certains procédés et on évoquera certains de leurs avantages et inconvénients.

Mots clés : nitruration, nitruration solide, nitruration liquide, nitruration gazeuse, nitruration ionique, traitement de surface.

Abstract

This thesis aims to provide a detailed and comparative view of the different nitriding processes. As part of this research, we will present the different nitriding processes, addressing their principles of realization that differentiate them, the parameters that control their efficiency, and their applications. We will also present the evolution of certain processes and we will mention some of their advantages and disadvantages.

Key words: nitriding, solid nitriding, liquid nitriding, gas nitriding, ionic nitriding surface treatment.

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciement

Abstract

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale2

Chapitre 1 : Généralité sur La Nitruration

1 Introduction4

2 Définition4

3 Principe4

4 Microstructure d'un Acier Nitrure5

5 Formation des couches : Aspects Cinétique et Thermodynamique de La nitruration.....6

6 Étude des Diagrammes d'équilibre6

7 Formation des Couches Nitrurées : Mécanisme de La nitruration.....8

7.1 La diffusion de L'azote.....8

7.2 Changement de phase9

7.2.1 Cas du Fer Pur.....9

7.2.2 Cas des Aciers10

7.2.3 Cas des Binaires FE-X-N.....11

8 Propriétés Mécaniques d'un Acier Nitrure13

8.1 Micro Dureté13

8.2 Phénomène de Durcissement13

8.3 Ductilité14

8.4 Frottement15

8.5 Fatigue15

Sommaire

8.6	Contraintes Résiduelles.....	15
-----	------------------------------	----

Chapitre 2 : Les procédés de Nitruration

1	Introduction.....	17
2	Nitruration Solide	17
2.1	Historique.....	17
2.2	Principe	17
2.3	Poudre de Nitruration	17
3	Nitruration Liquide.....	18
3.1	Historique.....	18
3.2	Principe	18
3.3	Bains de Sels Cyanures.....	19
3.4	Description du procédé Tenifer-QPQ.....	19
4	La nitruration Gazeuse.....	20
4.1	Historique.....	20
4.2	Principe	20
4.3	Paramètres de La nitruration Gazeuse	21
4.3.1	L'influence du Taux de Dissociation τ_N	22
4.4	Exemple de Description d'un four industriel.....	22
4.5	Dispositifs Expérimentaux.....	23
4.6	Les avantages de Nitruration Gazeuse.....	24
5	La nitruration Ionique	24
5.1	Principe de Nitruration Ionique.....	24
5.2	Paramètres de Nitruration Ionique.....	25
5.3	Variantes et Procédés Spécifiques.....	25
5.3.1	NIVOX 1.....	25
5.3.2	NIVOX LH	26
5.3.4	HARDINOX®	26
5.3.6	SULF-IONIC	26

Sommaire

5.4	Limitations	27
5.5	Dispositifs Expérimentaux.....	27
5.5.1	Réacteur Plasma de Type ECR (Electron Cyclotron Résonance).....	27
6	Evolution des Procédés de Nitruration	28
7	Comparaison des Divers Procédés	29
8	Aciers pour Nitruration.....	32
8.1	Influence des Eléments d'alliage.....	34
8.2	Nuances d'aciers de Nitruration	35
9	Les applications de La nitruration	36
	Conclusion Générale.....	38
	Références bibliographiques	

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux

Tableau 1 : <i>Caractéristiques structurales des différentes phases du système Fe-N</i>	9
Tableau 2 : <i>Données cristallographiques relatives à certains nitrures d'éléments d'alliage</i>	11
Tableau 3 : <i>Comparaison de la dureté superficielle des couches monophasées ϵ et γ' réalisées sur différents aciers de construction</i>	13
Tableau 4 : <i>Liste des nitrures susceptibles de se former à partir des éléments d'addition</i>	14
Tableau 5 : <i>Eléments de comparaison des procédés de nitruration</i>	30
Tableau 6 : <i>Comparaison entre les différents modes de nitrurations</i>	31
Tableau 7 : <i>Avantages et inconvénients des différents procédés de nitruration</i>	32
Tableau 8 : <i>Caractéristiques des couches nitrurées sur les principales familles d'aciers D'après J.P. LEBRUN</i> ,.....	33

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1 : les couches formées.	5
Figure 2 : Diagramme d'équilibre Fer-Azote.....	7
Figure 3 : Coupe isotherme à 580°C du diagramme d'équilibre Fe-N-C	8
Figure 4 :Mailles élémentaires des phases: a) α , b) γ , c) γ' , d) ϵ , e) ξ	10
Figure 5 : Profil de concentration de l'azote et du carbone pour un acier nitruré.....	10
Figure 6 : Mode d'interaction éléments d'alliage-azote. a) interaction forte, b) interaction moyenne, c) interaction faible	12
Figure 7 : Les effets des éléments d'alliage sur le coefficient d'activité de l'azote dans	12
Figure 8 : Mécanisme de génération des contraintes résiduelles dans un échantillon nitruré. a) surface non liée au cœur, b) surface liée au cœur.....	15
Figure 9 : Distribution des contraintes résiduelles dans la zone nitrurée	15
Figure 10 : Poudre de nitruration.....	18
Figure 11 : microstructure d'un acier a outils de travail à chaud subit une nitruration Liquide	19
Figure 12 : Four vertical de nitruration	22
Figure 13 : Photographie et schéma associé de l'installation de nitruration gazeuse utilisée à l'Institut Jean Lamour	24
Figure 14 : Schéma de principe d'un four de nitruration ionique	25
Figure 15 : Schéma du réacteur ECR utilisé pour les traitements de nitruration assistée par plasma.	28

Introduction Générale

Introduction Générale

Jusqu'à maintenant la nitruration reste parmi les traitements de surface les plus appliqués dans l'industrie métallique. Ce traitement consiste à introduire de l'azote dans la couche superficielle d'un métal afin de former des nitrures. Ces derniers confèrent au matériau des caractéristique et des propriétés remarquables en surface ; tels que l'amélioration de la dureté, suivie d'une très bonne résistance à l'usure et une meilleure résistance à la corrosion. La nitruration qui était au paravent presque réservée uniquement aux traitements de surface des aciers, commence, depuis quelques décennies, à s'étendre à d'autres métaux ; comme les alliages de titane.

Ce mémoire a pour but d'offrir une vision détaillée et comparative des différents procédés de nitruration. Dans le cadre de cette recherche, on parlera des différents procédés de nitruration, en abordant leurs principes de réalisation qui les différencient, les paramètres qui contrôlent leur efficacité, et leurs applications. On parlera également de l'évolution de certains procédés et on évoquera certains de leurs avantages et inconvénients. Enfin, on illustrera quelques techniques encours et les applications industrielles de la nitruration.

Le premier chapitre rassemble des généralités sur la nitruration en présentant brièvement le principe du traitement, la microstructure, le mécanisme de la nitruration et la formation des couches: aspects cinétiques nitrurées et thermodynamiques de la nitruration en liaison avec le diagrammes d'équilibre fer-azote.

Dans le deuxième chapitre, on présente les différents procédés de nitruration : un point historique, le principe de son fonctionnement, et les paramètres d'avantages et d'inconvénients, et on présente une comparaison globale entre ces procédés. En fin du chapitre, on parlera brièvement des aciers nitrurables, et de l'influence de certains des éléments d'alliages.

Chapitre I :
Généralité sur La
Nitruration

1 Introduction

La nitruration constitue un moyen de traitement de surface qui permet d'augmenter la résistance à l'usure de l'alliage et d'améliorer la résistance à la corrosion, à cœur l'alliage garde ses propriétés de ductilité et présente un gain dans la valeur de sa résistance à la fatigue.

Les premiers traitements de nitruration dus à Fremy en 1861 ont montré la possibilité de fixer de l'azote à la surface de l'acier. En 1908, Nachlet dépose un brevet pour le traitement de surface de l'acier par l'azote, mais la couche était si fragile que les applications restèrent peu nombreuses.

Il a fallu attendre les différentes publications de Fry en 1921 pour assister à un véritable essor industriel de la nitruration vers les années 1950 [1].

Ce procédé permet de maintenir les propriétés de ductilité du cœur de l'alliage tout en augmentant sa résistance à la fatigue.

2 Définition

Le processus de nitruration englobe diverses techniques thermochimiques telles que la nitruration gazeuse, ionique et au plasma. Il consiste à faire diffuser de l'azote à la surface d'un substrat, le matériau à nitrurer. La concentration en azote décroît de la surface traitée vers le cœur, où elle s'annule. Les températures de traitement varient entre 450°C et 600°C selon la composition de l'acier et les procédés employée [1].

3 Principe

Ce processus implique d'immerger la pièce à traiter dans un milieu libérant de l'azote, à une température située entre 450 et 580°C. La disparité de concentration en azote entre le milieu nitrurant et la pièce entraîne son enrichissement, suivi d'une diffusion de l'azote vers l'intérieur de la pièce. Cependant, cette altération de la composition du matériau demeure restreinte à la surface proche.

Au cours de la nitruration, de nouvelles phases : solutions solides, nitrures et carbonitrures se développent à partir de la surface des aciers traités [2].

Ces nouvelles phases renforcent la dureté de la surface de l'acier, améliorent sa résistance à l'usure et, dans certains cas, sa résistance à la corrosion, tout en préservant essentiellement les propriétés mécaniques fondamentales de la pièce.

4 Microstructure d'un Acier Nitrure

On distingue en général deux couches, la couche de combinaison et la couche de diffusion.

- **La couche de combinaison**, appelée parfois couche blanche, est composée des nitrures de fer ϵ (Fe_{2-3}N), ou $((\text{Fe},\text{X})_{2-3}\text{N})$ dans le cas des aciers, X étant l'élément d'alliage substitutionnel, et de nitrure γ' (Fe_4N), ou $((\text{Fe},\text{X})_4\text{N})$. L'épaisseur de cette couche varie de 10 à 50 μm suivant le procédé employé et la nuance d'acier traité. La couche (ϵ) parfois poreuse de structure hexagonale compacte est relativement fragile, mais possède de très bonnes propriétés tribologiques de par sa dureté très élevée et son pouvoir de rétention de lubrifiant. La couche compacte est formée du nitrure de fer γ' de structure cubique à faces centrées ce qui le rend plus ductile. La modification des conditions de traitement (temps, température et taux de dissociation) permet de favoriser le développement d'une phase aux dépens d'une autre, privilégiant ainsi un emploi particulier (frottement ou fatigue). Le tableau 1 présente quelques résultats pratiques.

- **La couche de diffusion**, constituée d'une solution solide d'azote en insertion dans la ferrite et de carbonitrures submicroscopiques, résultat de la combinaison de l'azote avec les éléments nitrurigènes (Cr, Al, V); ces carbonitrures ont une très forte résistance au grossissement des grains et à la coalescence des précipités. L'épaisseur de cette couche varie suivant les conditions de traitement (100 à 600 μm environ).

La limite de solubilité de l'azote dans la matrice ferritique s'avère être très faible (0,043% N à 520 °C), conséquence d'une insertion très limitée dans le réseau cubique centré de la matrice. Cette insertion n'exerce qu'un faible impact sur les propriétés mécaniques, par rapport à celui provenant des précipités. La précipitation de nitrures avec la matrice, d'une part génèrent la mise en compression de la couche de nitruration, améliorant ainsi fortement la résistance à la fatigue mécanique du matériau, et d'autre part gênent la propagation des dislocations, menant à un durcissement important [3].

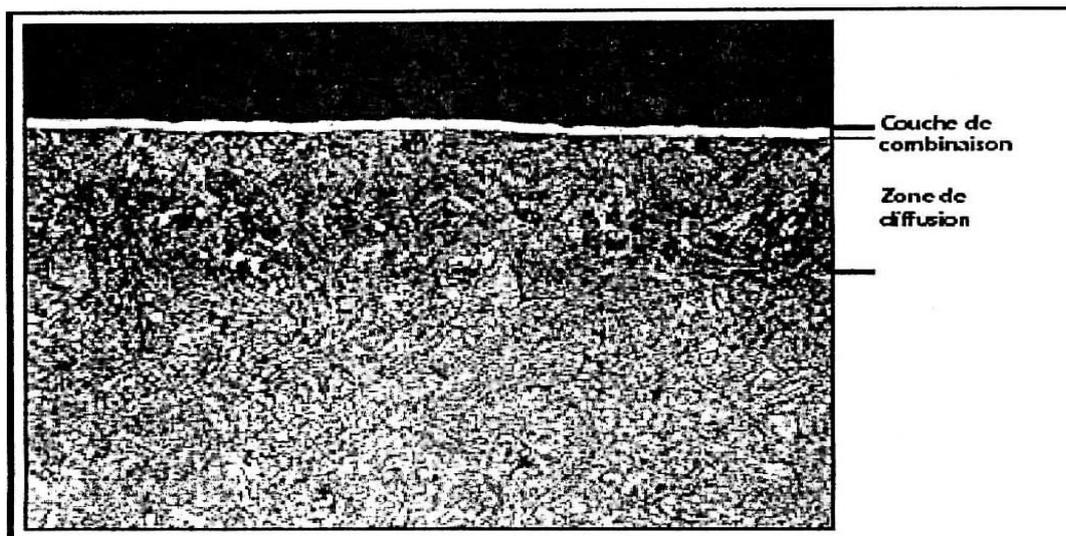


Figure 1 : les couches formées [2].

5 Formation des couches : Aspects Cinétique et Thermodynamique de La nitruration

La nitruration est un processus qui suit les lois de la thermodynamique. Les phases observées dans les zones enrichies en azote peuvent être prédites en utilisant la thermodynamique du système.

On prévoit la formation de nitrures ou de carbures en se basant sur les enthalpies standards de formation de ces composés, notées $\Delta H^{\circ}_f(x)$, ou en comparant les enthalpies libres standards de formation, notées $\Delta G^{\circ}_f(x)$. Cela s'applique dans le cas d'une solution solide idéale, considérée à très basses températures pour négliger l'entropie de l'enthalpie libre.

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T * \Delta S^{\circ} \quad (1)$$

$$T \text{ très basse} \Rightarrow T * \Delta S^{\circ} \ll \Delta H^{\circ} \text{ et } \Delta G^{\circ} \approx \Delta H^{\circ}$$

A température de nitruration (500°C – 580 °C) le terme entropie ne peut être négligé, les teneurs des éléments d'alliages des aciers produisent des interactions qui ne permettent pas de négliger l'énergie d'excès

Lorsqu'un acier est exposé à de l'azote gazeux, ce dernier est absorbé par le métal en raison de la différence de potentiel chimique de l'azote entre les deux milieux. Ce phénomène d'absorption se poursuit jusqu'à ce que la phase formée (α) soit saturée. Lorsque l'azote gazeux est en quantité suffisante et que la phase α est sursaturée, cette dernière ne peut plus absorber d'azote et tend à précipiter une phase ayant une solubilité en azote plus élevée, conduisant à l'apparition de la phase γ' .

Le transfert d'azote se produit toujours sous l'effet de la différence de potentiel chimique d'azote. À son tour, la phase γ' saturée par l'excès d'azote tend à diminuer le potentiel de N, entraînant un nouveau changement de phase avec l'apparition de la phase ϵ , dont le potentiel est très bas à faibles concentrations. Une fois que la limite de solubilité de la phase ϵ est atteinte, l'azote n'est plus absorbé en raison de son potentiel devenu trop élevé à ce niveau de concentration. À ce stade, la décomposition de la phase nitrurante est interrompue, car le potentiel de l'azote gazeux est trop élevé par rapport à celui de la phase superficielle ϵ du métal, et ne peut être diminué. On parle alors d'une concentration d'équilibre ou d'un taux de décomposition d'équilibre [4].

6 Étude des Diagrammes d'équilibre

Déterminer la composition des phases cristallines qui émergent lors de la nitruration des aciers requiert une compréhension des diagrammes d'équilibre. Bien que l'équilibre thermodynamique ne soit souvent pas totalement atteint dans la pratique, ces diagrammes offrent des indications précieuses sur les types de phases qui pourraient se former.

Le diagramme fer-azote représente les domaines d'existence des phases métallurgiques selon la teneur en azote et la température.

Le diagramme d'équilibre fer-azote (figure 2) met en évidence la présence des différentes phases ϵ , γ' et α , soit trois domaines monophasés :

CHAPITRE I : Généralité Sur La Nitruration

- La phase α de structure cubique centrée compose la “couche de diffusion”.
Celle-ci est le siège de mécanisme de diffusion/précipitation en présence du chrome, vanadium, aluminium et titane en solution.
Ce mécanisme est à l’origine du durcissement par précipitation des nitrures et de mise en contrainte de compression de la surface des aciers ;
- La phase intermétallique γ' (Fe_4N) non-stoechiométrique entre 400 et 680 °C. Ce nitrure de fer présente une structure de type cubique à faces centrées: un atome d’azote occupe le site octaédrique situé au centre de la maille constituée par les atomes de fer ;
- La phase intermétallique ε (Fe_2-3N) non-stoechiométrique de structure hexagonale compacte dont les sites octaédriques sont occupés par une quantité variable d’atomes d’azote et de carbone, dans le cas du système ternaire fer-azote-carbone $\text{Fe}_2-3(\text{N}, \text{C})$ [5].

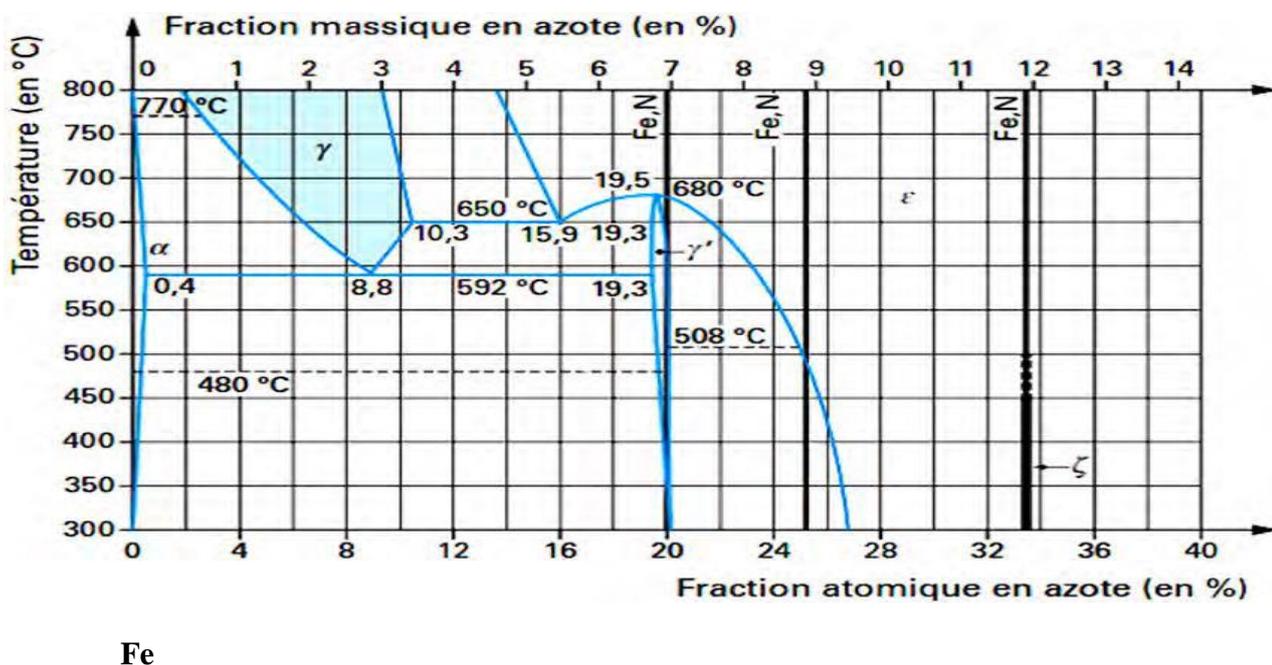


Figure 2 : Diagramme d'équilibre Fer-Azote [5].

Comme la nitruration est un traitement généralement appliqué aux aciers, il est intéressant d'étudier l'influence du carbone. La coupe isotherme du diagramme d'équilibre ternaire Fe-N-C à 580 °C (figure 3) montre que le carbone étend le domaine de stabilité de la phase ε , ce qui est exploité en pratique en combinant le carbone et l'azote comme éléments réactifs par l'ajout d'un agent carboné dans le milieu nitrurant (principalement du méthane et du propane).

Le carbone en solution dans l'acier influence également la nature de la couche obtenue : plus la matrice est riche en carbone, moins il est nécessaire d'ajouter du carbone de l'extérieur. Cependant, un excès de carbone peut entraîner la formation de cémentite, qui bloque la cinétique de formation des nitrures.

De la coupe isotherme, on observe que le carbone est peu soluble dans le nitrure γ' et que l'azote est très peu soluble dans le carbure de fer. En industrie, la nitruration est généralement appliquée aux

CHAPITRE I : Généralité Sur La Nitruration

aciers contenant des éléments d'addition capables de former des nitrures avec l'azote atomique, c'est-à-dire des éléments nitrurigènes tels que le chrome, le molybdène, l'aluminium et le vanadium.

L'étude des diagrammes d'équilibre Fe-N et Fe-N-C ne suffisent pas pour autant la compréhension de tous les phénomènes mis en jeu lors de la nitruration des aciers alliés. Pour cela, il faut étudier le diagramme de phases entre l'azote et tous les éléments que contient l'alliage [6].

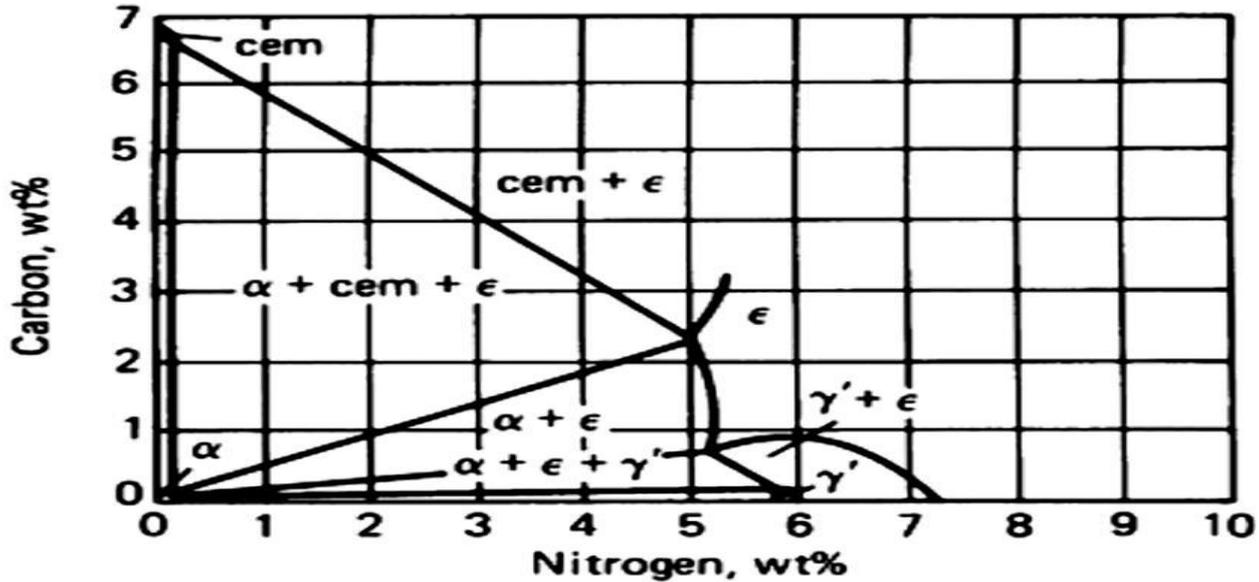


Figure 3 : Coupe isotherme à 580°C du diagramme d'équilibre Fe-N-C [5].

7 Formation des Couches Nitrurées : Mécanisme de La nitruration

7.1 La diffusion de L'azote

La diffusion est le processus central de la nitruration, et tous les autres phénomènes, bien qu'ils s'entremêlent, en résultent. Le profil de concentration d'azote dans la zone nitrurée suit une équation différentielle, appelée l'équation de Fick (2).

$$\partial C / \partial t = D \cdot \partial^2 C / \partial x^2 \quad (2)$$

où C : est la concentration d'azote,

t : le temps de nitruration,

D : le coefficient de diffusion de l'azote,

x : la profondeur de nitruration.

La nitruration correspond au cas d'un dépôt de couche mince sur un substrat semi-infini. En négligeant la variation du coefficient de diffusion en fonction de la concentration, on adopte les conditions aux limites suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} t=0 \\ \forall x \end{array} \right. \Rightarrow C(0,x) = 0 \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} t \neq 0 \\ x=0 \end{array} \right. \Rightarrow C(0,t) = C_0$$

CHAPITRE I : Généralité Sur La Nitruration

La solution de l'équation (2) s'écrit:

$$C(x,t) = C0 \operatorname{erfc} (x/2(D \cdot t)^{1/2}). \quad (3)$$

Le phénomène de diffusion se complique par modification de la cinétique, par l'effet de:

- Premièrement, il y a ralentissement de la diffusion de l'azote par réduction du nombre de sites interstitiels,
- Deuxièmement, par modification du gradient de concentration lié à la fixation sélective de l'azote. Le gradient de concentration entre l'atmosphère et la pièce va donc tendre à s'estomper, entraînant un ralentissement de la diffusion [4].

7.2 Changement de phase

7.2.1 Cas du Fer Pur

Dans le cas du fer pur, les phases susceptibles de se former sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques structurales des différentes phases du système Fe-N .

Phase	Composition	%N (poids)	%N (atome)	Structure	Paramètre de maille (A0)
Ferrite	Fe α	0.10	0.40	C.C	a = 2.8664 a = 2.8698
Austénite	Fe γ	2.8	11	C.F.C	a = 3.572 + 0.078 (at %N)
γ'	Fe ₄ N	5.64 6.14	19.3 20.8	C.F.C	a = 3.789 a = 3.803
E	Fe ₂₋₃ N	9.00 11.00	28.2 32	H.C.	a = 2.65; c = 4.325 a = 2.77; c = 4.422
ξ	Fe ₂ N	11.4	33.2	Orthorhombique	a = 5.530; b = 4.480 c = 4.425

Les mailles élémentaires des phases relatives au système Fe-N, peuvent être décrites comme suit [6]:

- **La phase α (ou nitro ferrite)**, cubique centré (Fig. 4.a), avec une contribution de trois sites pour un atome de fer.
- **La phase γ (ou austénite à l'azote)**, cubique à faces centrées (Fig.4.b), à chaque atome de fer correspond un site d'azote.
- **Le nitrure γ'** , Fe₄N cubique à faces centrées (Fig.4.c).
- **Le nitrure ϵ** , Fe₂₋₃N hexagonal (Fig.4.d).
- **Le nitrure ξ** , orthorhombique à faces centrées, de formule chimique Fe₂N (Fig.4.e).

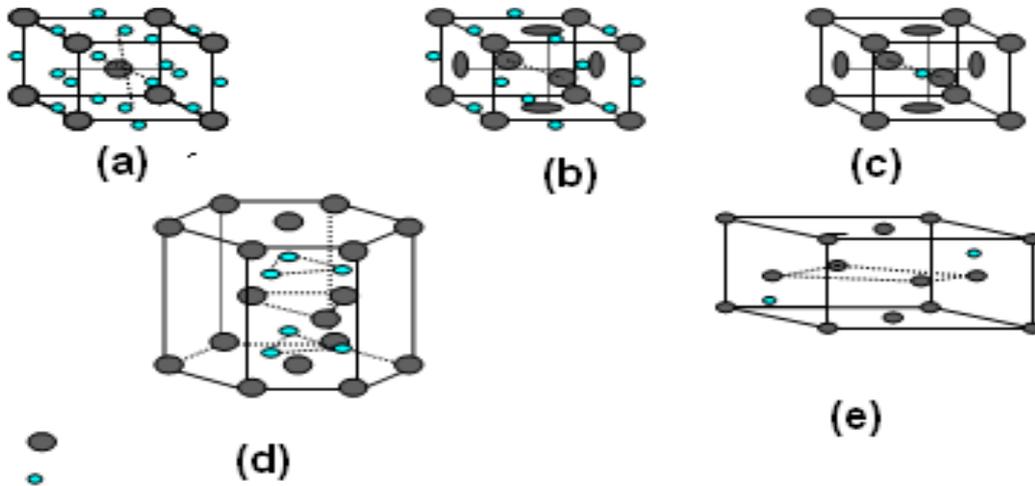


Figure 4 : Mailles élémentaires des phases: a) α , b) γ , c) γ' , d) ϵ , e) ξ [6].

7.2.2 Cas des Aciers

Dans un acier, la présence simultanée du carbone et de l'azote en insertion crée des interactions qui ralentissent la diffusion de l'azote et repoussent le carbone vers le cœur de la pièce. Cette distribution de l'azote et du carbone conditionne la précipitation.

La nitruration d'un acier produit des carbures, des nitrides et des carbonitrides de fer ou d'éléments d'alliage. Cependant, l'interaction entre l'azote et le carbone dans le fer n'est pas favorable à la formation de carbonitrides. Les profils d'azote et de carbone dans un acier XC18 nitruré à 550 °C, illustrés par la figure 5, montrent la diffusion de l'azote et une rétrodiffusion du carbone [5].

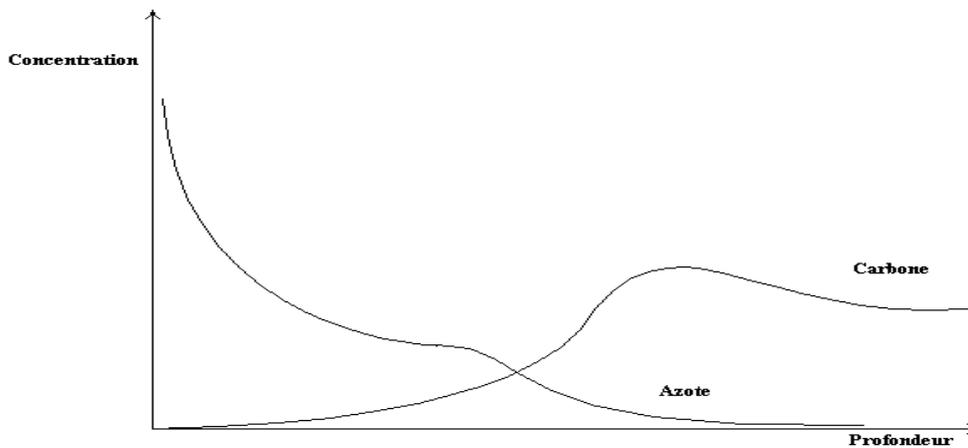


Figure 5 : Profil de concentration de l'azote et du carbone pour un acier nitruré [5].

CHAPITRE I : Généralité Sur La Nitruration

Ainsi, la nitruration fait apparaître les phases nitrures dans les zones superficielles, les carbonitrures dans les zones médianes, et enfin les zones profondes sont le siège de la formation des carbures dont la cémentite alliée [5].

7.2.3 Cas des Binaires FE-X-N

Dans ce cas le nitrure de fer s'écrit $(Fe,X)_xN_y$, où l'élément d'alliage X se trouve en substitution dans le réseau du fer. La deuxième particularité est dans la présence des nitrures des éléments d'alliage du tableau 2.

Tableau 2 : Données cristallographiques relatives à certains nitrures d'éléments d'alliage .

Nitrure	Phase	Réseau de Bravais	Paramètres cristallins (Å°)
Γ	Mo_2N	Cubique à Faces Centrées	$a = 4.416$
—	Cr_2N	Hexagonal Compact	$a = 4.796; h = 8.94$
E	CrN	Cubique à Faces Centrées	$a = 4.149$
E	Mn_4N	Cubique à Faces Centrées	$a = 3.865$
H	Mn_3N_2	Quadratique à Faces Centrées	$a = 4.194; c = 4.031$
—	VN	Cubique à Faces Centrées	$a = 4.169$
—	AlN	Hexagonal Compact	$a = 3.104; c = 9.93$
—	TiN	Cubique à Faces Centrées	$a = 4.237$
—	Si_3N_4	Hexagonal Compact	$a = 7.748; h = 11.234$
α''	$Fe_{16}N_2$	Quadratique Centré	—

L'interaction entre l'élément d'alliage X et l'azote définit le mode de précipitation. D'après Leroy, on peut définir trois modes d'interaction azote- élément métallique:

- **Interaction forte** (Fig.5.a), caractérisée par une forte précipitation du nitrure XN dans toute la zone riche en azote. Cas du Fe-Cr à $Cr > 5\%$, Fe-V à $\%V > 1$ et du Fe-Ti à $\%Ti > 2$.
- **Interaction faible** (Fig.5.c), la majeure partie de l'azote se trouve dissoute dans la ferrite, il n'y a qu'une faible précipitation des nitrures de ces éléments. Cas du Fe-Cr à $\%Cr = 1$ à 2% et du Fe-Mo à $Mo < 5\%$.
- **Interaction moyenne** (Fig.5.b), c'est un mode d'interaction intermédiaire entre les deux cas précédents, on peut trouver autant d'azote libre dans la matrice que fixé par le nitrure [4].

CHAPITRE I : Généralité Sur La Nitruration

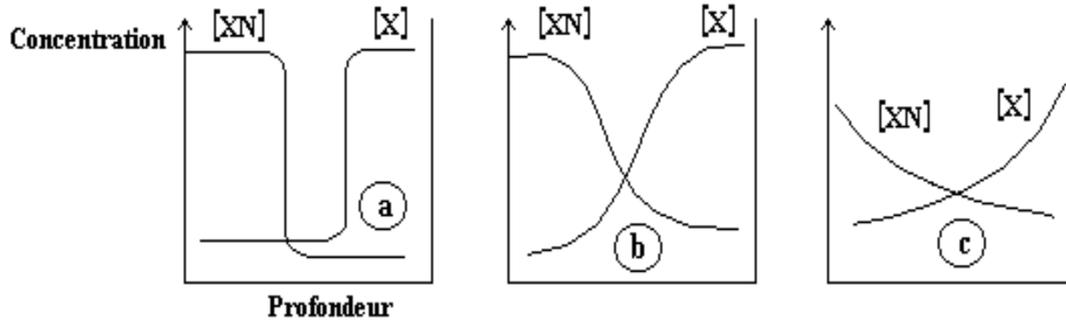


Figure 6 : Mode d'interaction éléments d'alliage-azote. a) interaction forte, b) interaction moyenne, c) interaction faible [4].

La figure 6 donne les coefficients d'activité azote-élément d'alliage f_{XN} en fonction de la teneur en éléments d'alliage.

Les éléments dont le gradient du coefficient d'activité est négatif (Ti, V, Mo, Cr, ...) ont tendance à augmenter la solubilité de l'azote dans la ferrite. Cet effet s'explique d'après Guerreropar la formation de zone de Guinier-Preston dans la ferrite qui sont les germes des précipités d'équilibre indiqués au tableau 2 [1].

Mode d'interaction éléments d'alliage-azote. a) interaction forte, b) interaction moyenne, c) interaction faible [4].

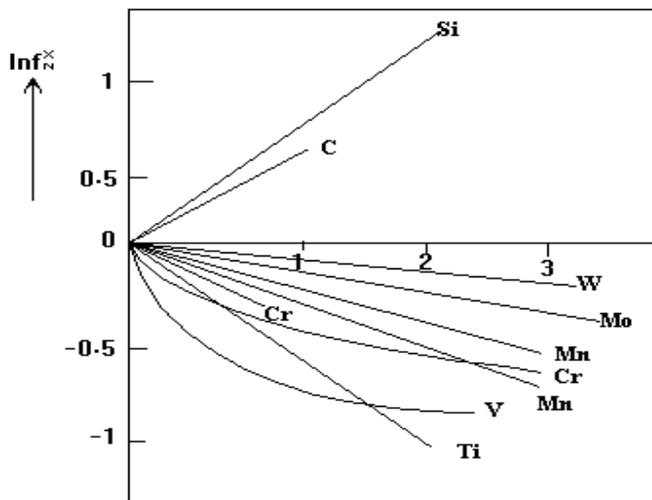


Figure 7 : Les effets des éléments d'alliage sur le coefficient d'activité de l'azote dans le fer à 500 °C [1].

8 Propriétés Mécaniques d'un Acier Nitrure

8.1 Micro Dureté

- **Couche de combinaison:** Les valeurs moyennes des micro duretés superficielles mesurées par Confente, (voir Tableau 3) sous une charge de 66 g montrent que la dureté du nitrure ϵ est plus élevée que celle de γ' , et la valeur des micro duretés de ces couches dépend de la teneur en éléments d'alliage en substitution dans ces phases nitrures.
- **Couche de diffusion :** D'après Cottrell les atomes de carbone et d'azote dissouts dans le réseau de ferrite se concentrent de préférence au voisinage des dislocations ce qui provoque un freinage au mouvement de déplacement des dislocations par les zones dites de Cottrell, phénomène traduit à l'échelle macroscopique par un durcissement du métal [4].

Tableau 3 : Comparaison de la dureté superficielle des couches monophasées ϵ et γ' réalisées sur différents aciers de construction [4].

Nuance	Couche γ'		Couche ϵ	
	Epaisseur (μm)	Dureté HV0.066	Epaisseur (μm)	Dureté HV0.066
XC10	7.3	550	10	950
XC18	3	570	10	1100
28D2	3	860	7	1100
32C4	3.7	880	7.5	1200
35CD4	3	1000	7	1200

8.2 Phénomène de Durcissement

Pour avoir un phénomène de durcissement dans les alliages ferreux, ces derniers doivent avoir des éléments susceptibles de former des nitrures avec l'azote diffusé. Ces nitrures conduisent à un durcissement structural qui engendre une amélioration de la limite d'endurance grâce à une élévation de la dureté superficielle.

Le tableau 4 : ci-dessous, liste les nitrures susceptibles de se former à partir des éléments d'addition.

Le choix de la nitruration d'aciers se porte sur les aciers ne contenant pas du Nickel vu que ce dernier ne forme pas de nitrure. Les nitrures formés sont ceux qui possèdent une enthalpie de formation $\Delta H^{\circ}298$ la plus forte en valeur absolue.

Avec les structures cristallographiques des nitrures et leurs paramètres cristallins on a des informations sur les sites dont ils peuvent germer et croître dans la matrice ferritique.

CHAPITRE I : Généralité Sur La Nitruration

- Les nitrures Hexagonaux tel que la phase « ϵ » Fe_{2-3}N , Cr_2N , AlN ainsi que Si_3N_4 essentiellement sur les défauts du réseau de la ferrite et sur les joints de précipitent grains, ainsi ils participent peu au durcissement.
- Les nitrures CFC précipitent sous forme de particules cohérentes sur les faces du cube de la ferrite conduisant à une augmentation de volume, amenant ainsi un durcissement important.

Nous noterons qu'il y a une apparition des contraintes de compression élevées.

Tableau 4 : Liste des nitrures susceptibles de se former à partir des éléments d'addition.

Phases	Réseau de Bravais	Enthalpie de formation $\Delta H^\circ 298\text{KJ/Mole}$	Paramètres cristallins Å°
Fe_{2-3}N	HC	-3.76	a=4.787 b=4.422
Fe_2N	Orthorhombique	--	a=5.524 b=4.827 c=4.422
Fe_4N	CFC	-10.9 ± 8.4	a=3.79
Mo_2N	CFC	-69.4 ± 2.1	a=4.169
Cr_2N	HC	-105.3 ± 12.6	a=4.796 b=4.47
CrN	CFC	-118 ± 10.5	a=4.149
Mn_4N	CFC	-130.4 ± 12.6	a=3.865
VN	CFC	-251 ± 21	a=4.169
AlN	Hexagonal	-320 ± 4.2	a=3.104 b=4.965
TiN	CFC	-336 ± 3.3	a=4.237
Si_3N_4	Hexagonal	-748 ± 33.4	a=7.748 b=5.617
Fe_{16}N_2	Quadratique centré	--	--

Un autre mécanisme de durcissement est la formation des zones GUINIER-PRESTON précédant la formation des nitrures [5].

8.3 Ductilité

Les essais réalisés par C. Leroy sur des aciers de construction et des aciers à outils ont conduit aux conclusions suivantes : quelle que soit la nature de la couche de combinaison (ϵ , γ' ou $\epsilon + \gamma'$), la ductilité de la configuration couche de combinaison/couche de diffusion est faible, inférieure à 1 %.

8.4 Frottement

La couche monophasée ϵ offre une bonne résistance au frottement par grippage, tandis que les couches monophasées γ' et la zone de diffusion se détériorent rapidement en raison du micro grippage. Les couches biphasées $\epsilon + \gamma'$ présentent un comportement intermédiaire entre celui des couches ϵ et γ' .

8.5 Fatigue

La limite de fatigue d'un acier nitruré ne dépend pas de la configuration de la couche de combinaison, mais elle est fortement influencée par la profondeur de nitruration. En flexion rotative, la limite de fatigue d'un acier 35CD4 trempé, revenu et nitruré atteint son maximum pour une épaisseur de 200 μm , soit 780 N/mm², ce qui entraîne une augmentation de 60 % de la limite d'endurance.

8.6 Contraintes Résiduelles

Il y a formation de contraintes de compression dans les couches enrichies en éléments interstitiels, dont le mécanisme est représenté sur la figure 1. Le maximum de ces contraintes se situe à l'axe médian de la couche nitrurée. Les contraintes d'extension passent rapidement par un maximum puis chutent lentement (Fig. 7). Les contraintes à cœur sont nulles [1].

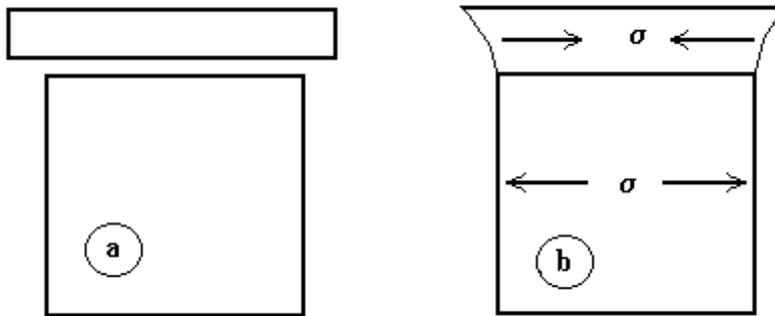


Figure 8 : Mécanisme de génération des contraintes résiduelles dans un échantillon nitruré. a) surface non liée au cœur, b) surface liée au cœur [1]

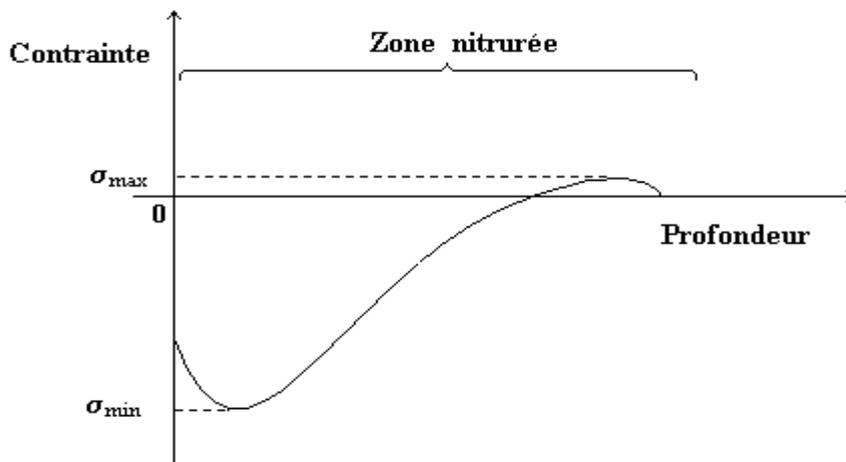


Figure 9 : Distribution des contraintes résiduelles dans la zone nitrurée [1]

Chapitre II

Les Procédés de Nitruration

1 Introduction

De manière générale le traitement de nitruration consiste à plonger les pièces dans un milieu susceptible de céder de l'azote à la surface, à une température comprise entre 300 et 580 °C ou l'azote peut diffuser de la surface vers le cœur de la pièce. Les procédés les plus couramment utilisés sont la nitruration en bain de sel, la nitruration gazeuse et la nitruration ionique. Cette dernière technique est la plus récente et bien qu'elle nécessite un investissement en équipement élevé, elle présente par rapport aux autres techniques, certains avantages comme des durées ou des températures de traitements plus faibles. La nitruration est de plus en plus utilisée pour des applications industrielles en remplacement d'un traitement de cémentation. Lorsque des pièces mécaniques exigent des tolérances dimensionnelles de grandes précisions et qu'elles nécessitent néanmoins un traitement thermochimique de durcissement superficiel, la nitruration apparaît comme le meilleur compromis. Le traitement s'effectuant sans changement allotropique du fer, les déformations résiduelles et le gonflement des pièces restent faibles [7].

2 Nitruration Solide

2.1 Historique

le brevet d'invention de la nitruration solide (en caisse) n'a été obtenu qu'en 1978 [8].

2.2 Principe

la nitruration s'effectue en caisse, les pièces étant enfouies dans un ciment contenant notamment de la cyanamide calcique et des activateurs qu'il libèreront de l'azote. La température de traitement se situe vers 500°C. Les temps de maintien peuvent atteindre une vingtaine d'heures [2].

L'agent de nitruration dans cette opération est une poudre riche en azote, bore et carbone. La cyanamide calcique est l'agent nitruant en présence d'activateurs qui libèrent les éléments N, C, O et H [9].

Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement en fonte, la température de nitruration varie entre 500 et 590 °C. Après nitruration les caisses sont ouvertes et refroidies à l'air libre [5].

2.3 Poudre de Nitruration

La poudre de nitruration est riche en azote, carbone et bore ainsi qu'un ou plusieurs autres éléments activateurs.



Figure 10 : *Poudre de nitruration* [5].

- En conséquence, la nitruration solide est moins utilisée en raison de son coût élevé, de sa complexité et de ses limitations de taille et de forme. Des alternatives plus efficaces telles que la nitruration ionique ou les revêtements de surface sont préférées pour leur rapidité et leur rentabilité. Ainsi, bien que la nitruration solide puisse encore être employée dans des cas spécifiques, son abandon progressif est observé au profit de procédés plus économiques et efficaces.

3 Nitruration Liquide

3.1 Historique

Le processus de nitruration et carbonitruration utilisant un bain de sel a été développé en Allemagne et aux Etats-Unis au début du 20^{ème} siècle [10].

3.2 Principe

C'est un processus de nitruration effectué dans un bain de sels fondus . Le processus s'effectue à une température égale à 570 °C pendant 0,5 à 3 h dans un bain de cyanures de composition: 40% de KCNO et 60% de NaCN + 15% de Na₂CO₃. La basse température fait que l'azote fourni par la décomposition des cyanures est pratiquement le seul à diffuser dans l'acier . Elle peut être appliquée à une grande variété d'aciers au carbone, aciers faiblement alliés, aciers à outils et aciers inoxydables. La Figure 11 illustre la microstructure d'un acier à outils subissant une nitruration liquide ; elle indique la présence de la couche de combinaison et la couche de diffusion [11].

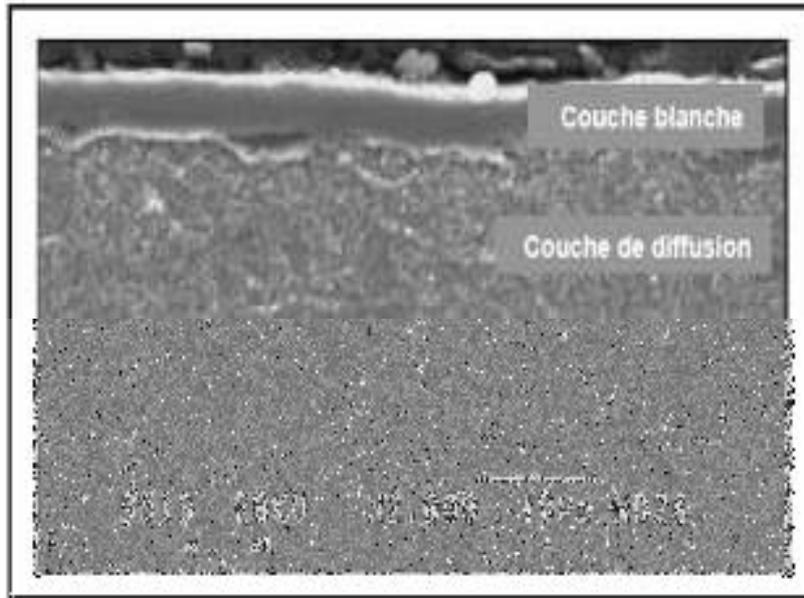


Figure 11 : microstructure d'un acier à outils de travail à chaud subissant une nitruration Liquide [11].

3.3 Bains de Sels Cyanures

Dans ces bains le produit fournissant le carbone est toujours un cyanure alcalin, le cyanure de sodium NaCN étant plus économique et plus efficace que le cyanure de potassium KCN. La décomposition du cyanure s'accompagne également d'une libération d'azote. Il s'agit donc toujours d'une carbonituration, la diffusion d'azote est cependant variable avec la composition du bain et principalement avec la teneur en cyanure alcalin.

Il existe trois types de bains :

- les bains non activés à haute teneur massique en cyanure (30 à 40 %) pour lesquels la diffusion d'azote est importante avec pour conséquence une limitation de la teneur en carbone. Ce sont les véritables bains de carbonituration ; leur emploi est limité à 870 °C ;
- les bains activés ou accélérés à moyenne teneur en cyanure (15 à 20 %) employés jusqu'à 900 °C, bien adaptés aux faibles profondeurs, faciles à employer grâce à leur fluidité ;
- les bains activés à faible teneur en cyanure (8 à 10 %) pour la cémentation profonde employés jusqu'à 950 °C [12].

3.4 Description du procédé Tenifer-QPQ

La nitruration au bain de sel, également appelée Tenifer-QPQ, est un traitement chimique/physique visant à augmenter la dureté des matériaux en acier. Voici comment cela fonctionne :

1. Nitruration : Les objets à traiter sont immergés dans un bain de nitruration pendant environ 90 minutes à une température de 580 °C. Cette étape crée une zone de diffusion dans la couche superficielle du matériau.

CHAPITRE II : Les procédés De Nitruration

2. Oxydation au bain (Quench) : Après la nitruration, les pièces sont immergées dans un bain d'oxydation à 400 °C pendant 30 minutes. Cela oxyde la surface (la rendant noire) et neutralise le sel de nitruration qui adhère à la surface.
3. Polissage : Les pièces sont ensuite trempées dans l'eau, séchées et polies.
4. Résultat : Le traitement Tenifer-QPQ offre une bonne dureté de surface et des modifications dimensionnelles minimales. La dureté maximale mesurée peut atteindre 1250 HV 0,05 kg/mm² [13].

- Sur la base de ce qui précède, on peut dire que Ce procédé permet un contrôle précis de l'épaisseur de la couche et une homogénéité grâce à une distribution uniforme de l'azote dans un bain liquide, réduisant ainsi la distorsion du matériau. Bien qu'adaptatif à divers métaux et permettant un contrôle précis des propriétés de surface, ses coûts plus élevés et sa vitesse de traitement plus lente que d'autres procédés de nitruration.

4 La nitruration Gazeuse

4.1 Historique

La nitruration gazeuse est connue depuis le début du XXe siècle [15].

4.2 Principe

Ce traitement se déroule dans des fours, dotés d'un brassage parfait de l'atmosphère et d'une précision élevée de la température. Le principe est de placer la pièce à nitrurer dans le four étanche et d'injecter du gaz ammoniac anhydre. Ce dernier se dissocie pour donner les atomes d'azotes nécessaires à la nitruration. La dissociation se fait selon la réaction suivante :



Au contact de l'acier la molécule de NH_3 subit un craquage catalytique en NH_2 , NH , N et H :



Une partie de l'azote naissant produit diffuse à la surface de l'acier, tandis qu'une autre partie est désorbée pour reconduire à la formation de la molécule N_2 . La diffusion de d'azote dans le matériau dépend de la concentration locale en azote atomique.

CHAPITRE II : Les procédés De Nitruration

La température de ce traitement est de l'ordre de 560°C, quelques fois moins, mais le temps de maintien est assez long, plusieurs dizaines d'heures. Les parties non traitées sont protégées par dépôt électrolytique de cuivre ou co-dépôt de cuivre et d'étain.

La nitruration s'accompagne d'un léger gonflement de la couche nitrurée dont il faut tenir compte en effectuant, s'il y a lieu, des corrections sur la pièce usinée avant nitruration [2].

4.3 Paramètres de La nitruration Gazeuse

Les paramètres de la nitruration gazeuse sont :

Température de nitruration : c'est la température à laquelle est effectué le traitement de nitruration, elle est comprise entre 450 et 580 °C.

- **Le potentiel nitrurant K_N** : grandeur liée au taux de dissociation de l'ammoniac τ_N .

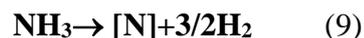
Pour une température donnée et une charge déterminée, le taux de dissociation de l'ammoniac τ_N est fixé par la réaction (4) qui se produit par effet catalytique sur les parois du four et sur les pièces.

Le taux de dissociation est défini, comme étant le pourcentage de gaz NH_3 présent dans l'atmosphère à la sortie du four et se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$\tau_N = (\text{Volume de } NH_3 \text{ non dissocié} / \text{Volume total des gaz usés}) \quad (8)$$

Ce paramètre est le plus utilisé industriellement car il représente effectivement la fraction d'ammoniac qui a une action nitrurante sur les pièces.

Le traitement de nitruration peut être considéré de façon globale comme un transfert des atomes d'azote du gaz ammoniac dans le matériau M. cette réaction peut s'écrire de la façon suivante :



Comme pour toute réaction chimique, la loi d'action de masse permet de formuler l'expression de la constante K de cette réaction telle que :

$$K = \frac{a_N P_{H_2}^{3/2}}{P_{NH_3}} \quad (10)$$

Où :

a_N : activité de l'azote [N] dans le matériau.

P_{H_2} : Pression partielle du gaz hydrogène dans le four.

P_{NH_3} : Pression partielle du gaz ammoniac dans le four.

En considérant les atomes dans la matrice ferritique comme une solution solide diluée, l'équation (10) permet de calculer la concentration d'azote qui dissout dans la matrice.

CHAPITRE II : Les procédés De Nitruration

$$[N] = K \frac{P_{NH_3}}{P_{H_2}^2} \quad (11)$$

A partir des pressions partielles d'ammoniac et d'hydrogène, il est alors possible de calculer la teneur d'azote en équilibre avec la ferrite à la surface du matériau [2].

4.3.1 L'influence du Taux de Dissociation τ_N

Dans un traitement de nitruration, pour une durée et une température fixées, l'augmentation du taux de dissociation de l'ammoniac entraîne :

Une diminution de l'épaisseur de la couche de combinaison [15].

4.4 Exemple de Description d'un four industriel

La nitruration en phase gazeuse est réalisée dans des fours à sole ou à cuve équipés de moyens de circulation forcée des gaz constituant l'atmosphère de nitruration (Figure 12)

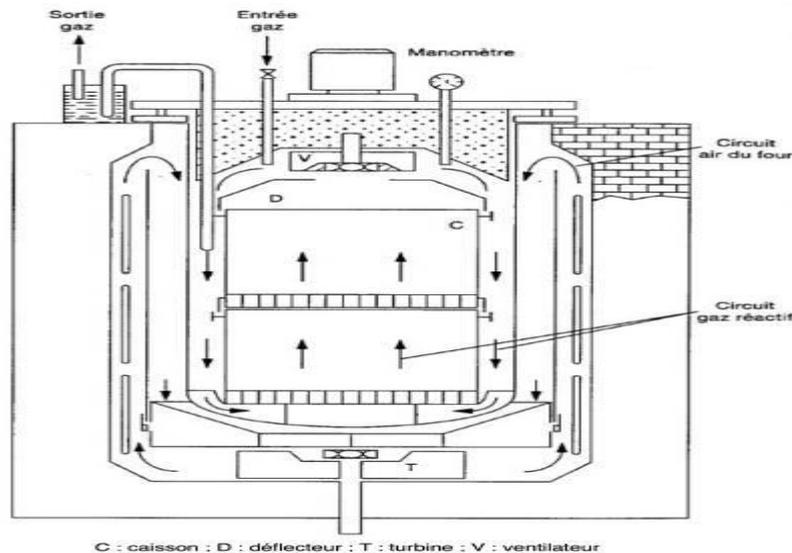


Figure 12 : Four vertical de nitruration [14].

Le four est composé :

- du pot qui sert au confinement de l'atmosphère nitrurante, le plus souvent en Inconel 600;
- d'un système de chauffage et de ventilation pour homogénéiser la température et l'atmosphère.
- de thermocouples pour vérifier l'homogénéité de la température dans le four;
- d'un spectromètre infrarouge ou d'une sonde à hydrogène pour quantifier l'ammoniac résiduel à la sortie du four et permettre le pilotage du four par régulation du taux

d'ammoniac résiduel (N_r) ou du potentiel nitrurant (K_n).

CHAPITRE II : Les procédés De Nitruration

Le gaz ammoniac est injecté dans un four fermé avec un four à moufle métallique (cornue ou cloche) équipé d'un mélange d'atmosphère parfait et d'une haute précision de température.

L'atmosphère est en légère surpression, et à température et charge partielle données, le débit de gaz dans le four fixe la vitesse de dissociation de l'ammoniac [14].

4.5 Dispositifs Expérimentaux

4.5.1 Four de Nitruration Gazeuse

4.5.2 Description

L'installation expérimentale de l'Institut Jean Lamour est présentée sur la Figure 12. Elle est constituée d'un four tubulaire vertical en alumine d'un diamètre de 50 mm. Il possède une zone isotherme d'environ 100 mm (soit un volume efficace d'environ 200 cm³) dans laquelle l'écart de température est de ± 1 °C. Le chauffage est assuré par une résistance électrique.

Les parois en alumine permettent de limiter le phénomène de décomposition thermique de l'ammoniac sur les parois du four. Compte tenu du temps de demi-réaction associé à ce phénomène, du temps de passage du gaz dans l'enceinte et de la surface des échantillons à traiter, on peut considérer la décomposition thermique de l'ammoniac comme négligeable durant le traitement. En d'autres termes, ce qui rentre dans le four est égal à ce qui sort. Le four est également muni d'un système de trempe sous forme d'une trappe installée sur la partie inférieure du four.

L'introduction des gaz s'effectue par l'intermédiaire de débitmètres massiques dédiés et situés dans la partie supérieure du four. Ces derniers permettent de maîtriser finement la composition de l'atmosphère lors du traitement i.e. la valeur du potentiel de nitruration. L'hydrogène est produit par un générateur utilisant une technique à membrane polymère pour l'électrolyse de l'eau et permettant d'atteindre une pureté supérieure à 99,9995 %) et l'ammoniac et l'azote proviennent de bouteilles de gaz [16].

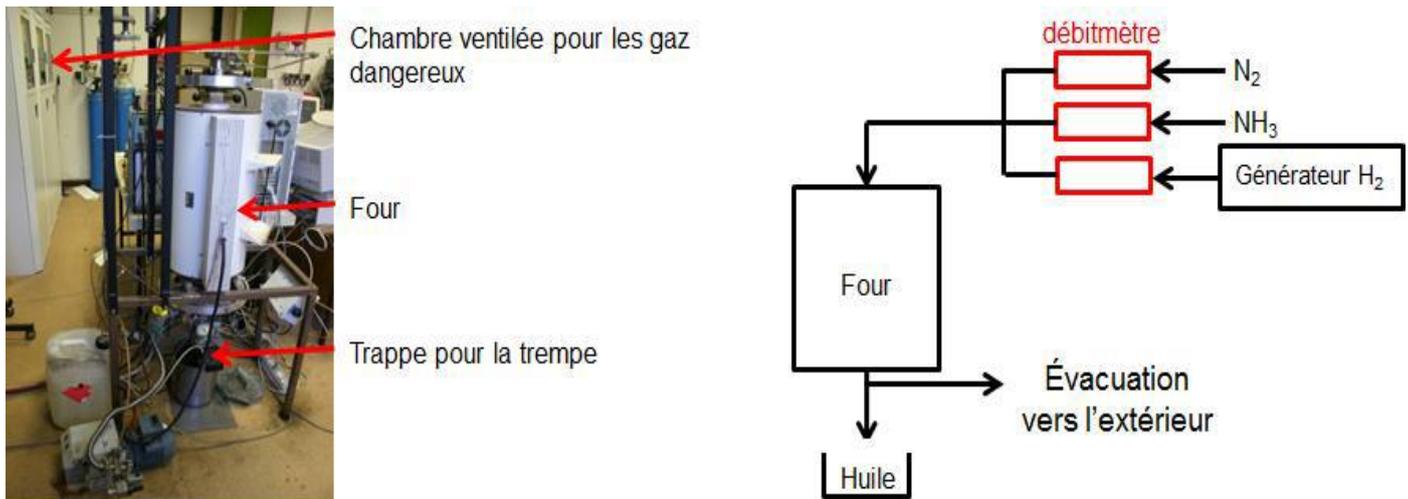


Figure 13 : Photographie et schéma associé de l'installation de nitruration gazeuse utilisée à l'Institut Jean Lamour [16].

4.6 Les avantages de Nitruration Gazeuse

La nitruration gazeuse est un procédé très utilisé, vu les avantages qu'elle présente.

Elle permet :

- Une très bonne uniformité de traitement, même pour les pièces de formes complexes.
- Application sur pièces de grandes dimensions.
- Gestion informatisée du processus, permettant de maîtriser la composition et la profondeur de la couche de combinaison [2].

5 La nitruration Ionique

5.1 Principe de Nitruration Ionique

Dans une enceinte contenant un mélange gazeux à base d'azote sous une pression de 0.1 à 10 mbars, on applique une tension continue, comprise entre 300 et 1300V, entre deux électrodes. L'échantillon à traiter fait office de cathode et les parois de la cuve d'anode.

Le courant et la tension sont choisis de manière à provoquer une décharge lumineuse qui conditionne le départ et l'accélération des électrons libres de l'échantillon métallique vers les surfaces anodiques du four. Lorsque ces électrons entrent en collision avec les molécules de gaz proches de la surface de l'échantillon, celles-ci s'ionisent, c'est à dire qu'elles libèrent un ou plusieurs électrons de valence qui peuvent percuter d'autres molécules de gaz et libérer ainsi d'autres électrons.

L'ensemble des particules ionisées constitue ainsi le plasma dans lequel les ions négatifs formés sont attirés par l'anode tandis que les ions positifs sont attirés par la cathode. C'est le cas des ions d'azote qui, positifs, sont attirés par la pièce à traiter. L'interaction entre les ions d'azote et la pièce conduit alors par un processus d'absorption et suivant les paramètres de traitement, à la formation de nitrures et à la diffusion d'azote atomique à travers la section de la pièce [17].

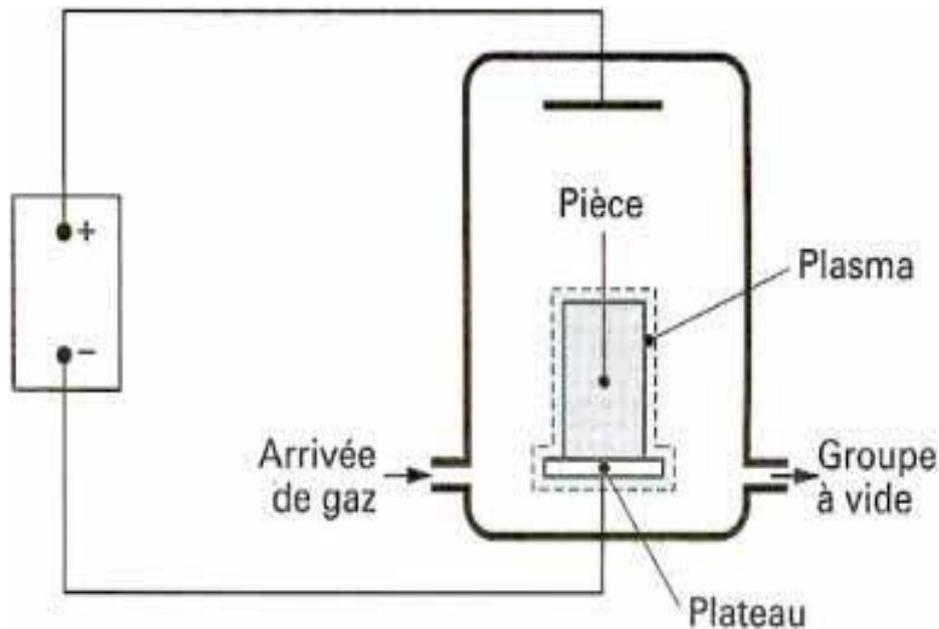


Figure 14 : Schéma de principe d'un four de nitruration ionique [18].

5.2 Paramètres de Nitruration Ionique

Outre la composition initiale de l'acier, les paramètres de nitruration comme la nature et la composition de gaz de l'enceinte, la température et la durée du traitement influent sur la morphologie et l'étendue des couches nitrurées. Le résultat de la nitruration dépend également des facteurs tels que la pression du gaz ou encore la tension et l'intensité du courant d'ionisation qui influencent l'homogénéité et l'uniformité de la nitruration [17].

5.3 Variantes et Procédés Spécifiques

La nitruration ionique et ses variantes sont des traitements thermo-chimiques de nitruration assistée plasma sous basse pression. Ils sont réalisés dans une gamme de température allant de moins de 400 °C jusqu'à plus de 600 °C.

5.3.1 NIVOX 1

Nitruration assistée plasma appliquée essentiellement aux aciers de construction et fontes pour toute pièce mécanique (pignons, glissières, arbres, tiges de vérin...) soumise à la fois à des contraintes mécaniques (résistance au grippage, diminution du coefficient de frottement, élévation de la limite d'endurance...) et de tenue à la corrosion.

- Couche de diffusion visée de 0,03 à 0,5 mm selon les nuances d'acier et spécification

5.3.2 NIVOX LH

Nitrocarburation assistée plasma à basse température permettant d'améliorer la résistance au grippage et à l'usure des aciers inoxydables austénitiques tout en conservant des caractéristiques de tenue à la corrosion de ces matériaux.

Aciers inoxydables : X6CrNi18-09 (304) / X2CrNi18-10 (304L) / X6CrNiMo17-11 (316) / X2CrNiMo17-12 (316L)...

- Dureté surface > 700HV0.1
- Diffusion standard 20 µm jusqu'à 35 µm
- Etat de surface conserve

5.3.3 Applications

Industrie nucléaire, chimique (mélangeurs), agroalimentaire (lames tranchantes, vis d'alimentation), biomédicale (prothèses, instruments chirurgicaux), pétrochimie (vannes, raccords), cryogénie (vannes, valves, boulonnerie), mécanique (axes, cames), Ultra-vide et spatial, aéronautique...

5.3.4 HARDINOX®

Nitruration assistée plasma appliquée aux aciers inoxydables austénitiques en vue d'assurer un durcissement superficiel, une amélioration de la tenue à l'usure, une diminution de la tendance au grippage sans perte des propriétés de tenue à la corrosion.

Aciers inoxydables : X6CrNi18-09 (304) / X2CrNi18-10 (304L) / X6CrNiMo17-11 (316) / X2CrNiMo17-12 (316L)...

- Dureté surface environ 1 100HV0.1
- Diffusion standard 2 à 15 µm
- Tenue brouillard salin > 1000h

5.3.5 Applications

Industrie nucléaire, chimique (mélangeurs), agroalimentaire (lames tranchantes, vis d'alimentation), biomédicale (prothèses, instruments chirurgicaux), pétrochimie (vannes, raccords), cryogénie (vannes, valves, boulonnerie), mécanique (axes, cames), Ultra-vide et spatial, aéronautique...

5.3.6 SULF-IONIC

Sulfonitrocarburation assistée plasma dans un mélange gazeux à base d'azote, de soufre et de carbone réalisée entre 500 et 570 °C. La présence de soufre permet d'améliorer considérablement la tenue au frottement et le glissement des pièces ainsi traitées. La création d'une couche de sulfure de fer (FeS) adjacente à la couche de nitrure de fer apporte une lubrification solide et diminue la tendance au grippage.

- Tenue au grippage
- Tenue à l'usure (dureté > 700HV0.1)
- Traitement propre (pas de résidus de sels comparativement aux procédés bains de sels).

5.3.7 Applications

Travail à sec (lubrification interdite ex. moulage matière transparente en parfumerie...), moules (éjecteur, coulisseau...), outils de mise en forme et emboutissage, systèmes hydrauliques (tiges, corps vérins, pistons...).

5.4 Limitations

- **Pénétration du traitement** : difficulté à traiter des pièces de géométrie complexe, alésages profonds, trous borgnes et vrac.
- **Problèmes des zones de contact** : les parties en contact avec le support ne seront pas traitées
- **Densité de charge** : plus faible que dans le cas de procédés gazeux [19].

5.5 Dispositifs Expérimentaux

5.5.1 Réacteur Plasma de Type ECR (Electron Cyclotron Résonance)

5.5.2 Description

L'installation expérimentale de nituration assistée par plasma est présentée sur la Figure 15. Des débitmètres massiques (l'hydrogène est produit de la même manière que pour le traitement en phase gazeuse) assurent l'introduction des gaz (N₂ et H₂) dans l'enceinte et permettent de réguler la composition de l'atmosphère. Un système de pompe primaire à palettes associée à une pompe turbo moléculaire permet de placer l'enceinte de traitement sous vide secondaire (volume d'environ 55 L) avant l'introduction des gaz de travail. Le plasma est produit par un réseau d'antennes micro-ondes terminées chacune par un aimant permanent de 875 G (excitation des électrons par résonance ECR : Electronic Cyclotron Résonance). La source plasma est donc délocalisée par rapport aux échantillons à traiter, ce qui constitue une grande différence avec les systèmes de type diode conventionnellement employés dans l'industrie pour lesquels le plasma est directement créé autour des substrats. Une faible polarisation négative (50 - 100V) peut être appliquée sur le porte-échantillon chauffant. Le porte-échantillon est muni de 2 lampes halogènes en configuration escargot autorisant un chauffage homogène de la plaque sur laquelle sont posés les échantillons [16].

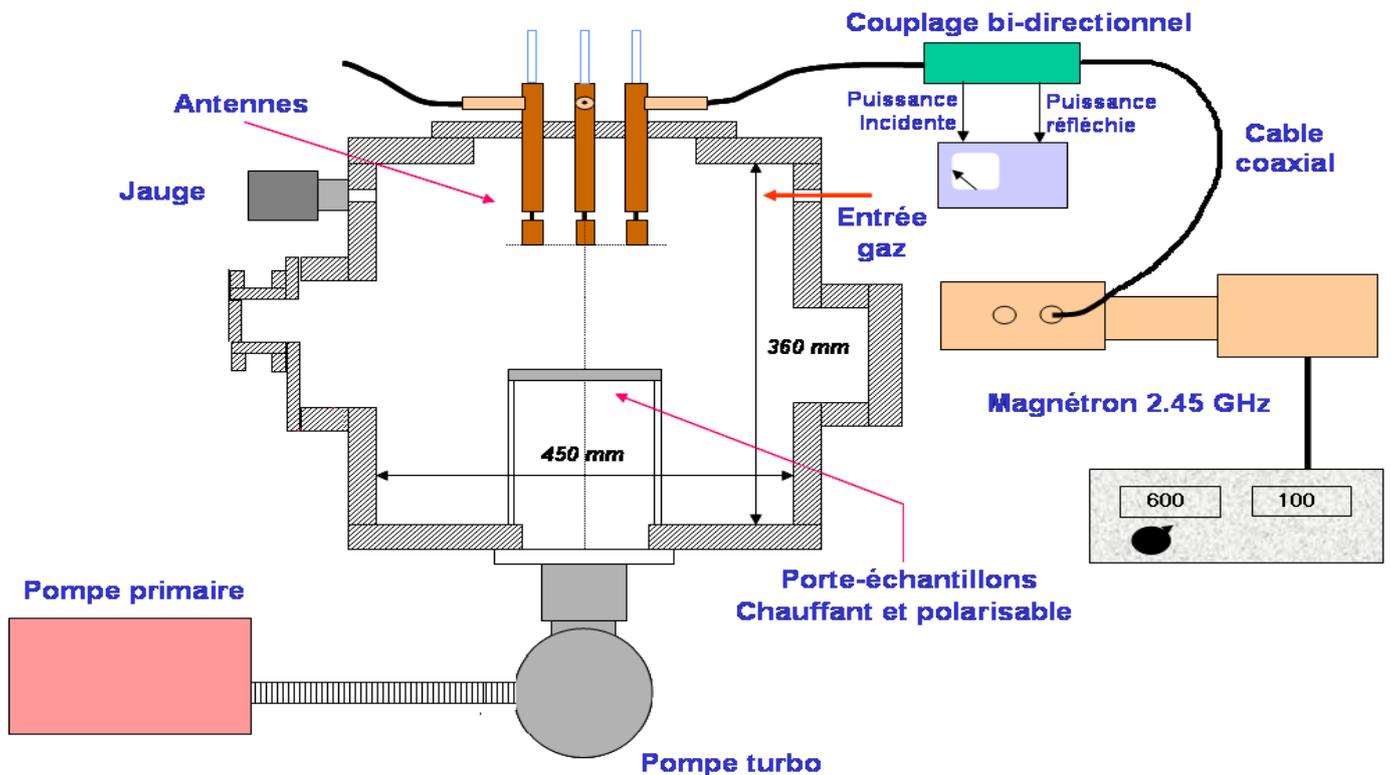


Figure 15 : Schéma du réacteur ECR utilisé pour les traitements de nitruration assistée par plasma [16].

- J'en ai conclu que le choix entre la nitruration gazeuse et la nitruration ionique dépend des besoins spécifiques de chaque application, comme le type de matériau, les propriétés de surface requises, les contraintes de temps et de coûts, ainsi que les équipements disponibles. En général, la nitruration ionique est recommandée pour des exigences élevées en termes de précision et de reproductibilité, tandis que la nitruration gazeuse est préférée lorsque les coûts sont prioritaires et des tolérances moins strictes sont acceptables.

6 Evolution des Procédés De Nitruration

Les traitements de nitruration et nitrocarburation se sont fortement développés depuis la fin des années 60 et plus spécialement ces vingt dernières années grâce aux études scientifiques menées aux développements des capteurs et à l'exploitation des données par la modélisation. L'intérêt de ces technologies a trouvé sa source dans le développement des procédés assistés plasma (nitruration ionique) qui connurent en Europe et au Japon une implantation exponentielle au cours des décennies 80 et 90, et des procédés en bain de sels sans cyanure industrialisés dès 1975. Les procédés gazeux plus anciens étaient restés assez confidentiels et réservés aux seuls aciers dits de nitruration avec

CHAPITRE II : Les procédés De Nituration

élimination de la couche blanche. Les résultats obtenus avec les plasmas et les sels ont généré de nouvelles recherches sur les procédés gazeux en version nituration et nitrocarburation avec mise en évidence des remarquables propriétés de la couche blanche ; les développements les plus importants sont à attribuer aux laboratoires allemands, français et anglais. Cette famille de traitement offre un panel d'applications venant compléter les procédés de carburation (cémentation), avec de nombreux avantages (limités par la profondeur influencée) en matière de frottement, en conditions limites de lubrification, d'usure et de grippage par petits débattements, de capacité de rodage et d'adaptation des surfaces. Ces traitements se retrouvent dans tous les domaines de la mécanique en mouvement de l'automobile (notamment de compétition), du machinisme, de l'aéronautique, de l'hydraulique. Par rapport à la cémentation, le bénéfice de déformations moindres, générées par le traitement, est un atout majeur. La résistance à l'adoucissement par la température en est un autre. La possibilité d'obtenir une résistance à la corrosion est une offre nouvelle déjà très exploitée sur certains secteurs comme celui des tiges de vérins à gaz. Des progrès sur le plan de la fiabilité industrielle sont encore à obtenir, les laboratoires s'y emploient [20].

7 Comparaison des Divers Procédés

Le choix d'un procédé pour la réalisation d'un traitement est une opération difficile qui dépend de nombreux facteurs. Dans de nombreux cas, plusieurs procédés peuvent convenir d'un point de vue technique et ce sont les caractéristiques technico-économiques qui permettent de départager les solutions. Dans cette optique, on pourra utiliser pour comparer les divers procédés vis-à-vis d'une utilisation, les données concernant les propriétés des pièces nitrurées à savoir la dureté superficielle, la résistance à l'usure et à la fatigue, la tenue à la corrosion, la tenue à chaud...etc. Une fois cette étape franchie, les particularités de certains procédés peuvent constituer autant d'avantages (ou d'inconvénients) déterminants par rapport au choix.

Le tableau 5 illustre quelques caractéristiques propres à chaque famille de procédés de traitement. On peut citer en particulier les suivantes:

CHAPITRE II : Les procédés De Nituration

Tableau 5 : *Eléments de comparaison des procédés de nituration [7].*

caractéristiques	Nituration gazeuse	Nituration ionique	Nituration bain de sels
Choix de la couche de combinaison	Oui	Oui	Non Uniquement
Plage de la température	510 - 600 °C	400 - 600 °C	565 - 590 °C
Absence de couche de combinaison	Oui (difficile)	Oui (métrisable)	Non
Épaisseur de la couche de combinaison	Réglable en f (T, t, composition, atm)	Réglable en f (T, t, atm) composition,	Réglable en f(t)
Profondeur de diffusion	Non limitée f (T, t, acier)	Non limitée f(T, t, acier)	Limitée à 0.25 mm Exceptionnellement 0.5 mm
Temps de traitement	6 - 80 h	1 - 60 h	< 1 - 6 h
Influence de la morphologie de la pièce	Faible	Forte	Négligeable
Possibilité de réserves (protections)	Moyenne	Bonne	Mauvaise
Propreté aspect	Bon	Très bon	Moyen
Carbonituration	Oui	Oui	Toujours
Carbonituration + oxydation	Peu pratiquées	Difficile	Procédé éprouvé
Facteurs de coût principaux	Temps et gaz	Amortissement et temps	Sels et déchets

Le tableau 6 indique, pour les quatre procédés exploités industriellement, les agents niturant, la température et le temps de traitement, les avantages et les inconvénients

CHAPITRE II : Les procédés De Nitruration

Tableau 6 : Comparaison entre les différents modes de nitrurations

procédés	Agents Nitrurants	T (°c)	temps (h)	Avantages	Inconvénients
Nitruration Solide	Cyanamide Calcique + Activateur	470 à 570	1 à 25	- Simplicité - Sécurité	-Petites pièces -Peu mécanisable
Nitruration liquide	Cyanures Cyanates	570	1 à 5	- Traitements courts, peu onéreux. - Simplicité. - Mise en œuvre facile, économique	- Pollution - Peu mécanisable - Température de traitement fixe. - Nettoyage des pièces après
Nitruration Ionique	Ammoniac Azote Azote + Méthane	350 à 600	0.25 à 40	- Faible consommation d'énergie. - Propreté. - Automatisation possible. - Bonne maîtrise de la nature de la couche superficielle.	- Matériel et traitement onéreux - Faibles charges - Nitruration de pièce à géométrie complexes.
Nitruration gazeuse	Ammoniac Ammoniac + Gaz	510 à 570	10 à 100	- Grandes pièces. - Simplicité de mise en œuvre. - Traitement peu onéreux	- Traitement long. - Gaz toxique. - Consommation de gaz élevée.

Les traitements par voie ionique ou gazeuse sont les plus couramment employés. Ils donnent des résultats reproductibles industriellement tout en permettant un pilotage automatique des installations [15].

Sur le tableau 7 sont résumés les avantages et les inconvénients des différents procédés de nitruration.

CHAPITRE II : Les procédés De Nitruration

Tableau 7 : Avantages et inconvénients des différents procédés de nitruration [1].

	Avantages	Inconvénients
Phase Gazeuse	<ul style="list-style-type: none"> •Matériel simple, peu coûteux. •Facilité de mise en œuvre. •Traitement de grosses pièces. 	<ul style="list-style-type: none"> •Traitements longs. (Dizaines d'heures). •Consommation de gaz élevée. •Utilisation d'aciers spéciaux de nitruration.
Phase Liquide	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de mise en œuvre. •Traitements courts:1 à 3 heures •Matériel simple. •Traitement peu onéreux. •Réalisation de couche de nitrure ϵ ($Fe_{2-3}N$) sur aciers alliés. 	<ul style="list-style-type: none"> •Sels à forte teneur en cyanure (Tenifer) ou à faible teneur en cyanure (0.5 à 3 %). •Nettoyage des pièces après traitement. •Couche epsilon légèrement poreuse en surface. •Température de traitement fixe: 570 °C.
Phase Ionique	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé souple, réalisation de couches nitrures monophasées, ϵ, γ'(Fe_4N), diffusion. •Cinétique de nitruration élevée. • Pas de reprise en rectification après traitement. • Faible consommation de gaz et d'énergie. • Procédé non polluant et de grande propreté. 	<ul style="list-style-type: none"> •Matériel coûteux. •Traitement par famille de pièce. •Traitement pouvant être onéreux. •Difficultés de traiter les petits alésages.

8 Aciers pour Nitruration

Pratiquement, il est envisageable de nitrurer tous les aciers. Le choix d'un acier destiné à être nitruré doit être fait en fonction des caractéristiques recherchées sur la pièce et des conditions de réalisation de celle-ci.

Les critères de choix sont divisés en deux groupes :

- caractéristiques du cœur (résistance, trempabilité, tenue à chaud, soudabilité...),
- caractéristiques de la couche nitrurée, (dureté, fragilité, profondeur ...).

De nombreux types d'aciers donc sont aptes à la nitruration sous réserve que les propriétés à cœur ne risquent pas d'être effectuées par le traitement ; sauf dans le cas d'aciers à dispersoïdes, il s'agit donc d'aciers trempés et revenus à une température supérieure à la température de nitruration.

- Aciers au carbone : XC 18 à XC 55,
- Aciers au manganèse : 20 M5 - 35 M5 - 40 M6,
- Aciers au chrome : 38 C4 - 42 C2,
- Aciers au chrome molybdène : 25 CD4 à 42 CD4, 30 CD12,
- Aciers au chrome -aluminium molybdène : 30 CAD6-12, 40 CAD6-12,
- Aciers au nickel chrome molybdène : 30 CND8, 35 NCD16,
- Aciers à outils : Z 38 CDV5 ; Z 100 CDV5 ; Z 160 CDV12 ; Aciers rapides,
- Aciers à dispersoïdes.
- Aciers inoxydables.

CHAPITRE II : Les procédés De Nituration

Le choix de la nuance à retenir est orienté vers l'optimisation des caractéristiques dans la masse et en surface. Les aciers contenant des éléments tels que le chrome, l'aluminium ou le vanadium, susceptibles de donner, en se combinant avec l'azote, une fine dispersion de nitrures, conviennent particulièrement bien pour la nituration [18].

Les aciers de nituration sont d'une manière générale des aciers dont les propriétés à cœur ne sont pas remises en cause par le traitement. En dehors des aciers à dispersoïdes dont les propriétés mécaniques sont obtenues directement par un traitement thermomécanique, il s'agit d'aciers trempés et revenus à une température supérieure à la température de nituration.

Les principales familles d'aciers qui peuvent être niturées sont donc les suivantes (**Norme NF A02-051**)

Le tableau 8 récapitule pour chacune des familles d'aciers la nature des couches de combinaison et l'épaisseur des couches de diffusion.

Tableau 8 : Caractéristiques des couches niturées sur les principales familles d'aciers D'après J.P. LEBRUN [5],

Famille d'aciers	Type d'acier	Dureté maximale HV0.1	Epaisseur de la couche de diffusion (µm)
Aciers au carbone	C18 à C45	400 à 600	150 à 500
Aciers au chrome Molybdène	25CrMo4 à 42CrMo4 30CrMoV12 32CrMoV13	600 à 800 800 à 950 800 à 1100	300 à 600 300 à 500 400 à 700
Aciers à outils	X38CrMoV5-1 X100CrMoV5 X153CrMoV12	> 1200 > 1200 > 1200	150 à 300 100 à 150 100 à 120
Aciers à dispersoïdes	30MnV4, 35MnV7	600 à 800	200 à 500
Aciers au chrome aluminium molybdène	30CrAlMo6-12	1100 à 1300	500 à 900
Aciers inoxydables	X30Cr13 X5CrNiMo16-5-1	> 1200 > 1200	50 à 100 100 à 300

8.1 Influence des Eléments d'alliage

La nitruration des aciers non alliés ne présente que peu d'intérêt; le durcissement superficiel n'est que de l'ordre de 100 Hv avec une amélioration du coefficient de frottement mais avec un risque de fragilisation. Les principaux éléments durcissant en ordre décroissant sont:

Aluminium; Chrome; Titane; Molybdène; Vanadium et Manganèse.

La teneur en carbone, importante pour l'obtention des caractéristiques mécaniques du cœur, se situe généralement entre 0,25 et 0,45 %. Les valeurs supérieures conduisent à une structure plus fragile.

Dans les cas particuliers nécessitant un soudage, le carbone est limité à 0,15 – 0,20 %.

Ainsi, dans des conditions données de nitruration, l'augmentation de cet élément favorise, au niveau de la couche de combinaison, la formation du composé ϵ .

Aluminium

C'est l'élément provoquant le plus grand durcissement des couches nitrurées. La dureté superficielle augmente avec la teneur en aluminium. Une trop forte teneur conduit à un manque de progressivité de dureté de la surface vers le cœur sensibilisant les pièces à l'écaillage. La grande réactivité et la faible densité de l'aluminium rendent son addition délicate à l'élaboration et conduisent à la formation d'inclusions parfois gênantes tant sur les caractéristiques mécaniques que sur l'aptitude au polissage.

Chrome

Il intervient pour une grande part dans le durcissement superficiel et dans l'obtention des caractéristiques de l'acier en augmentant particulièrement la trempabilité. Pour des teneurs supérieures à 4 % il diminue la réactivité de la surface à la nitruration et impose l'utilisation de processus activant la surface.

Molybdène

Le molybdène augmente la trempabilité de l'acier et diminue la fragilisation au revenu. Il participe également au durcissement superficiel de façon sensible.

Nickel

Le nickel est très utilisé pour augmenter la trempabilité des aciers. Dans le cas de la nitruration, il faut être attentif au risque de fragilisation au revenu que présentent la plupart des aciers avec nickel comme élément d'alliage principal.

Vanadium

Le vanadium participe au durcissement superficiel. Son intérêt est de limiter le grossissement du grain lors des traitements préalables à la nitruration et d'augmenter la résistance à l'adoucissement au revenu ; il limite la diminution des caractéristiques mécaniques par effet de revenu pendant la nitruration

8.2 Nuances d'aciers de Nitruration

Dès le développement industriel de la nitruration, deux catégories d'aciers spéciaux de construction ont été développées:

a) Aciers Cr Al Mo

Leur composition typique est : Cr 1,5 % - Al 1 % - Mo 0,25 % - C 0,2/0,45 %. Ils sont utilisés à l'état trempé revenu pour une résistance de l'ordre de 1000 MPa. Ils permettent l'obtention de couches nitrurées de quelques centièmes de mm à plus de 1 mm avec des duretés superficielles de 900 à 1200 Hv.

La grande dureté superficielle est malheureusement associée à une certaine fragilité des couches superficielles en particulier sur les arêtes vives. Ils sont utilisés pour des pièces devant présenter une grande résistance à l'usure sans risque de chocs pouvant provoquer des écaillages.

b) Aciers Cr Mo - Cr Mo V

Leur composition typique est : Cr 3 % - Mo 0,4-1 % - V 0-0,2 % - C 0,20-0,40 %. Ils sont utilisés à l'état trempé revenu pour une résistance de 900 à 1300 MPa. Comme pour les précédents, les couches nitrurées sont de quelques centièmes à plus de 1 mm.

Les duretés superficielles sont de 700 à 900 Hv permettant l'utilisation de ces aciers pour des pièces devant résister à l'usure en présentant une bonne ténacité et une bonne tenue en fatigue. Nous citerons pour mémoire leur utilisation en aéronautique et en compétition automobile pour la fabrication des pièces fortement sollicitées telles que vilebrequins et pignons

c) Aciers de construction nitrurables

Une multitude d'aciers de construction subissent une nitruration pour améliorer leur tenue au frottement et à la fatigue. Les principales catégories sont:

25CrMo4 à 42CrMo4

20MnCr5 à 27MnCr5 + éventuellement Mo

40CrMnMo8 à usinabilité améliorée

35CrNi à usinabilité améliorée

40CrMoV20

Aciers doux

Superalliage type INCO 718, TA6V

d) Aciers en développement

On peut citer:

- Les aciers de constructions permettant sur les pièces de forge, d'obtenir directement dans la chaude de forge les caractéristiques mécaniques à cœur et la structure apte à la nitruration en supprimant ainsi l'opération de trempé- revenu.
- Les aciers à usinabilité améliorée permettant de réaliser, par décolletage dans des conditions économiques favorables, des pièces à partir de barres prétraitées.

Les aciers à cinétique de nitruration améliorée permettant de réduire les cycles de nitruration de plus de 40 %, tout en conservant les caractéristiques mécaniques à cœur et de surface des aciers classiques de type 32CrMoV13 [7].

9 Les applications de La nituration

Dans la mesure où la nituration permet d'obtenir une couche de combinaison sur une couche de diffusion d'azote, ce traitement permet d'assurer une fonctionnalité de résistance au frottement et à l'usure (notamment avec la couche de combinaison ϵ), en plus de l'amélioration des propriétés de tenue à la fatigue assuré par la couche de diffusion d'azote et la présence de cette couche de contraintes résiduelles de compression. On trouvera des applications de ce traitement dans de nombreux domaines de l'industrie :

- **Mécanique** : outillages de forge et d'extrusion à chaud sur acier X37CrMoV5-1, travail des métaux en feuilles sur acier X153CrMoV12 ;
- **Aéronautique** : réalisation de roulements opérant dans des conditions sévères telles que grande vitesse, haute température, conditions de lubrification limites, par nituration profonde de l'acier 32CrMoV13 ;
- **Transport** : engrenages en acier 40CrMoV12, vilebrequins et crémaillères en acier 35CrMo4, éventuellement en fonte GS 700 ou 900, chemises de moteurs à combustion interne, boîtiers de différentiels, arbres à cames, pistons, poussoir en fonte grise lamellaire ou à graphite sphéroïdal ;
- **Plasturgie** : vis et fourreaux d'extrusion en acier 40CrMoV12 et 40CrAlMo6-12,
- **Biomédical** : alliages de titane (nitrurés vers 700 °C pour l'obtention d'une couche de TiN de quelques μm) ;
- **Production d'énergie** : aciers inoxydables de structure austénitique nitrurés par bombardement ionique à une température inférieure ou égale à 450 °C, de façon à ne pas former de nitrures de chrome, mais simplement insérer de l'azote dans la structure austénitique.

Dans ces conditions, il y a amélioration des propriétés tribologiques des aciers inoxydables sans dégradation des caractéristiques de tenue à la corrosion. Ce traitement mis au point à la fin de la décennie 1980 est parfaitement adapté à un large domaine d'applications des aciers inoxydables dans de nombreux secteurs industriels (mécanique, chimie, agroalimentaire). Un des exemples les plus spectaculaires est l'application aux grappes de commande des réacteurs nucléaires à eau pressurisée [7].

Conclusion Générale

Conclusion Générale

D'après ce qui a été évoqué précédemment, il semble que, par ses multiples procédés, la nitruration représente une technique de traitement de surface indispensable pour améliorer les propriétés des matériaux métalliques.

Les procédés universels de la nitruration sont :

- **La nitruration solide** : est moins utilisée en raison de son coût élevé, de sa complexité.
- **La Nitruration (liquide) en Bain de Sel** : Efficace et rapide, mais pose des défis environnementaux et de sécurité en raison des produits chimiques utilisés.
- **La Nitruration Gazeuse** : Flexible et bien contrôlée, elle est toutefois limitée par des temps de cycle plus longs et des contraintes de sécurité liées à la manipulation des gaz.

La Nitruration Plasma : Permet un contrôle précis et une meilleure uniformité du traitement, avec des avantages environnementaux, mais nécessite un équipement plus sophistiqué et coûteux. Les conditions de nitruration, telles que la température, la durée du traitement, et la composition du gaz, jouent un rôle crucial dans la détermination des propriétés finales de la surface traitée. Quelque soit le procédé utilisé la nitruration permet :

- D'augmenter la dureté de la surface
- D'améliorer la résistance à l'usure
- D'améliorer la résistance à l'usure

En conclusion ; on dira qu'une compréhension plus approfondie de chaque procédé permettra son optimisation et sa durabilité future.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] **N.E. BENARABIA**, «Etude thermodynamique de l'équilibre des phases dans les zones nitrurées, cas de la nitruration gazeuse des binaires et des aciers» Thèse de Doctorat, ENP, (Alger).2018.
- [2] **A. LOUCİF**. Analyse thermodynamique des phases du système fer-azote. Thèse d'ingénieur d'état, ENP, (2003).
- [3] **L. MAROT**. Développement d'un nouveau système d'implantation ionique en immersion plasma et analyses des processus de nitruration conducteurs, PhD thèses, Université de Poitiers, France, 2001.
- [4] **N.E. BENARABIA**. « Optimisation des paramètres de nitruration : influence des éléments d'addition, modélisation et calcul thermodynamique » Thèse de Magistère, ENP, 1998.
- [5] **Y. MELLAL, A. BOUKAZOUHA**, «Etude de la nitruration solide de l'acier faiblement allié 23MnCrMo5» Thèse d'ingénieur d'état, ENP, (Alger). 2019.
- [6] **M.E. DJEGHLAL**, Etude des phénomènes de diffusion, précipitation et évaluations thermodynamiques des phases formées lors de la nitruration des alliages binaires synthétiques et des aciers Cr-Mo-V. PhD thèses, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2003.
- [7] **O. BELAHSEN**. «Etude comparative du comportement chimique et tribologique des aciers » Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, (Biskra). (2013).
- [8] **H.BEHLLOULI**, caractérisation des couches de diffusion d'un acier inoxydable 17-PH(cémentation et nitruration) , Thèse de Master, Université Saad Dahlab, (Blida). 2014.
- [9] **F.ATHMANI**, Etude microstructurale et transformation tribologique superficielle de l'acier 32CrMoV13 nitruré, Thèse d'ingénieur d'état, ENP, (Alger). 2002.
- [10] https://www.struers.com/-/media/Struers-media-library/Materials/Application-reports/French/Application_Nitrided_coatings_French.pdf.
- [11] **M .ATHMANI**, «Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (Cémentation)»Thèse de Magister ,université badji mokhtar, (Annaba).2011.
- [12] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-thermiques-superficiels-et-thermochimiques-42501210/nitruration-et-nitrocarburation-m1227/traitements-en-milieu-liquide-bains-de-sels-m1227v2niv10002.html>.
- [13] <https://www.blessing.ch/fr/traitements/nitruration/nitruration-au-bains-de-sel/qqp>. téléchargé le 07/05/2024
- [14] **T. DJEDI**. «Nitrocarburation ionique de l'acier42CD4:microstructure et propriétés» Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, (Biskra). (2022).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15] **N. OUBABAS.** étude comparative entre le traitement de nitruration et de borocarbonitruration .
Thèse de magistère, ENP, 2008.
- [16] **O. SKIBA.** Développement d'un procédé de nitruration pour l'aéronautique. Étude des
mécanismes de durcissement sur des alliages fer-chrome nitrurés. Matériaux. Université de Lorraine,
2018. Français. NNT : 2018LORR0099.
- [17] **O. BARTIER.** Effet d'une nitruration par plasma d'ions sur la fragilisation par l'hydrogène d'un
acier a haute résistance. thèse de doctorat. université des sciences et technologies de lille. France.1996.
- [18] **A .GACEM,** « traitement de nitruration sur les aciers de construction » Thèse de Master,
Universités badji mokhtar , (Annaba).2020.
- [19] https://www.bodycote.com/wp-content/uploads/2018/02/FICHE_nitruration_ionique-Fev2013.pdf. télécharger le 07/05/2024.
- [20] **C. Leroux.,** Nitruration et nitrocarburation-Matériaux mis en œuvre et propriétés d'emploi
nitrocarburation et dérivés .Techniques de l'Ingénieur, M1228 (2012).