

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE
ENSMM-annaba-



Département science et génie des matériaux
Mémoire de fin d'études
INGENIEUR: Science et Génie des Matériaux

**THEME :Caractérisation des aciers de
constructions(xc45,42CD4,St70)
nitrurées par plasma**

Présenté(e) par : - GHANEM IKRAM

- HANNACHI RIMA

Encadré(e) par : - Pr TOUHAMI Mohamed Zine

Membres du jury : - Pr CHADLI Hacem

- Dr TAHRAOUI Tarek

Juin 2017

Remercîments ☺

Je tiens à remercier en premier lieu, et avec toute ma gratitude, mon encadreur l'honorable Pr Touhami Mohammed Zine, pour son soutien, pour son temps consacré avec moi, et pour son aimable encouragement. C'était un grand plaisir que vous me guidiez durant la réalisation de ce travail.

Un grand merci à l'équipe de laboratoire SGM de l'ENSM : Mme S.Meddah, Mme Zeddouri Hakima, Rym, Nadir, et Hichem. J'avais vraiment l'honneur de travailler avec vous.

On remercie les membres de jury qui nous ont honorés par leurs présences.

Je remercie l'ingénieur d'Arcelor Métal « Mr Rerari Youcef » Et les ingénieurs d'Etrag.

Je remercie nos parents de leurs soutiens durant nos études.

Finalement merci à toute personne ayant contribué de près ou loin à la réalisation de ce modeste travail

Dédicaces ☺

Je dédie ce mémoire :

À Mon dieu, le clément et le Miséricordieux et de fidélité. C'est avec la bénédiction d'ALLAH que j'ai pu compléter ce travail.

À mes chers parents, qui m'ont tout donné pour arriver ici. C'est grâce à vous que je suis cette personne-là. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers vous. Que dieu vous garde pour moi, que vous Seriez toujours fiers de moi.

À mes chers frères : Medjabri Bilel, Housseem, Ammar, Azzou, Riyad, Adel, Zina, Sihem, Mouna et sans oublier mon frère « Aymen l'Matador » et surtout les petites fleurs de la famille « Mouzninou », « Timou », « Soulou », « Nounou » Et « Mimou »

À toute la famille Ghanem.

À mes chères sœurs que j'ai vus avec eux autant des moments inoubliables : « Sousou », « Lili » et « Rim »

À tous les personnes que j'ai connues et je n'ai pas cité ici

À tous les étudiants d'électronique

*À moi-même
ikram*

Dédicace ☺

Je dédie ce mémoire à :

*A mes chers parents pour leurs patiences,
leurs amours, leurs soutiens et leurs
encouragements.*

A mes frères et mes sœurs :

*« Sara », « sana », « Adel », « Bilel », « walid » et
« milouka »*

A Asma, Marwa, Ikram

A toutes la famille Hannachi

Résumé :

Les aciers 42CD4, C45 et St70 sont largement utilisés pour la fabrication des pièces mécaniques, ce qui nous conduit à chercher d'améliorer leurs propriétés mécaniques. Dans cette étude, nous nous intéressons à rechercher les causes plausibles entraînant la dégradation de la microstructure et les propriétés mécaniques des engrenages en aciers précités après tout un cycle à savoir une amélioration suivie d'une nitruration ionique. Les traitements thermiques en l'occurrence les recuits et la trempe complète suivie d'un revenu ont été réalisés dans des fours à atmosphère non contrôlée. Nous essayons par ailleurs, de voir l'effet des couches en surface et en volume sur la formation des couches superficielles obtenues par nitruration ionique.

L'augmentation du pourcentage d'azote conduit à la formation d'une couche de combinaison, augmente d'une façon spectaculaire l'épaisseur de la couche de diffusion et améliore les propriétés mécaniques des pièces traitées.

Avec des techniques d'analyses traditionnelles telles que la microscopie optique, la Microscopie électronique à balayage, Microduromètre et rugosimètre, on a pu déterminer les propriétés mécaniques et métallographiques des couches nitrurées.

Il a été observé, par ces techniques que Les structures qui doivent être recommandées pour être nitrurer, ce sont des structures qui doivent subir une trempe complète suivie d'un revenu à haute température favorisant une structure de type sorbitique ou troostitique granulaire et assurant un bon compromis entre résistance et ductilité.

Liste des figures

N°	Titre	Page
Chapitre I		
I.1	Epaisseur de la couche de diffusion	12
I.2	Diffusion à partir d'i atmosphère à teneur constante	15
I.3	Profondeur cémentée en deux heures pour différentes températures de cémentation (acier 16MnCr5)	16
I.4	En cémentation gazeuse, les creux sont moins cémentés que les reliefs, en raison du moins bon renouvellement des gaz	16
I.5	Exemple de cémentation gazeuse : chariot d'un système de guidage linéaire à billes	16
Chapitre 2		
II.1	Evolution des teneurs en azote, carbone et oxygène dans la couche de combinaison après nitrocarburation en bain de sels	27
II.2	Schéma de principe d'un four de nitruration ionique	28
II.3	Diagramme d'équilibre fer – azote	31
II.4	Structures cristallographiques du (a) nitrure γ' (Fe_4N), (b) nitrure ϵ (Fe_{2-3}N)	34
Chapitre III		
III.1	Pièces en aciers 42CD4 (a : vilebrequin, b : couronne, c : bielle, d : demi essieu).	38
III.2	Pièces en C45 (a : engrenages, b : boulonnerie, c : axe)	39
	Découpage des lopins	41

III.3		
III.4	Four du chauffage	41
III.5	Marteau GOA2000	42
III.6	Outil d'ébavurage PEE 400(excentrique)	42
III.7	Pièces bruts après ébavurage traitement thermique (du gauche à droite : ébavures, croisillons différentiels, roues dentées)	43
III.8	Cycle du traitement d'amélioration (Trempe + revenu à haute température).	44
III.9	Cycle de Traitement de recuit de normalisation	44
III.10	Atelier du traitement thermique des aciers	45
III.11	Opération de nettoyage en grenaillage	45
III.12	Opérations d'usinage	46
III.13	Représentation schématique et photo de l'installation du four de nitruration par plasma	47
III.14	Composants du four de traitement de nitruration ionique	48
III.15	Gazes du four de nitruration par plasma	49
III.16	générateur plasma	49
III.17	Schéma représentatif de cycle de traitement de nitruration par plasma	51
III.18	la roue dentée du moteur à 6 cylindres ; tracteur CX100.	51
III.19	Système de transmission du mouvement par l'unité différentielle	52
III.20	Spectromètre d'émission optique	53
III.21	Équipements de découpage	54

III.22	les échantillons (C45 et 42CD4) enrobés à froid	54
III.23	Polisseuse de type <i>hitech</i>	54
III.24	Principe de fonctionnement du microscope optique	55
III.25	Schéma du microscope métallographique	55
III.26	Le microdurometre Vickers	56
III.27	Rugosimètre surfest SJ-301	57
III.28	Nettoyage à l'ultrason	58
III.29	Vue du MEB utilisé	58
Chapitre IV		
IV.1	Micrographie optique de trois nuances (a: l'acier C45, b : l'acier St70, c : l'acier 42CD4).	62
IV.2	Microstructures de l'acier St70 ayant subi une nitruration ionique a) St70 (test1), b) St 70(test2)	63
IV .3	Micrographies optiques (coupes transversales) de l'acierCk45(test1) ayant subi une nitruration ionique	63
IV.4	Micrographies optiques des nuances C45, 42CD4 et ST70 nitrurés par plasma a) : XC45, b) : 42CD4, c) : ST70	64
IV.5	Profil de microdureté de l'acier 42CD4 nitruré par plasma	66
IV.6	Profil de microduretéde l'acier C45 nitruré par plasma	67

IV.7	Profil de microdureté de l'acier St70 nitruré par plasma	68
	Micrographie par MEB de la coupe transversale du st70 nitruré	69
IV.8		

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Chapitre II		
II.1	Eléments de comparaison des procédés de nitruration	30
II.2	Caractéristiques cristallographiques des phases du système fer – azote	32
Chapitre III		
III.1	Désignations de la nuance selon les normes dans le monde	37
III.2	Composition chimique en % poids	37
III.3	Quelques caractéristiques mécaniques de l'acier 42CD4	37
III.4	Désignations de la nuance selon les normes internationales.	38
III.5	Quelques caractéristiques mécaniques et physiques de l'acier C45	39
III.6	Désignations de la nuance selon les normes internationale	40
III.7	Quelques caractéristiques mécaniques de l'acier st70	40
III.8	Dimensions et poids des lopins	41
III.9	Conditions de la pulvérisation cathodique	50
III.10	Condition de la nitruration ionique	50

Chapitre IV

IV.1	Composition chimique de l'acier 42CD4	60
IV.2	Composition chimique de l'acier XC45	60
IV.3	Composition chimique de référence de l'acier 42CD4 (la norme DIN EN 10343 (07/2009))	61
IV.4	Composition chimique de référence de l'acier XC45 (la norme DIN EN 10343 (07/2009))	61
IV.5	Composition chimique de référence de l'acier XC45 (la norme DIN EN 10343 (07/2009))	61
IV.6	Epaisseur de la couche de combinaison et de diffusion	64
IV.7	La rugosité Ra des trois nuances avant et après traitements thermochimiques	69

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PRESENTATION DE L'ENTRAPRISE TRACTEURS AGRICOLES (EPE ETRAG).....	3
CHAPITRE I : TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES DES ACIERS	11
I.1. Introduction.....	11
I.2.LES TYPES DE TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUE.....	13
I.2.1.CÉMENTATION.....	13
a. Procédés de cémentation.....	13
b. Traitements thermiques après cémentation	17
c. Aciers de cémentation et défauts possibles.....	17
I.2.2. Carbonitruration	18
a. Procédé de carbonitruration.....	19
b. Structures et traitements thermiques	20
c. Influence de la composition chimique sur la structure de la couche carbonitruré.....	20
d. Aciers de carbonitruration.....	21
I.2.3.MÉTALLISATION PAR CEMENTATION.....	21
a. Boruration.....	22
b. Chromisation.....	22
I.2.4. Nituration.....	23
Chapitre II : Nituration	24
II.1. Introduction	24
II.2. Principe et procédés de la nituration.....	24
II.2.1. Principe	24
II.2.2. Procédés de la nituration.....	24
II.2.2.1. La nituration gazeuse	24
II.2.2.2. Nituration en bain de sels	25

II.2.2.3. Nituration ionique (assistée par plasma)	27
II.2.2.4. Autres techniques de nituration.....	29
II.2.3. Comparaison des divers procédés	29
II.3. Mécanismes de formation des couches nitrurées	31
II.3.1. Couche de combinaison (couche blanche).....	33
II.3.2. La couche de diffusion.....	34
II.4. Aciers pour nituration	34
II.4.1. Influence des éléments d'alliage.....	34
Chapitre III : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	37
III.1.Choix des matériaux	37
III.2.Cycle de fabrication des pièces	40
III.3. Caractérisation	53
III.3.1.Analyse chimique	53
III.3.2. Préparation des échantillons	53
III.3.3.Examen au microscope optique.....	55
III.3.4.Microdureté Vickers	56
III.3.5.Mesure de rugosité.....	56
III.3.6.Analyse microstructurale par microscope électronique à balayage	57
Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	59
IV.1. Analyse chimique.....	60
IV.2. Caractérisation structurale.....	61
IV.2.1. État du traitement thermique.....	61
IV.2.2 : Traitement de nituration par plasma	62
IV.3.Caractérisation mécanique.....	66
IV.3.1. Profil de microdureté	66
IV.3.2. Analyse par microscope électronique à balayage MEB.....	68

IV.3.3. La Rugosité.....	69
CONCLUSION	70
Références bibliographiques.....	71
ANNEXE.....	73

INTRODUCTION

Les engrenages utilisés en construction mécanique qui sont en aciers moyennement alliés sont soumises à des efforts variables et répétés exigent des propriétés particulières lors de leurs fonctionnements. Les caractéristiques exigées peuvent être, une microstructure sans défauts, bon compromis entre résistance et ductilité au niveau du cœur et une surface caractérisée par une grande résistance à l'usure avec un bas coefficient de frottement. Pour satisfaire toutes exigences techniques, les industries mécaniques investissent pour produire des pignons de haute qualité et sans défauts. Les technologies de traitement thermiques et thermochimiques prometteuses appliquées aux engrenages ce sont les traitements d'amélioration (trempe et revenu) suivis d'un traitement de durcissement superficiel (Trempe par induction, nitruration ou la boruration).

Dans certaine situation, le mauvais choix de la nuance d'acier et son régime de traitement conduit à une perte de matière qui a une incidence directe sur l'économie de l'entreprise. Parmi ces défauts, nous citons comme exemple le phénomène d'oxydation et la décarburation qui constituent un inconvénient majeur sur le reste de la technologie des engrenages. Il est bien connu que le phénomène de la décarburation est d'autant plus prononcé dans le cas des produits traités dans des fours à atmosphère non contrôlée par exemple oxydante. La décarburation entraîne un changement au niveau de la composition chimique au niveau de la surface et les sous couches entraînant systématiquement une ferritisation et une diminution considérable au niveau des caractéristiques de traction (R_e et R_m), et de dureté. Cependant, cela concerne les couches superficielles de la pièce. Les engrenages à denture droite en aciers de construction mécanique XC45, 42CD4, St70 fabriqués au niveau de l'entreprise « *ETRAG El Khroub* » connaissent un problème dans leurs microstructures et leurs propriétés mécaniques.

Dans cette étude, nous nous intéressons à rechercher les causes plausibles entraînant la dégradation de la microstructure et les propriétés mécaniques des engrenages en aciers précités après tout un cycle à savoir une amélioration suivie d'une nitruration ionique. Les traitements thermiques en l'occurrence les recuits et la trempe complète suivie d'un revenu a été réalisée dans des fours à atmosphère non contrôlée. Nous essayons par ailleurs, de voir l'effet des couches en surface et en volume sur la formation des couches superficielles obtenues par nitruration ionique.

Ce travail s'articule sur quatre chapitres :

*Le premier sera consacré à une présentation bibliographique des différents procédés des traitements thermochimiques de diffusion des aciers de construction.

*Le deuxième chapitre évoque les différents traitements thermochimiques de nitruration avec ses différents procédés.

*Dans le troisième chapitre, nous présentons les matériaux étudiés, les traitements effectués et les techniques expérimentales utilisées pour les diverses caractérisations microstructurales et mécaniques.

*Le dernier chapitre traite les résultats expérimentaux et leurs discussions

*On termine par une conclusion générale.

PRESENTATION DE L'ENTRAPRISE TRACTEURS AGRICOLES (EPE ETRAG)

1. HISTORIQUE :

La construction du Complexe Industriel Moteurs Tracteurs par abréviation "**CIMOTRA**" a débuté en **1970**. Le premier tracteur en est sorti le 02 Février 1974 avec la collaboration de deux grandes firmes allemandes : la **DIAG** comme constructeur et KHD comme donneur de licence **DEUTZ**, dans le cadre de la politique de développement industriel en Algérie ainsi que la couverture du marché national en moteurs et tracteurs agricoles. La restructuration organique intervenue en **1982** a donné naissance à 11 entreprises nationales. Parmi lesquelles l'Entreprise publique économique de production du machinisme Agricole l'**EPE/PMA** à laquelle était rattaché le complexe Industriel Moteurs Tracteurs sous une nouvelle appellation **CMT**. En **1997** **CMT** devient entreprise indépendante et autonome avec le statut d'entreprise publique économique, société par action **EPE/Spa**, dont l'objet est la fabrication des moteurs et des tracteurs agricoles.

En 2009 l'EPE **CMT** Spa a fait l'objet d'une scission pour donner naissance à deux sociétés : L'Entreprise Tracteurs Agricoles **EPE ETRAG Spa** dont l'objet est la fabrication et le développement des tracteurs agricoles, et l'Entreprise Moteurs **EPE EMO Spa**.

2. L'Entreprise Tracteurs Agricoles ETRAG

Dénomination : Entreprise Publique Economique des Tracteurs Agricoles (EPE/ETRAG/Spa).

Date de création : 29 juin 2009 suite à la scission de l'EPE CMT.

Capital social : 4 456 080 000 00 DA.

Date de sortie du premier tracteur : 02 février 1974.

Superficie : 33 ha dont 6,2 ha couverts.

Activité : Fabrication de Tracteurs Agricoles.

Capacité de production : 2 500 tracteurs/an.

Chiffres d'affaires : 4 500 MDA en 2013.

Effectif : 1216 Employés.

Objectifs :

- 1) Répondre aux besoins croissants du marché national en Tracteurs Agricoles et en pièces de rechange.
- 2) Contribuer à la mécanisation de l'agriculture nationale.

Domaines d'Activité :

- Fabrication et vente des tracteurs agricoles 68 CV à 100 CV de 2 et 4 WD.
- Sous-traitance dans les activités de fonderie, forge, construction métallique, usinage mécanique de précision, traitement thermique et fabrication d'outillages.
- Services après-vente et rénovation des tracteurs.

3. PARTENARIAT :

ETRAG a conclu un partenariat industriel et commercial avec **AGCO Massey Fergusson**, l'un des leaders mondiaux dans la fabrication du machinisme agricole, par la création en date du 16 Août 2012 d'une joint-venture (société mixte) de droit Algérien, dénommée Algerian Tractors Company par abréviation **ATC Spa** ; les principaux actionnaires sont :

- ① ETRAG 36%
- ① PMAT (Production Métallique Agriculture Tracteur) 15%
- ① AGCO Massey Fergusson 49%

Dans une première étape, 3.500 engins entre tracteurs de 46 (2 et 4 roues motrices), de 82 (2 et 4 roues motrices) et de 150 CV (4 roues motrices), sortiront annuellement de l'usine d'Oued Hamimime où la production devrait atteindre, au bout de 5 années, 5.000 tracteurs/an.

Au titre de ce partenariat obéissant à la règle des 51/49% relative à l'investissement étranger, le management opérationnel de l'usine de l'ETRAG, qui sera réorganisée et modernisée, sera confié à la partie américaine. Cette nouvelle joint-venture s'inscrit dans le cadre de la politique initiée par les pouvoirs publics pour le redressement industriel national et la relance du secteur mécanique. En plus des 700 emplois devant être créés dans le cadre de cette joint-venture, de nouveaux postes de travail seront assurés par les PME versées dans le domaine de la sous-traitance mécanique.

4. Historique de la production :

Le projet de démarrage concernant la production des tracteurs a été lancé en 1972, selon l'évolution de la gamme des produits suivante :

Tracteurs	Type	Période de Fabrication	Nombre de tracteurs produits
	C4006	1974-1983	2420
	C6006	1974-2003	52281
	CT900	1976-1981	205
	CX100	2001-2012	263
	CX370	2003-2010	32
	C6807	1998 jusqu'à ce jour	51814

5. Fiche technique de l'établissement :

Elle est présentée ci-dessous

Dénomination de l'établissement	Entreprise publique économique des tracteurs agricoles (EPE/ETRAG/Spa)
Surface de l'établissement	64 hectares dont 25,5 couverts
Adresse siège social et site de production	Dz-25100 el KHROUB BP 74 Oued Hammimine
Coordonnées	Tél : (031)95 54 14,95 54 15 Fax : (031)955208 e-mail : info@etrag.dz http://www.etrag.dz
Date de création	29 juin 2009 suite à la scission de CMT
Forme juridique	EPE/Spa société par action
Capital social	4.456.080.000 DZD
Chiffre d'affaire	4.503.700.000 DZD(2012)
Registre de commerce	n°09b0068395_25/00
Gamme de produits	68CV C 6807 70CV 4 RM CX 3.70 100CV 4RM CX 100 Marque(s) : CIRTA tracteurs

5. Présentation des différentes Divisions/Directions

1. Secrétariat général (SG) :

Le Secrétariat général est chargé de piloter l'ensemble des structures placées directement sous sa responsabilité, d'orienter et de coordonner toutes les divisions de l'entreprise. Il élabore la stratégie de l'entreprise et la présente aux organes de gestion légaux, met en œuvre des décisions arrêtées par ses organes légaux. Il a aussi pour mission de présenter des comptes rendus sur les résultats obtenus, de contrôler le fonctionnement de l'ensemble des structures de l'entreprise ; préparer les réunions des conseils d'administration et la réunion trimestrielle d'évaluation. Pour la réalisation de ses tâches, le Secrétariat Général est aidé par des assistants et d'un service relations extérieurs. La structure du SG comprend :

- Direction juridique (DJD)
- Département contrôle de gestion (DCG)

– Département Hygiène et sécurité (DHS)

- Section relations extérieurs.

2. Division production (DP) :

C'est la division de base de l'entreprise, Le potentiel industriel d'*ETRAG* est structuré selon une spécialisation technologique interdépendante : - Direction Fabrication Brut Direction Fabrication Mécanique - ATC (centre de profit montage) Ces directions sont soutenues par une direction technique regroupant les activités d'étude et le développement ainsi que les méthodes et la maintenance.

A. Direction fabrication brut (DFB) : Cette direction est chargée de fabriquer des pièces de forge et de tôlerie, d'assurer les besoins des autres processus de fabrication en matière de pièces brutes en fonte et en aluminium suivant des exigences techniques de fonctionnalité et de délais . Elle a également une autre activité qui réside dans la réalisation des programmes de sous-traitance concernant les commandes des clients, émises par la division commerciale. Elle est composée de deux départements et un service :

1/Département Fonderie : Ce département est spécialisé dans la fabrication des pièces en fonte ou en aluminium pour moteurs, tracteurs, machines-outils et divers. La fonderie consiste à :

- ☐ La fabrication manuelle ET automatique des moules en sable ET charbon dans des châssis métalliques
- ☐ La fabrication de noyaux en sable avec du sable et des liants synthétiques
- ☐ La coulée de la fonte liquide à partir de fours électriques et refroidissement
- ☐ Décochage et l'ébarbage de pièces de fonte grises.

A. Atelier de Fusion de la fonte : C'est le lieu de fabrication de la fonte et sa préparation pour la coulée, cet atelier a pour objectif de satisfaire les deux ateliers de production moulage mécanique et moulage à main en matière première (métal liquide) pour la réalisation du programme annuel. - **Moyen de production et installation :** L'atelier fusion de la fonte dispose de trois fours à induction : - Un four de maintien à canal capacité 20T en métal liquide d'une puissance de 500KVA; sa température maximale de coulée est de l'ordre de 1500 °C Deux (02) fours à induction de capacité 3T et 5T d'une puissance respective de 750 KVA et 900 KVA; leurs température maximale de coulée est de l'ordre de 1550°C.

B. Atelier de moulage mécanique et de noyautage : Cet atelier assure la production des pièces brutes en fonte pour le tracteur et le moteur suivant le procédé secousse et pression ainsi que la fabrication des noyaux suivant le procédé croning. Le moulage mécanique comporte une sablerie et trois chantiers de moulage (petites, moyennes et grosses pièces), le noyautage mécanique quant à lui, utilise un procédé de type Croning, il dispose de 12 machines à tirer les noyaux de différentes dimensions.

C. Atelier moulage manuel et parachèvement : Il est destiné à la production des pièces brutes en fonte pour le tracteur, le moteur et la sous-traitance ainsi que la finition et la peinture des pièces brutes coulées. Toutes les pièces sont acheminées par un chariot transporteur vers le parachèvement, le déchargement se fait par pont et potence. Les petites et moyennes pièces sont disposées dans les paniers, les grosses pièces sont disposées sur des chariots.

D. Atelier de l'aluminium : La production et finition des pièces brutes en aluminium pour les moteurs et les tracteurs, par injection et par gravitation est assurée au niveau de cet atelier. **2/Département de la Forge Chaudronnerie:**

- **Atelier de forge :** Le forgeage est la transformation du métal sous l'action de déformation à chaud. Il est particulièrement adapté pour les pièces nécessitant des performances mécaniques élevées.

L'estampage (forgeage) passe par plusieurs opérations successives de déformation pour obtenir la forme demandée qui n'est autre que l'empreinte de la matrice utilisée (au niveau de la section de forge). Par la suite un traitement thermique est réalisé pour obtenir les caractéristiques

métallurgiques exigées. Les principales pièces forgées sont : les vilebrequins, les bielles, les demi-axes, les différents pignons. L'atelier de forgeage se compose de deux sections : - Section Forge Section Normalisation et finition.

- **Atelier de soudure et tôlerie :** La technologie employée dans ce cas est la déformation de la tôle à froid (estampage, emboutissage). L'estampage à froid permet d'obtenir à partir d'une feuille de tôle, un objet dont la forme n'est pas développable où l'on fabrique les pièces d'habillage des produits d'ETRAG notamment les capots, les réservoirs de carburant...etc. La tôlerie a pour mission de fabriquer l'ensemble des pièces en tôle pour le tracteur et les moteurs. Les travaux de tôlerie sont exécutés sur divers emplacements tels que : la presse excentrique, la plieuse, la guillotine et le poinçonnage. La soudure a pour rôle de réaliser des assemblages de pièces finies, en utilisant différents procédés tels que : brasage, pointage, soudage au CO₂. L'atelier Soudure/Tôlerie se compose de deux sections : - Section Tôlerie - Section Soudure. Quant qu'au service « Lancement et suivi Fonderie et Forge », il se compose de deux sections : - Section lancement et suivi fonderie - Section lancement et suivi chaudronnerie.

B. Direction fabrication mécanique (DF) : Cette Direction de Fabrication mécanique est chargée de mettre à la disposition du montage des pièces conformes aux exigences techniques pour la réalisation du programme de production et des commandes des pièces de rechange. Elle se compose de deux

départements et un service qui sont : le département Usinage, le département Usinage en Chaîne et le service Ordonnancement.

1/Département d'usinage: Il est subdivisé en trois ateliers :

- **Atelier de Tournage** : il est basé sur la technologie de tournage (pièces rondes- prismatique), il comprend des tours conventionnels, semi automatiques et numériques partagés sur des sections. Il exécute des opérations de mise en forme de la pièce brute forgée et étirée.

- **Atelier de traitements thermiques** : il est spécialisé dans les traitements thermiques de cémentation, trempe et revenu trempe sous presse et par induction, traitement de surface telle que la galvanisation et la phosphatation.

- **Atelier de Tournage** : il est destiné au taillage des engrenages et rectification : ce dernier a pour but la réalisation des dentures droites, hélicoïdales et spiraux coniques ainsi que le rodage du couple conique, le brochage des pièces cannelés, rasage et rectification dentures ainsi la rectification des diamètres intérieurs, extérieurs et de face.

- **Service ordonnancement** : Il a pour objectif d'assurer le suivi des ordres de fabrication selon un délai projeté.

2/Département Usinage en chaîne:

- **a. Atelier usinage en chaîne** : Il regroupe des lignes d'usinage spécialisées chacune dans l'ensemble des opérations d'usinage d'une pièce. On y réalise : les blocs moteurs, les bielles, les cylindres moteurs, les culasses, les vilebrequins et les arbres à came.

- **b. Atelier usinage mixte** : Ce dernier est spécialisé dans la fabrication des grosses et petites pièces, il est divisé en sept sections : Section grand perçage, section petit perçage, chaîne cinématique, section alésage, section grand fraisage, section petit fraisage, section fourchette.

C. ATC / ALGERIAN TRACTORS COMPANY (Centre de profit montage) En 2012, une nouvelle société fut créée : *ATC Spa ETRAG* a conclu un partenariat industriel et commercial avec *AGCO Massey Fergusson*, l'un des leaders mondiaux dans la fabrication du machinisme agricole, par la création en date du 16 Août 2012 d'une joint-venture (société mixte) de droit Algérien, dénommée Algerian Tractors Company par abréviation *ATC Spa*. Actuellement, la principale activité de ATC est le montage du tracteur C6807 dont les pièces sont livrées par ETRAG, elle a pour objectif d'atteindre une production de 5000 tracteurs par an. Le département production : constitué de 3 principaux ateliers et qui sont l', Atelier transmission, Atelier peinture. Le département technique qui contient trois services Service méthodes, Service lancement et suivi, Service maintenance usinage.

3/Division technique (DT) : Elle comprend les directions suivantes : - Direction technique (DTK) - Direction maintenance (DM) - Direction investissement (DI)

4/Division planification et systèmes d'information (DPSI) : Elle comprend deux directions :

- Direction Systèmes d'Information (DSI)
- Direction Planification Matière (DPM)

5/Division commerciale (DC) : La division commerciale comprend deux directions :

- Direction approvisionnement (DAP)
- Département commercial (vente)

6/Division administration et finances (DAF) : Cette division comporte deux directions :

- Directions des Finances et Comptabilités (DFC)
- Direction des Ressources Humaines (DRH)
- Direction Administration Générale et Protection de l'Environnement (DAGE)

CHAPITRE I

I.TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES DES ACIERS

I.1. Introduction

Les traitements thermochimiques signifient qu'on modifie la composition chimique en surface et en sous couches par le mécanisme diffusionnel de l'acier en élément (par exemple, en carbone, azote, aluminium, chrome, etc.). La diffusion se fait à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée. Un traitement thermochimique consiste à chauffer une pièce jusqu'à la température donnée dans un milieu solide, gazeux ou liquide qui dégage facilement l'élément de diffusion à l'état atomique, à maintenir à cette température, puis à la refroidir. A la différence d'un traitement thermique, un traitement thermochimique change non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier dans de plus larges limites ses propriétés. Un traitement thermochimique compte trois stades élémentaires :

- 3) processus dont le siège est le milieu extérieur et qui assurent le dégagement de l'élément diffusant à l'état atomique ;
- contact des atomes d'élément diffusant avec la surface de la pièce en acier et formation des liaisons chimiques avec les atomes de fer (absorption) ;
- pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est-à-dire diffusion.

La vitesse de diffusion des atomes de l'élément saturant qui s'insèrent dans le réseau de fer n'est pas la même et dépend de la composition et de la structure des phases en formation. La saturation en carbone ou en azote, qui forment avec le fer des solutions solides d'insertion, rend la diffusion plus rapide que la saturation en métaux qui forment des solutions solides de substitution.

Il en résulte que le processus de saturation en métaux par diffusion (métallisation de diffusion) est mené à des températures plus élevées et dure plus que dans le cas d'une saturation en azote, et surtout en carbone, alors que l'épaisseur de la couche obtenue est plus petite.

La profondeur de pénétration est évoluée en fonction de la température et de la durée de saturation, ainsi que de la concentration de l'élément diffusant à la surface (**Figure I.1**).

L'épaisseur de la couche diffusée est en fonction de la durée de diffusion t à la température considérée (**Figure I.1, a**). Par conséquent, avec le temps la vitesse de l'augmentation de l'épaisseur de la couche ne cesse de diminuer.

L'épaisseur de la couche diffusée est d'autant plus grande que la concentration de l'élément diffusant à la surface du métal est plus forte (**Figure I.1, b**).

La concentration de l'élément diffusant à la surface dépend de l'activité du milieu ambiant assurant l'apport de cet élément à la surface, de la vitesse des processus de diffusion qui régissent la

migration de ces atomes en profondeur, de la composition du métal traité, de la composition et de la structure des phases en formation.

Dans le cas du diagramme d'équilibre au domaine fermé de la phase γ (Fe-Cr ; Fe-Si, etc.), la diffusion se produit d'abord dans la phase γ , et après avoir atteint à la surface la limite de solubilité, on observe la recristallisation de phase $\gamma \rightarrow \alpha$.

Lorsque le fer est saturé en élément qui élargit le domaine de la phase γ (Fe-Mn ; -Ni), la diffusion (à la température t_2) progresse d'abord dans la phase α , puis, une fois que la limite de sa solubilité est atteinte, il se forme la phase γ (Fig.I.2).

A l'interphase des phases α et γ , il s'établit un potentiel de concentration et la microstructure (après refroidissement) acquiert une frontière de diffusion (Fig. I.2, b ; t_2 et t_3). Il importe que les couches biphasées ($\alpha + \gamma$) ne puissent se former à la température de diffusion et apparaissent seulement sous l'effet des transformations pendant le refroidissement. La saturation d'un acier allié à la température de diffusion peut faire naître des couches à phases multiples.

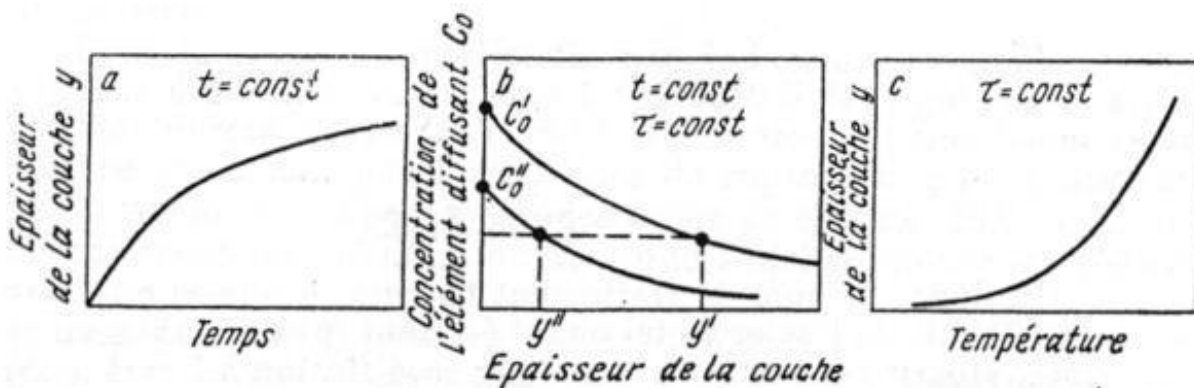


Figure.I.1 : Epaisseur de la couche de diffusion :

- a)** en fonction de la durée de saturation ; **b)** des concentrations C'_0 et C''_0 à la surface
- c)** de la température [1].

En déterminant la profondeur de la couche de diffusion obtenue par saturation de l'acier en métaux ou métalloïdes, on indique généralement non pas la profondeur totale de la couche à composition modifiée, mais seulement la profondeur jusqu' à l'interphase entre α et γ [1].

I.2. LES TYPES DE TRAITEMENT THERMOCHIMIQUES

I.2.1.CÉMENTATION

La cémentation est un traitement thermochimique d'enrichissement en carbone de la surface d'un matériau. Réalisée en phase austénitique (généralement entre 900 à 980°C) [8].

On introduit du carbone, par diffusion, sur une épaisseur de quelques dixièmes de mm dans des pièces qui sont ensuite trempées. Ce traitement leur confère une dureté superficielle supérieure à 60 HRC [2].

Les pièces cémentées-trempées ont une bonne résistance à l'usure en frottement et en roulement, une bonne tenue aux chocs et un bon comportement en fatigue. Ce traitement s'applique aux aciers à bas carbone ($0,05 \% < C < 0,25 \%$) non alliés ou faiblement alliés. Pour améliorer la tenue en fatigue des pièces il suffit de traiter 0,2 à 0,6 mm. Pour des engrenages, on recherche des épaisseurs cémentées importantes (0,6 à plus de 1,5 mm selon le module), de manière à éviter les détériorations dues au contact avec les autres engrenages (il faut que la cémentation soit plus profonde que la zone affectée par le cisaillement de Hertz) [2].

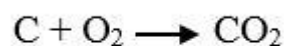
a. Procédés de cémentation

☐ **Cémentation en caisse**

Dans ce procédé (largement supplanté par la cémentation gazeuse et la cémentation basse pression), les pièces à cémenter sont entourées d'un ciment granuleux (0,5 mm) formé de poudre de charbon de bois (60 %) et de carbonate de baryum (40 %). Le tout est placé dans une caisse en acier et la caisse dans un four porté à la température d'austénitisation des pièces.

Dans la caisse ont lieu les réactions suivantes :

(1)

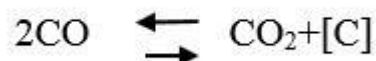


(2)



Ces réactions se produisent au sein du ciment (milieu de cémentation), le monoxyde est en équilibre avec le carbone [C] de l'austénite :

(3)



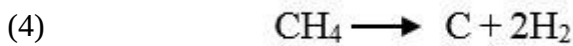
La réaction (3) amène un excédent de carbone superficiel qui pénètre dans le métal par diffusion. La montée en température des caisses de cémentation nécessite plusieurs heures, la vitesse de cémentation est de l'ordre de 0,1 mm/h pour des épaisseurs supérieures à 1 mm. La cémentation en caisse est une opération aisée à réaliser mais longue et lorsque l'on cherche à obtenir des épaisseurs importantes on surcarburé la surface en formant une couche hypereutectoïde. [2].

☐ **Cémentation en bains de sels**

Ce procédé, différent de la *cyanuration* (carbonitruration en bain de sel), utilise des bains de sels constitués de chlorures et de carbonates de sodium additionnés de cyanures de sodium et de potassium et de catalyseurs. Ce procédé est rapide (0,5 mm de profondeur cémentée en une heure) mais est contré par les problèmes de sécurité (cyanures) et d'environnement [2].

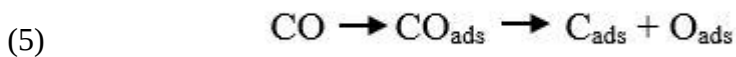
□ **Cémentation gazeuse**

Le monoxyde de carbone, CO, est un élément cémentant (3) présent dans les atmosphères de traitement thermique de type endothermique. Toutefois ces atmosphères n'ont pas la capacité de fournir la quantité de carbone nécessaire (pour cémenter 1 m² sur 0,2 mm d'épaisseur, il faut environ une mole de carbone soit 1 g). On devrait faire appel à des volumes très importants de CO. La solution consiste à ajouter un gaz à fort pouvoir cémentant comme le méthane, CH₄. Celui-ci se décompose selon :



Compte tenu de la composition de l'atmosphère endothermique, le carbone donne naissance à du monoxyde, CO, et l'atmosphère contient toujours CO et H₂, mais elle a maintenant la capacité de fournir du carbone à l'acier.

On constate qu'une atmosphère qui ne contient que du CO ne donne pas des épaisseurs voulus qu'avec la présence d'hydrogène. Ceci correspond au fait que le transfert du carbone dans le solide commence par une étape d'adsorption du monoxyde à la surface :



L'adsorption est en fait une chimisorption (l'énergie mise en jeu est suffisamment importante pour casser la molécule de CO). L'obtention d'une vitesse de transfert convenable nécessite, dans une deuxième étape, la désorption de l'oxygène (qui pourrait aussi provoquer des phénomènes d'oxydation interne superficielle), c'est le rôle de l'hydrogène :



On trouve que la vitesse de carburation augmente avec le produit PCO.PH₂ et que la vitesse maximale est atteinte pour $P_{\text{CO}} = P_{\text{H}}$. En conclusion, l'addition de méthane (ou de tout autre hydrocarbure convenable, en particulier l'instillation de liquide dans un gaz porteur) est un moyen efficace pour :

- ajuster le potentiel carbone,

- donner le pouvoir carburant à l'atmosphère, c'est à dire la rendre capable de débiter la quantité de carbone nécessaire.

Lorsque le transfert du carbone est correct, le profil du carbone en profondeur obéit aux lois de diffusion (équations de Fick). Pour une diffusion à partir d'une atmosphère à teneur constante, CO, de l'élément diffusant, dans le domaine austénitique, le profil théorique a l'allure suivante :

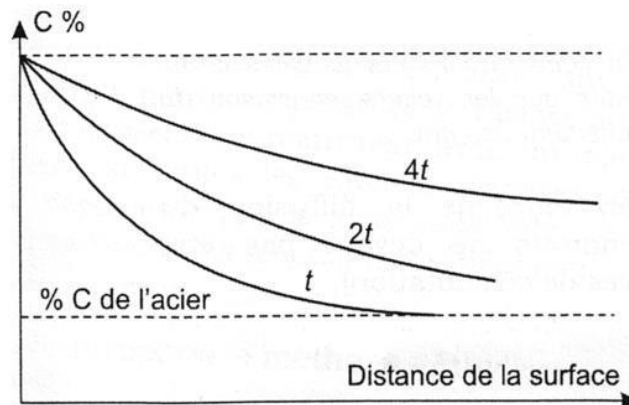


Figure I.2. Diffusion à partir d'i atmosphère à teneur constante [2].

Lorsque l'acier est allié il faut viser un potentiel de carbone car certains éléments carburigènes tendent à fixer le carbone sous forme de carbures (chrome, manganèse, molybdène) et l'on risque de provoquer une surcarburation. Le nickel et le silicium ont un effet inverse. On vise généralement la composition eutectoïde en surface.

En conditions industrielles, plutôt que de procéder à l'analyse du profil de répartition du carbone, on préfère utiliser une profondeur conventionnelle de cémentation plus facilement accessible. C'est la profondeur pour laquelle on trouve, après trempe, une dureté Vickers supérieure à 550 HV.

On cimente habituellement entre 880 et 960 °C afin d'éviter le grossissement du grain. On peut toutefois opérer jusqu'à près de 1100°C à condition d'utiliser des aciers à grain stabilisé.

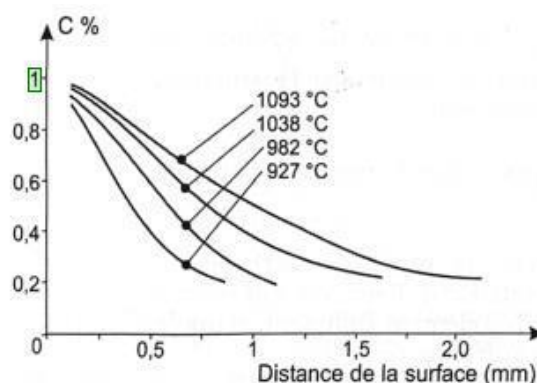


Figure.I.3 : Profondeur cémentée en deux heures pour différentes températures de cémentation (acier 16MnCr5) [2].

Par cuivrage on empêche la diffusion du carbone aux endroits ne devant pas être cémentés (réserves de cémentation) [2].

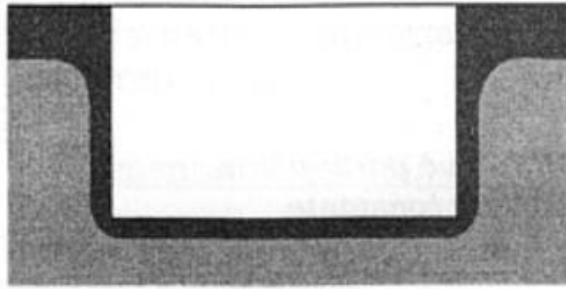


Figure.I.4 : En cémentation gazeuse, les creux sont moins cémentés que les reliefs, en raison du moins bon renouvellement des gaz [2].

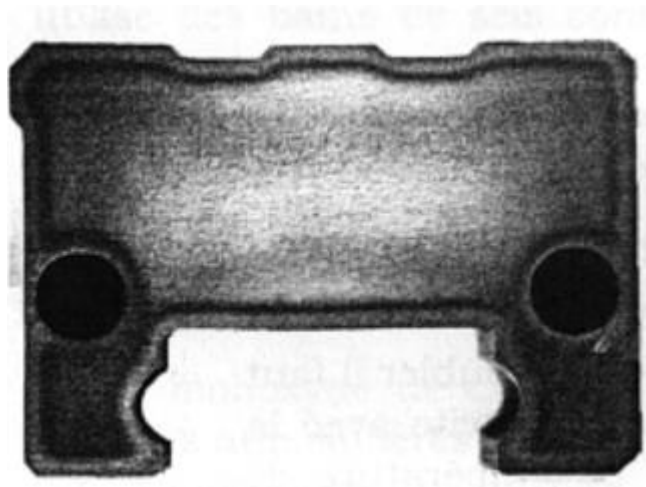


Figure.I.5 : Exemple de cémentation gazeuse : chariot d'un système de guidage linéaire à billes [2].

b. Traitements thermiques après cémentation

Il faut réaliser :

- une structure martensitique dans la couche cémentée,
- une structure à cœur à la fois résiliente et suffisamment résistante pour transmettre les contraintes de service : une structure bainitique constitue un bon compromis entre dureté et résilience.

On distingue :

- **la trempe directe** : on trempe directement après cémentation. Comme la température du point AC3 diminue lorsqu'on augmente la teneur en carbone, il est intéressant de laisser chuter la température des pièces jusqu'à une température superficielle légèrement supérieure à AC3. Cette opération suppose qu'on a employé des aciers stabilisés dont le grain n'a pas grossi pendant la cémentation.

- **la trempe après refroidissement intermédiaire complet** : elle ne s'impose que lorsque l'installation ne permet pas la trempe directe après cémentation ou lorsque l'on doit procéder à un usinage avant trempe. : Il faut réausténitiser la pièce mais comme on ne chauffe pas le cœur au-dessus de Ac3 (puisqu'il contient moins de carbone que la surface), le cycle thermique ne permet pas de régénérer le grain du métal et l'on risque d'obtenir des déformations des pièces.

- **la double trempe** : elle permet de traiter le cœur des pièces (avec régénération du grain), puis la surface. Il y a également un risque de déformation des pièces.

Le revenu après trempe est plutôt un revenu de détente (entre 160 et 200 °C) destiné à réduire contraintes thermiques résiduelles [2].

c. Aciers de cémentation et défauts possibles

On utilise généralement des aciers dont la teneur en carbone est inférieure ou égale à 0,2%. On cimente des aciers non alliés et des aciers contenant des éléments d'addition, parmi ceux-ci on peut distinguer :

- Les aciers au nickel-chrome contenant jusqu'à 3 % de nickel, selon la massivité des pièces et 1 % de chrome (16NiCr6). On ajoute un peu de molybdène dans les aciers à hautes caractéristiques (18NiCrMo6, 20NiCrMo2).

Les aciers au chrome-molybdène qui contiennent de l'ordre de 1% de chrome et 0,25 à 0,3 % de molybdène (18CrMo4).

- Les aciers au manganèse-chrome (20MnCr5).

On doit vérifier que les pièces cémentées ne contiennent pas de défauts inhérents au procédé. Ces défauts et leurs causes sont parfaitement répertoriés et relèvent de la logique et du bon sens, par exemple :

- Austénite résiduelle : température de trempe trop élevée, surcarburation...

- Dureté superficielle trop faible : température d'austénitisation trop faible, sévérité insuffisante du milieu de trempe, atmosphère mal réglée...

- Points doux : suies, pollution superficielle...

- Cémentite en réseau : sursaturation de l'austénite, potentiel carbone trop élevé...

- Décarburation superficielle et/ou oxydation superficielle : atmosphère oxydante (incident dans le four), mauvais réglage du potentiel carbone... [2]

I.2.2. Carbonitruration

C'est un traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone et en azote. L'azote et 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 uniquement 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 fait augmenter le domaine de la solubilité du carbone dans l'austénite par abaissement des points de transformation $\square\square\square$ en faisant abaisser le point Ms tout en favorisant la stabilité de l'austénite de la couche carbonitrurée (par rapport à une couche cémentée à teneur en carbone équivalente). Ceci aura pour effet l'amélioration de la trempabilité ; cependant, il en découle un inconvénient majeur qui est l'obtention de l'austénite résiduelle après trempe, si la teneur en azote de la couche est trop élevée ou si les conditions de trempe sont défavorables.

On peut considérer que la carbonituration est un traitement de cémentation activé par l'azote. De ces considérations, on peut noter un certain nombre d'avantages de la carbonituration par rapport à la cémentation :

- une résistance à l'usure supérieure ;
- une meilleure résistance à la fatigue que la cémentation ;
- une réduction du temps de traitement ;
- un abaissement de la température de traitement (780-875) °C ;
- une 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).

De ces avantages il en ressort des intérêts technico-économiques évidents : moindre coût grâce à la réduction des temps de traitement, basses températures, possibilité d'utiliser des nuances d'aciers non alliés et meilleure maîtrise des déformations grâce aux conditions de traitement moins sévères au chauffage et au refroidissement.

Un autre avantage de taille est l'obtention de couches durcies convenablement en mettant en œuvre des aciers non alliés, là où les mêmes caractéristiques ne pourraient être atteintes en cémentation qu'en ayant recours à des aciers alliés plus onéreux (industrie automobile).

La carbonituration se limite à l'obtention de couches peu profondes, inférieures à 0,6 mm.

En effet, le maintien d'une teneur en azote actif dans le milieu carburant, durant un temps très long, conduirait à une teneur en azote trop élevée en surface et par conséquent à des difficultés de durcissement par une trop grande rétention d'austénite. Par ailleurs, l'influence de l'azote sur la cinétique de traitement est de moins en moins marquée au fur et à mesure que le temps de traitement augmente. La plupart des

aciers de cémentation peuvent être carbonitrurés, ainsi que les aciers à plus haute teneur en carbone (aciers au chrome-molybdène-vanadium). [8]

a. Procédé de carbonitruration :

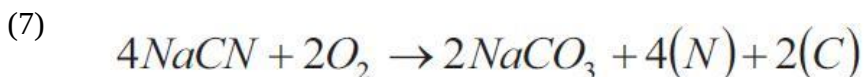
□ Carbonitruration à basse température (600-700 °C) :

Théoriquement, elle peut être réalisée entre 590°C, température du palier de l'eutectoïde Fe-N, et la température Ac1 de l'acier, c'est-à-dire en pratique entre 600 et 710 °C. Aux températures inférieures à Ac1, le cœur de la pièce ne subit pas la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, tandis que, sous une couche de combinaison d'une dizaine de μm , la couche enrichie en carbone et en azote se transforme en austénite grâce à l'azote.

Le durcissement est obtenu par trempe à l'huile et, depuis la surface vers le cœur la structure comprend donc une couche de combinaison une couche de structure martensitique avec de l'austénite résiduelle et la structure initiale de la pièce modifiée par l'effet de revenu correspondant aux conditions (T° et durée) dans lesquelles a été réalisé la carbonitruration. Celle-ci peut être effectuée en bain de sel ou en phase gazeuse. En raison de la basse température du traitement, la cinétique de formation de la couche superficielle est lente et le procédé est peu employé industriellement, bien qu'il semble faire l'objet d'un certain regain d'intérêt [9].

□ Carbonitruration (750- 880 °C)

Les agents de carbonitruration sont liquides ou gazeux les éléments liquides sont des sels à base de cyanure, cyanate alcalins, carbonates et chlorures alcalins ; les carbonates et les chlorures permettent d'abaisser le point de fusion et les chlorures activent le bain ; les réactions qui se produisent peuvent se résumer ainsi :



Les ciments gazeux sont des mélanges de gaz contenant du carbone (hydrocarbure...) et de gaz contenant de l'azote (ammoniac), par réaction mutuelle ces gaz forment du CN et du CNH qui sont les agents à la fois carburants et nitrurant. Les atomes d'azote, comme les atomes de carbone, entrent en solution solide d'insertion dans l'austénite. L'azote accélère la diffusion du carbone, c'est ainsi que la carbonitruration des aciers mi-durs à 850 °C progresse deux fois plus vite que la cémentation des mêmes aciers par le carbone seul, l'azote a donc un rôle important d'accélération du processus d'enrichissement [19]. La Figure 13 représente la structure de la surface et du cœur d'un acier carbonitruré à 870°C [9].

b. Structures et traitements thermiques

Après diffusion du carbone et de l'azote en surface, la pièce ainsi carbonitrurée subit un traitement thermique destiné à lui conférer ses propriétés d'emploi. Il s'agit généralement d'un durcissement par trempe, suivi d'un revenu de détensionnement à des températures comprises le plus

souvent entre (150-200) °C. Ces traitements sont précédés de recuits permettant l'usinage facile avant le durcissement. Enfin, quelquefois, des traitements cryogéniques sont réalisés après la trempe en vue de réduire le taux d'austénite résiduelle et d'améliorer les caractéristiques d'emploi.

Afin de minimiser les déformations et acquérir une meilleure ténacité après traitement de carbonitruration on peut préconiser une trempe directe par étape dans de l'huile chauffée à 180 °C, suivie d'une auto revenue avec maintien dans cette huile au lieu d'une trempe directe à l'huile (20-80) °C suivie d'un revenu de détente à (160-180) °C.

c. Influence de la composition chimique sur la structure de la couche carbonitrurée

Les conditions de traitement habituellement réalisées en carbonitruration favorisent rarement l'apparition de carbonitrides (épaisseurs faibles). Les paramètres importants contrôlant l'apparition des carbures sont donc :

- la teneur en carbone introduite lors de la carbonitruration -la température de maintien avant la trempe ;
- les éléments d'alliage de l'acier qui agissent sur la position de AC_m .

Il est noté que la présence de l'austénite résiduelle peut être reliée au point M_s de la nuance d'acier. La température correspondante est souvent appréciée grâce à des expressions empiriques qui mettent en évidence l'influence des divers éléments d'alliage. Parmi les plus utilisées, on peut citer celles développées par

ANDREWS : $M_s = 539 - 423 C\% - 30,4 Mn\% - 17,7 Ni\% - 12,1 Cr\% - 7,5 Mo\%$ ou HAYNES [80] : $M_s = 561 - 474 C\% - 33 Mn\% - 17 Ni\% - 17 Cr\% - 21 Mo\%$. Toutefois, ces dernières ne sont valables que pour des teneurs maximales en carbone de 0,60 %. Au-delà de cette limite, elles doivent être corrigées, comme il a été proposé par HAYNES, pour permettre ainsi de constater que l'action des éléments d'alliage reste faible devant l'influence du carbone introduit pendant le traitement de carbonitruration. Quant à l'effet de l'azote, il est semblable à celui du carbone comme le montre LESAGE pour l'évaluation de M_s , dans le cas d'un enrichissement en carbone et en azote ; le terme (-330 N%) doit être ajouté à l'expression de HAYNES.

Le mécanisme de formation des porosités n'est pas clairement établi. Le rôle des éléments d'alliage semble cependant important, puisqu'on n'observe ce phénomène avec les aciers moyennement alliés que pour des teneurs importantes en azote dans la couche traitée (1 % N pour un acier 25CrMo4 traité à 880 °C). En revanche, pour des aciers au carbone ou de décolletage, le seuil d'apparition est notablement abaissé ((0,4- 0,5) % N et 0,75 % C pour des aciers XC et 12MnS4). Il semble, par ailleurs, que les inclusions de sulfures favorisent la présence de porosités.

Quant à la dureté des couches carbonitrurées, elle dépend de la teneur superficielle en carbone et en azote, des conditions de refroidissement, des éléments d'alliage de l'acier (trempabilité), de la proportion d'austénite résiduelle et des contraintes résiduelles induites dans la couche [8] .

d. Aciers de carbonitruration

La plus part des aciers de cémentation peuvent être carbonitrurés ainsi que des aciers à plus haute teneur en carbone, par exemple à titre indicatif :

- Aciers au carbone XC10 jusqu'à XC48.
- Aciers au manganèse, y compris les aciers de décolage jusqu'au 35 MF6.
- Aciers au chrome 45C2-38C4.
- Aciers au manganèse – chrome 16MC5 à 27MC5.
- Aciers au chrome – molybdène jusqu'à 35 CD4.
- Aciers au nickel – chrome jusqu'au 30NC 11.
- Aciers au nickel – chrome – molybdène 20 NCD2 au 16NCD13.
- Aciers au chrome – molybdène – vanadium Z8CDV5.

De nombreux aciers alliés avec une gamme de carbone de 0,30 à 0,50% peuvent être carbonitrurés à des profondeurs jusqu'à 0,3 mm. Si les traitements de carbonitruration sont réalisables sur les aciers à outils contenant jusqu'à 2% de carbone avec un certain avantage sur la résistance à l'usure, il n'est pas possible d'éviter la formation de l'austénite résiduelle sur les surfaces des pièces [9].

I.2.3.MÉTALLISATION PAR CEMENTATION

La saturation superficielle de l'acier en aluminium, chrome, bore et autres éléments s'appelle métallisation par cémentation. La pièce dont la surface est saturée en ces éléments acquiert plusieurs propriétés précieuses, dont la tenue à chaud et à l'usure accrue, la résistance à la corrosion et la dureté. La saturation superficielle de l'acier en métaux, ainsi qu'en éléments comme le silicium, s'effectue en plaçant les pièces dans des ciments pulvérulents appropriés (généralement ferro-alliages et 0,5-5 % NH_4Cl) ou en les immergeant dans du métal fondu si la température de fusion de l'élément diffusant est peu élevée (zinc, aluminium, par exemple) ou bien en assurant la saturation à partir d'une atmosphère gazeuse. A cet effet, on emploie des chlorures volatils de métaux (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4 , etc.) obtenus par action du chlore (ou du chlorure d'hydrogène) sur les métaux ou leurs alliages avec le fer à des températures élevées. Les chlorures se dissocient à la surface du fer et les métaux qui se dégagent à l'état atomique diffusent dans le fer [1].

a. Boruration :

La boruration est un traitement thermochimique de durcissement superficiel ; elle peut être pratiquée selon divers procédés :

- En milieu gazeux : les gaz apportant le bore sont des halogénures de bore

- En milieu liquide : soit en présence des sels fondus avec électrolyse, le bain étant constitué de borax ; soit en présence de sels fondus sans électrolyse, les sels étant alors constitués de mélanges de carbures de bore et de chlorures ou de chlorures et de fluorures; soit une solution liquide de borax.
- En milieu solide : actuellement, la seule pratiquée industriellement. Elle s'effectue à une température de l'ordre de 900 °C. Le ciment est constitué par de la poudre ou des granules à base de carbure de bore avec addition d'un fluoroborate jouant le rôle d'activateur. L'épaisseur de la zone durcie est fonction de la durée de traitement et de la température.

La boruration peut être pratiquée également sur des métaux non ferreux tels que le nickel, le cobalt, le titane, le niobium. Les duretés obtenues sur les aciers après application de ce traitement sont de l'ordre de 2000 HV [4].

b. Chromisation

La chromisation est un enrichissement superficiel d'un acier par diffusion de chrome pratiqué à haute température.

La chromisation apporte des solutions à de nombreux problèmes posés par la corrosion ou l'usure sous corrosion de pièces métalliques ; et elle peut être appliquée à des matériaux divers à base de fer, de nickel ou de molybdène. La chromisation s'effectue par diffusion de chrome à une température de l'ordre de 1000 °C en atmosphères de traitement réductrices halogénées à l'équilibre.

Après chaque opération de chromisation, l'activité des charges de traitement est entretenue par des additions d'éléments d'apport et d'halogénures transporteurs.

Les caractéristiques de la zone enrichie dépendent de la composition chimique de l'acier de base utilisé et tout particulièrement de sa teneur en carbone.

Après chromisation, un traitement thermique de régénération des caractéristiques mécaniques de la pièce s'avère nécessaire. Celui-ci peut consister en une normalisation ou en un traitement de trempe et revenu selon la nuance de l'acier et l'emploi envisagé [4].

d. NITRURATION

La nitruration est un traitement thermochimique permettant d'enrichir superficiellement les alliages ferreux en azote atomique. On forme alors des *nitrures* par combinaison des atomes d'azote avec les atomes de fer ainsi qu'avec les éléments d'addition des aciers (Cr, Al, Ti, V, Mo). Ces nitrures provoquent le blocage des dislocations ainsi qu'un léger gonflement induisant de fortes contraintes superficielles de compression. Cette mise en compression des couches superficielles induit une très grande dureté, allant jusqu'à 1200 HV. Plus de détail sera entamé dans le deuxième chapitre [1].

CHAPITRE II

II. LA NITRURATION

II.1. Introduction

La nitruration est un traitement thermochimique destiné à améliorer les propriétés mécaniques (résistance à la fatigue, dureté, tenue à l'usure) ou chimiques (tenue à la corrosion) des matériaux.

Tous les matériaux pouvant former des nitrures sont susceptibles d'être nitrurés. Même si quelques applications intéressantes ont été décrites pour le titane et l'aluminium, les nitrurations s'appliquent presque exclusivement aux aciers et fontes.

Comparée aux autres traitements thermochimiques de durcissement, la nitruration présente l'avantage de ne modifier que très faiblement les géométries et l'état de surface des pièces traitées. La nitruration thermique est une technique très employée industriellement, mais elle présente des limitations qui sont la faible vitesse (>100 heures de traitement) et la haute température de traitement (550 - 600 °C). De nouvelles techniques ont été développées pour dépasser ces limitations, à savoir la nitruration ionique (par plasma), nitruration basse pression. [7]

II.2. Principe et procédés de la nitruration

II.2.1. Principe

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]

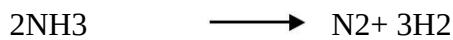
II.2.2. Procédés de la nitruration

Dans le domaine industriel, plusieurs procédés de nitruration sont utilisés :

II.2.2.1. La nitruration gazeuse

Du gaz ammoniac est injecté dans un four étanche à moufle métallique (four pot ou four cloche) doté d'un brassage parfait de l'atmosphère et d'une précision élevée de la température. L'atmosphère est

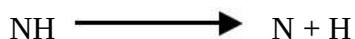
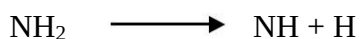
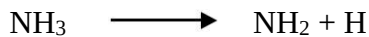
en légère surpression et le débit du gaz dans le four à une température donnée et pour une charge de pièces déterminée, fixe le taux de dissociation de l'ammoniac selon la réaction :



Seule la fraction de gaz non dissociée aura une action nitrurant selon le mécanisme suivant :

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

N et H :



Une partie d'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 d'azote dans le matériau dépend de la concentration locale en azote atomique.

La phase α étant très rapidement saturée en azote, les phases γ' (Fe_4N) ou ε (Fe_{2-3}N) apparaissent par nucléations localisées. Ces phases croissent tandis que l'azote continue à diffuser dans la structure de l'acier. La croissance de γ' et ε conduit à la formation de la couche de combinaison alors que celle-ci alimente la zone de diffusion.

La réputation de la nitruration gazeuse à l'ammoniac est de produire des couches de combinaison (couche blanche) dont l'épaisseur et la structure cristallographique sont mal maîtrisées, nécessitent leur élimination par rectification.

Cette absence de contrôle de la couche blanche est réelle si on ne maîtrise pas les paramètres de pilotage du traitement (température et potentiel nitrurant). Il est possible, dans une certaine mesure, de maîtriser la réalisation des couches blanches et en particulier de former des couches stratifiées avec ε en surface et γ' en sous-couche. Cette configuration est moins sensible aux phénomènes de fragilité des couches biphasées.

Pour la couche de diffusion, elle dépend essentiellement du temps, de la température et du potentiel azote. Sur les aciers à outils pour travail à chaud, la profondeur nitrurée ne doit pas dépasser 300 μm , afin de ne pas favoriser la fissuration superficielle. Sur les aciers de construction, elle est choisie en fonction des sollicitations et des nécessités éventuelles de rectification après traitement [7].

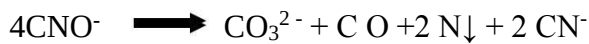
II.2.2.2. Nitruration en bain de sels

Les bains de sels pour nitrocarburation sont composés principalement de cyanate et carbonate de métaux alcalins et de petite quantité de sulfure.

La composition chimique du bain est maintenue dans les limites suivantes : Cyanate : $36 \pm 2 \%$; carbonate : $19 \pm 2 \%$; cyanide : environ 0.8 %.

L'élément nitrurant est le cyanate CNO qui se décompose suivant une double réaction de dismutation et d'oxydation.

☐ Réaction de dismutation



☐ Réaction d'oxydation



L'oxygène est apporté à la surface par l'air ambiant et par l'air comprimé introduit dans les bains. Il s'y ajoute une réaction de carburation par le monoxyde de carbone produit. $\text{C O} \longrightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{C}$

L'azote et le carbone à l'état naissant (atomique et actif) diffusent dans l'acier à travers la surface. L'épuisement des cyanates abouti à la formation de carbonates qu'il faut reconvertir en cyanates par régénération à l'aide d'un sel spécial dont la nature exacte constitue le savoir-faire des procédés commercialisés sous les marques : SURSLF et TENIFER TF 1.

Le principe est d'utiliser un composé du type amine, comme l'urée, qui donnerait la réaction :



Cette réaction doit être contrôlée de façon à limiter les teneurs en vapeur d'eau et en ammoniac dans le bain.

La vapeur d'eau conduit à une augmentation du pouvoir oxydant du bain avec une tendance à former des oxydes avec les sels, entraînant une pollution du bain et une mauvaise qualité des couches (porosité importante).

La nitruration en bain de sel comparativement à celle de la nitruration ionique, provoque à la surface en contact avec des sels la formation de pores, bien que leurs présence n'est pas nécessairement un inconvénient car elles favorisent la sustentions du film d'huile en frottement lubrifié et facilitent le rodage, toutefois une proportion trop importante de porosités réduit la résistance à l'usure et rend la couche fragile. Cependant, le principal problème pour cette technique est le traitement des déchets et des effluents, et par conséquent elle entraîne une discontinuité de la couche nitrurée et une dégradation des propriétés de corrosion [5].

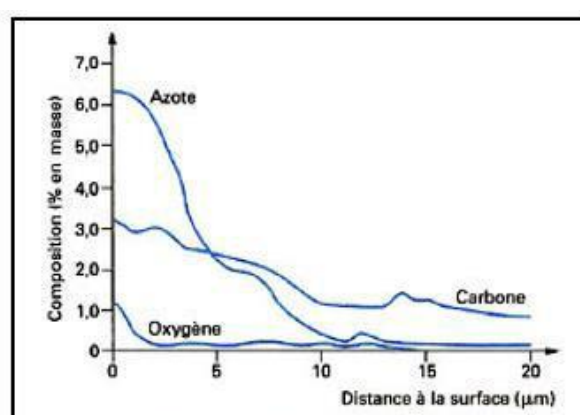


Figure.II.1 : Evolution des teneurs en azote, carbone et oxygène dans la couche de combinaison après nitrocarburation en bain de sels [6].

II.2.2.3. Nitruration ionique (assistée par plasma)

Lorsqu' une différence de potentiel est imposée entre une anode et une cathode dans une atmosphère gazeuse sous faible pression, il se produit des collisions ionisantes électron - molécule et, au-delà d'un certain potentiel, un régime de décharge luminescente s'établit avec production d'espèces ionisées au voisinage de la cathode. Les conditions d'établissement de cette décharge dépendent de la nature des gaz et de la pression dans l'enceinte.

Le plasma est constitué d'espèces : ions, neutres excités...dérivés du ou des gaz introduits ; il constitue un milieu actif fortement agité et doté d'une énergie importante. Il a pour effet de :

- 4) Créer à la surface des pièces un effet thermique par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie thermique lors de leurs collisions à la surface des pièces ; selon l'énergie employée pour produire le plasma, celui-ci sera plus au moins chaud et pourra suffire à obtenir une température convenable pour le traitement à effectuer ;
- 5) décaper par pulvérisation cathodique en arrachant, grâce à l'énergie cinétique des ions, des atomes superficiels du métal ; l'effet de ce décapage est de provoquer un nettoyage

Des surfaces en les amenant à un état physiquement propre, notamment en éliminant la couche de passivation, et les rendent ainsi très réactives ;

- générer des espèces réactives vis-à-vis de la surface à traiter. À l'approche de la cathode les ions vont être fortement accélérés en raison de l'intensité du champ électrique à cet endroit. Les ions et les éléments neutres rapides vont ainsi bombarder la cathode et la chauffer. Ce bombardement provoque une émission électronique secondaire ainsi que la pulvérisation à la surface.

Dans la pratique, pour réaliser un plasma dans un four, on utilise l'enceinte de ce dernier comme un tube à décharge dans lequel la cathode est le support des pièces à traiter et l'anode les parois du four. Pour obtenir la décharge luminescente, il est nécessaire d'installer, par pompage, une pression réduite dont la valeur dépend du mélange gazeux. Après avoir réalisé un niveau de vide inférieur à celui

nécessaire au fonctionnement, on introduit un gaz plasmagène pour atteindre une pression généralement comprise entre 1 et 5 hPa. Une différence de potentiel comprise entre 300 et 1000 V, produite grâce à un générateur d'énergie, est appliquée entre la cathode et l'anode. Il se développe ainsi un plasma luminescent au voisinage de la surface des pièces. Le problème qui se pose avec ce type d'équipement, en cas d'instabilité de la décharge et de perturbations dues au dégazage du métal et/ou à la présence de polluant sur les surfaces, est qu'il se forme des arcs électriques provoquant des brûlures dues à la concentration de toute l'énergie fournie en un seul point. Pour cette raison, on utilise des générateurs à coupure d'arc ou à énergie pulsée à haute fréquence (par exemple 800 Hz) coupures et des ré allumages créant plasma en quelques dizaines de micro-arcs produits participant microsecondes.

Les micro-arcs produits participent au décapage et à l'activation des surfaces sans risques de brûlure. La régulation de la température des pièces se fait par mesure à partir d'un thermocouple placé dans une pièce ou dans un échantillon témoin

Un paramètre sensible sur la stabilité du plasma et sur son activité est la pression qui règne dans le four. Celle-ci sera contrôlée, régulée et pilotée selon des données expérimentales propres à chaque morphologie de pièce et de charge [7].

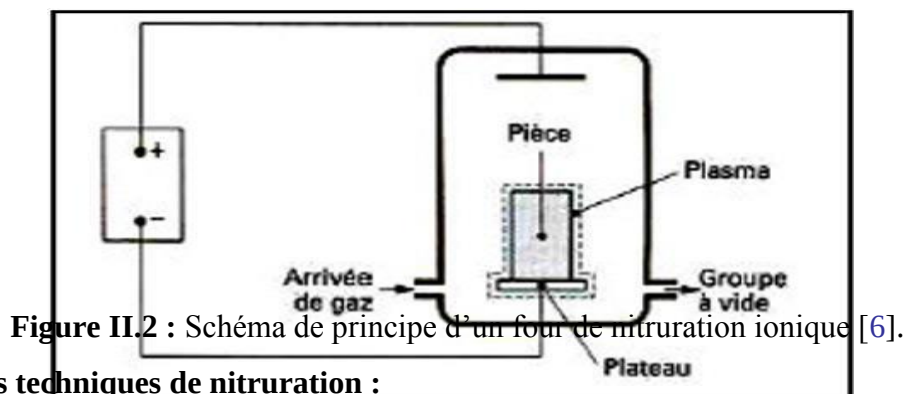


Figure II.2 : Schéma de principe d'un four de nitruration ionique [6].

II.2.2.4. Autres techniques de nitruration :

De nouveaux procédés se développent actuellement, en particulier les nitrurations Basse et haute pression, implantation ionique en immersion plasma.

Le principe du procédé de la nitruration basse pression consiste à utiliser, comme milieu nitrurant, un mélange gazeux sous faible pression. Les composés utilisés sont à base d'ammoniac, avec des additions éventuelles de méthane (carbonitruration) et d'oxygène dont le rôle semble primordial pour le contrôle de la couche de combinaison. Les principaux avantages de ce procédé se situent au niveau de la cinétique de traitement et de la simplicité et du coût de mise en œuvre.

Les premiers essais relatifs à la technique de nitruration haute pression ont été réalisés au cours de l'année 1989. Dans ce procédé, les pièces sont placées dans un four qui s'apparente à un four sous vide. Dans un premier temps un vide primaire est réalisé,

Puis un cycle thermique est appliqué aux pièces. Dans le même temps, une atmosphère de gaz NH_3 et éventuellement N_2 est introduite dans le four. Les traitements se font sous hautes pressions de 0,2 à 5 MPA, puis une phase de diffusion sous basses pressions.

L'intérêt essentiel de ce procédé est le fort pouvoir de pénétration de la nitruration et la régularité des couches obtenues [7].

L'implantation ionique en immersion plasma est une nouvelle technique de nitruration qui s'est développée à partir de 1987. Elle consiste à effectuer l'implantation directement dans le plasma. Elle permet non seulement de réduire les coûts d'équipement, mais aussi de traiter des pièces de forme complexe ou de grandes surfaces en une seule fois. Son principe est simple puisqu'il consiste à immerger un échantillon dans un plasma et à le polariser par des impulsions de haute tension négative. Les ions du plasma sont alors implantés dans le matériau sur toutes les surfaces exposées au plasma. Cette technique est très attractive d'un point de vue industriel et ouvre la voie à un grand nombre d'applications. D'autre part, elle permet de réaliser des matériaux dans des conditions fortement hors d'équilibre. L'énergie des ions permet notamment le mélange dynamique des interfaces [7].

II.2.3. 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 II.1 illustre quelques caractéristiques propres à chaque famille de procédés de traitement. On peut citer en particulier les suivantes :

Caractéristiques	Nitruration gazeuse	Nitruration ionique	Nitruration 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, composition, atmosphère)	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	Faible	Forte	Négligeable
Possibilité de réserves (protections)	Moyenne	Bonne	Mauvaise
Propreté aspect	Bon	Très bon	Moyen
Carbonitruration	Oui	Oui	Toujours
Carbonitruration + oxydation	Peu pratiquées	Difficile	Procédé éprouvé
Facteurs de coût principaux	Temps et gaz	Amortissement et temps	Sels et déchets

Tableau.II.1 : Eléments de comparaison des procédés de nitruration [7]

II.3. Mécanismes de formation des couches nitrurées

La détermination de la nature des phases cristallines formées durant la nitruration des aciers nécessite la connaissance des diagrammes d'équilibres. Dans la pratique, l'équilibre thermodynamique n'est certainement pas atteint néanmoins les diagrammes donnent une indication intéressante sur la nature des

phases susceptibles d'être formées. Le diagramme fer-azote (fig.II.3) représente les domaines d'existence des phases métallurgiques selon la teneur en azote et la température.

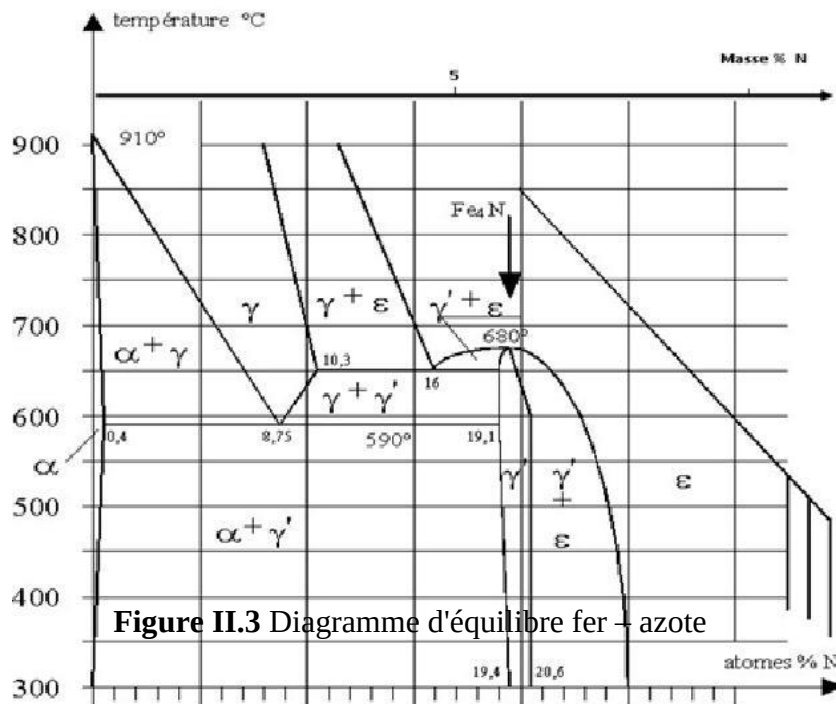


Figure II.3 Diagramme d'équilibre fer – azote

Les caractéristiques cristallographiques de différentes phases de ce diagramme sont regroupées dans le tableau II.2. La limite de solubilité de l'azote dans la ferrite dans l'intervalle de température 400 – 580 °C est très faible ($\leq 0,1$ % en masse). Dès que cette limite a été dépassée, il y a formation de nitrures de fer γ' ou ϵ . Pour la nitruration des aciers il faut prendre en compte le diagramme ternaire fer – azote – carbone. Ceci permet de dire que l'azote est très peu soluble dans les carbures de fer, ainsi que dans le nitride stable γ' (Fe_4N) ($\leq 0,2$ % en masse) comparée à celle de la phase instable ϵ (Fe_{2-3}N) qui est de 3,7 % massique à 560 °C.

Cependant, dans les aciers, on ajoute des éléments d'alliages pour améliorer certaines propriétés et notamment l'aptitude à la trempe. Dans ce cas la présence d'éléments d'addition vient fortement perturber les domaines d'existence des phases déjà répertoriées et provoque également l'apparition de nouvelles phases. Les éléments d'addition les plus couramment rencontrés sont le chrome, le vanadium, le molybdène, le titane, le manganèse qui sont tous capables de former des carbures, des nitrures et des carbonitrures dans les aciers dit de nitruration, les éléments d'addition sont destinés à favoriser la germination et la croissance de précipités de nitride qui augmentent la dureté du matériau.

Tableau.II.2 : Caractéristiques cristallographiques des phases du système fer – azote

Phase	Structure cristalline	Paramètres cristallins	Teneur en N(% massique)
A	C.C	0.2866 0,2864(0,11 m.%N)	0,10% à 590°C 0,003% à 200°C
γ	C.F.C	0,361(1,42 m.%N) 0,365(2,76 m.%N)	
γ (Fe ₄ N)	C.F.C	0,3795	max 5,75 % min 5,3 %
ϵ (Fe ₂₋₃ N)	H.C	a = 0,27 c = 0,4371	max 10,75 % min 7,25 %

Le traitement de nitruration provoque des changements métallurgiques importants dans le matériau traité et quel que soit le traitement utilisé, les couches nitrurées d'aciers peuvent toujours être décrites suivant le schéma suivant :

- Une couche de combinaison composée en proportions variables de nitrure de fer de type Fe₄N ou Fe₂₋₃N. L'épaisseur de cette couche située en extrême surface peut

Varier de 0 à 50 μm . Elle porte également aussi le nom de couche blanche à cause de son aspect métallographique après une attaque au nital.

- Une couche de diffusion dont l'épaisseur peut varier de quelques dizaines de microns à 1 mm Dans cette zone, l'azote est principalement combiné avec les éléments d'alliages pour former des nitrures intra granulaires qui peuvent conduire à des durcissements important selon les éléments d'alliages.

- Et le cœur du matériau qui n'est modifié que par le traitement thermique subi durant la nitruration.

II.3.1. Couche de combinaison (couche blanche)

Elle est généralement d'une épaisseur qui dépasse rarement les 30 μm du fait de la faible valeur des coefficients de diffusion de l'azote. Elle est composée essentiellement des nitrures de fer γ' (Fe₄N) et ϵ (Fe₂₋₃N).

II.3.1.1. Le nitrure γ' (Fe₄N)

Ce nitrure possède une symétrie cubique (Fig.II.4.a.) isomorphe de la pérovskite CaTiO₃ et il n'est stable qu'en dessous de 680 °C. La maille de fer possède quatre atomes de fer en coordonnées (0,0,0); (1/2,1/2,0); (1/2,0,1/2); (0,1/2,1/2) et un atome d'azote en position (1/2,1/2,1/2). Les atomes de fer forment un réseau Cubique à Faces Centrées (CFC) et l'atome d'azote occupe de façon ordonnée un quart des sites octaédriques du cristal en formant une structure cubique simple. Cette disposition entraîne

l'apparition de raies supplémentaires de type (100) et (110) sur les spectres de diffraction X. Ce nitrure est le premier à se former dans la série des nitrures de fer car il précipite dès les basses températures et ne nécessite qu'une teneur locale en azote de l'ordre de 20 % atomique. Son affinité pour le carbone est par ailleurs très faible puisque seulement 0,2 % massique de carbone peut être dissous dans sa structure. De plus, cette phase améliore la résistance à la fissuration [7].

II.3.1.2. Le nitrure ϵ ($\text{Fe}_2\text{-3N}$)

Ce nitrure possède une maille élémentaire de symétrie hexagonale (Fig.II.4.b). Les atomes de fer forment un réseau Hexagonal Compact (HC) déformé par la présence d'éléments interstitiels qui se placent dans les sites octaédriques. Ces sites forment un réseau hexagonal de paramètres a et $C/2$. Cette phase possède un domaine de composition important qui s'étend de 8,25 à 11 % massique en azote. Le remplissage progressif de sites octaédriques génère une structure HC d'atomes d'azote dont le paramètre de maille varie également suivant la fraction d'azote présente dans le réseau. Cette phase, est le plus souvent appelée carbonitrure ϵ tant son affinité pour le carbone est grande ; la teneur en carbone dans cette phase peut atteindre jusqu'à 3 % massique. C'est d'ailleurs un moyen d'obtenir des couches de combinaison monophasées ϵ par nitruration ionique. Par ailleurs, de nombreux auteurs s'accordent sur la grande dureté et les bonnes propriétés tribologiques de cette phase et sa ductilité accrue par rapport à la phase γ' . Elle permet, entre autre, d'améliorer la résistance à l'usure en évitant certains problèmes d'adhésion. [7] (annexe1)

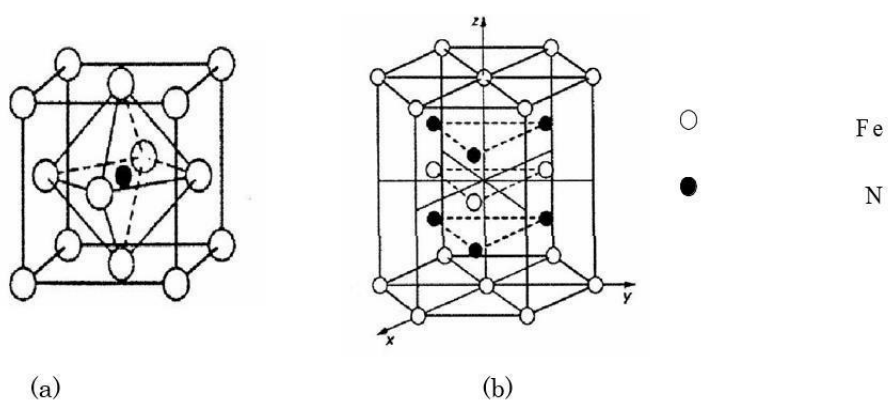


Figure.II.4 : Structures cristallologiques du(a) nitrure γ' (Fe_4N), (b) nitrure ϵ (Fe_{2-3}N)

II.3.2. La couche de diffusion

Suivant les conditions de traitement (temps et température) et la nature de l'alliage, la couche de diffusion peut varier de quelques dizaines de micromètres à un millimètre. Elle est composée d'une solution solide d'insertion d'azote dans le fer et de nitrures ou carbonitrures d'éléments d'alliage.

II.4. 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 ...).

Multitude d'aciers de construction subissent une nitruration pour améliorer

Les principales catégories sont :

- 25CrMo4 à 42CrMo4
- 20MnCr5 à 27 MnCr5 + éventuellement
- 40C MorMnMo8 à usinabilité améliorée
- 35CrNi à usinabilité améliorée
- 40CrMoV20
- Aciers doux
- Aciers de développement 32CrMoV13

II.4.1. Influence des éléments 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 [7].

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.

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.

CHAPITRE III : Matériaux et Techniques expérimentales



1. Introduction

III.1. Matériaux étudiés :

Les aciers utilisés dans cette étude sont les aciers de construction pour

Nitruration ionique : de type 42CD4, C45 et ST70

a. L'acier 42CD4 :

Tableau III.1. Désignations de la nuance selon les normes internationales.

France NF EN 10343 (03/2009)	Allemagne DIN EN 10083-3 (01/2007)	USA SAE J 404 (2009)
42 CD 4	42 Cr Mo 4	4142H

Tableau III.2. Composition chimique en % poids

C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
0,38 - 0,45	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30	≤ 0,035	0,60 - 0,90	≤ 0,035	0.40 Maxi

a.1 Caractéristiques mécaniques moyennes (état trempé revenu)

Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A(%)
750/1300	500/900	10/14

Tableau III.3. Quelques caractéristiques mécaniques de l'acier 42CD4

a.2 Propriétés

- Acier de construction faiblement allié au chrome molybdène pour trempe et revenu.
- Bonne trempabilité à l'huile.
- Limite de rupture élevée, Bonne résistance au fluage, Bonne résistance à la fatigue et à l'usure.

a.3 Domaines d'application

Acier très employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages.

Cet acier est parfois utilisé pour des pièces trempées superficiellement.



Figure.III.1 : Pièces en aciers 42CD4 (a : vilebrequin, b : couronne, c : bielle, d : demiessieu).

a.4 Livraison

- Ronds prétraités rectifiés tolérance h7
- Ronds prétraités laminés à usinabilité améliorée XM (C18)
- Ronds prétraités laminés conventionnels
- Laminés : carrés, plats, tôles

b.L'acier C45 :

Tableau III.4 : Désignations de la nuance selon les normes internationales.

France AFNOR NF A 36-102 (1993)	Allemagne DIN EN 10083-2 (10/2006)	USA SAE J 403 (2001)
XC45	C 45E	1045

b.1. composition chimique en pourcent poids :

C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
0.42-0.50	≤0.1	≤0.40	≤0.035	≤0.80	≤0.40	0.40-0.50

b.2 Caractéristiques mécaniques :

Tableau III.5.Quelques caractéristiques mécaniques et physiques de l'acierC45.

Résistance à la traction (N/mm ²)	Limite d'élasticité (N/mm ²)	Allongement à la rupture (Lo = 5 do)	Résilience (ISO-V)	Dureté Brinell	Conductibilité Thermique (W/mK)
Rm 560-620	Re 275-340	A5 14-16 %	AV (J) ≥25	(HB 30) 175-210	35-45

b.3 Propriétés :

- Très bonne usinabilité.
- Très bonne stabilité de forme.
- Haute résistance au choc.
- Trempable : au chalumeau, par induction.
- Acier de nitruration.

b.4 Domaine d'application :

Construction d'appareils, Construction de machines spéciales, Construction de gabarits, Construction d'outils, Construction de moules, Construction d'installations industrielles, engrenages, axes...

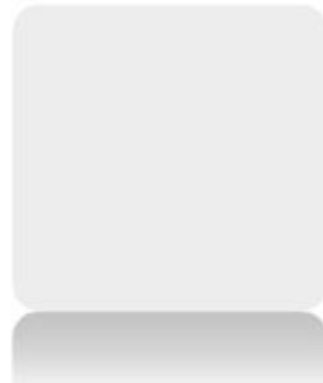


Figure.II.2 : Pièces en C45 (a : engrenages, b : boulonnerie, c : axe)

c. l'acier st70 :

Tableau III.6 : Désignations de la nuance selon les normes internationales.

France NFA 35-501	Allemagne DIN EN 17100	USA
A70-2	ST70-2	E360

C.1.Composition chimique en % poids

Eléments chimique	C	Mo	Si	Mn	P	S	N
St70	0.21	0.60	0.55	1.70	0.035	0.035	0.020

C.2. Caractéristiques mécaniques

Epaisseur	Résistance au rendement R_{eH} [N/mm ²] transv.min.	Résistance à la traction R_m [N/mm ²]transv	L'allongement de la fracture [%] transv. min.
$t \leq 16\text{mm}$ $t > 16\text{mm}$	360 355	-	-
$t < 3\text{mm}$ $t \geq 3\text{mm}$	-	690-900 670-830	-
jusqu'à 1.5mm 1.51-2.00mm 2.01-2.50mm	-	-	4 5 6 7 10

Tableau III.7. Quelques caractéristiques mécaniques de l'acier st70

III.2.Cycle de fabrication des pièces étudiées :

Pour bien comprendre l'effet des traitements thermique et thermochimiques, nous avons suivi le cycle de fabrication des pièces étudiées des nuances d'acier choisis.

Le cycle de fabrication commence par le découpage des barreaux d'aciers importés jusqu'à la finition des pièces.

III.2.1.Cisaillage à froid des lopins : cette opération consiste a découper les barreaux des aciers en des lopins prêts pour le forgeage. Ces lopins ont des dimensions et des poids bien précis.

Tableau III.8. Dimensions et poids des lopins :

	Le croisillon différentiel	La roue dentée
Dimensions	R45x165mm	50x124mm
Poids	2kg	2.3kg



Figureure.III.3 : Découpage des lopins.

III.2.2.Chauffage des lopins

À une température 1100 °C pour les deux types de pièces.

Le chauffage a pour but d'austéniser les lopins pour faciliter la déformation et obtenir les formes voulues



Figure.III.4 : Four du chauffage.

III.2.3.Estampage :

On applique une charge adéquate pour obtenir la forme finale.

- La charge appliquée pour obtenir la forme initiale du croisillon différentiel : 2tonnes
- La charge appliquée pour obtenir la forme initiale de la roue dentée : 5tonnes



Figure.III.5 : Marteau GOA2000.

III.2.4.Ebavurage :

La bavure est découpée à l'aide d'un outillage spécifique. Cette opération est réalisée dans les secondes qui suivent l'estampage. Le poids de la bavure peut représenter 10 à 40 % de la pièce finie.



Figure.III.6 : Outil d'ébavurage PEE 400(excentrique).

Poids des pièces brut :

Le croisillon différentiel : 1.45kg

La roue dentée : 1.84kg

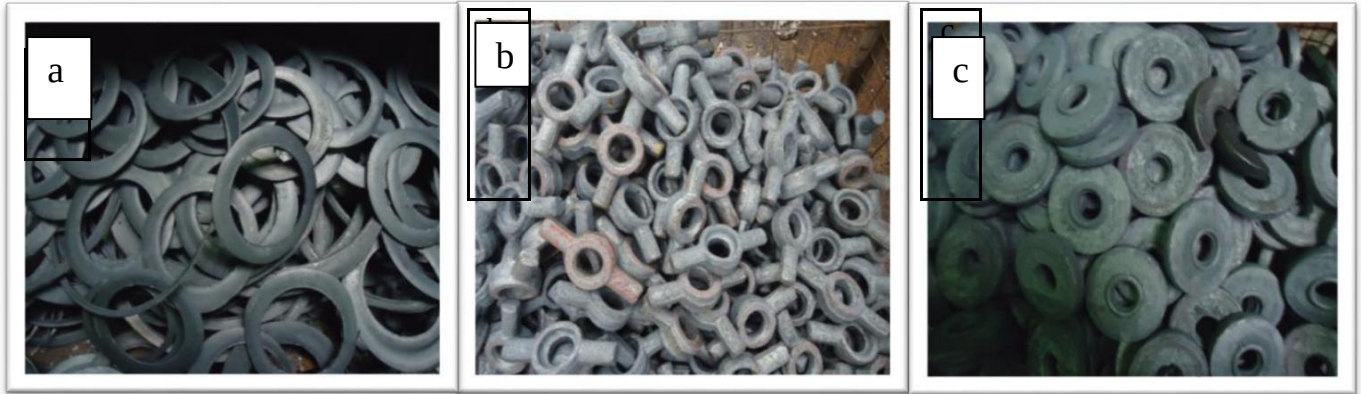


Figure. III.7 : Pièces bruts après ébavurage traitement thermique
(a : ébavures, b : croisillons différentiels, c : roues dentées).

III.2.5. Traitement thermique préalable :

a. L'acier St70 :

Traitement d'amélioration (trempe et revenu)

Trempe et revenu :

La trempe : Dans le but d'assurer le maximum de dureté, les pièces forgées ont été chauffées dans un four de trempe à 880°C, avec un temps de maintien de cinq heures (5h) suivi d'un refroidissement à dans le bain d'huile de trempe (l'opération de refroidissement dure 30 minutes).

Le revenu :

Après le traitement de trempe à 880°C, les pièces trempées ont subi aux un traitement de revenu à 600°C pendant un temps de maintien de cinq heures (5h) suivi d'un refroidissement à l'air. Le choix du traitement de revenu a beaucoup d'objectifs :

- ☐ Relaxer les contraintes.
- ☐ Transformer la structure de trempe en structure de revenu.
- ☐ Stabiliser la structure de nitruration.

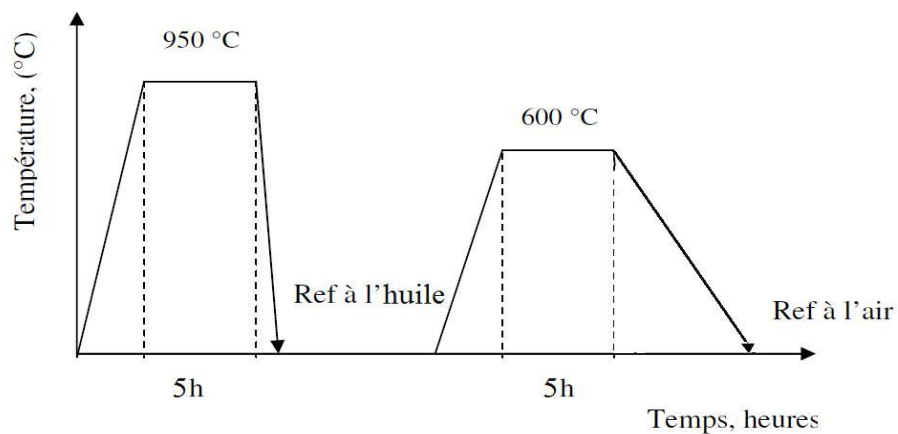


Figure.III.8 : Cycle du traitement d'amélioration (Trempe + revenu à haute température).

Après l'application du traitement thermique d'amélioration, les pièces doivent présenter :

- ☐ Structure de traitement : à grain fin pas de ferrite réticulaire ou à gros grain, bonne amélioration.
- ☐ Résistance à la traction $RT=98-118\text{kgf/mm}^2$.
- ☐ Allongement de rupture 11%

b. les aciers C45 et 42CD4 :

Le recuit de normalisation :

C'est un traitement thermique qui consiste à chauffer jusqu'au domaine austénitique 900°C :

- Un maintien (4heurs) à cette température jusqu'à son échauffement complet.
- Un refroidissement à l'air libre.

Le recuit de normalisation provoque la recristallisation aussi de l'acier et affine donc la structure à gros grains obtenue par coulée ou laminage (forgeage estampage). Ce traitement s'emploie largement en remplacement de la trempe et du revenu pour améliorer les propriétés des pièces moulées en acier.

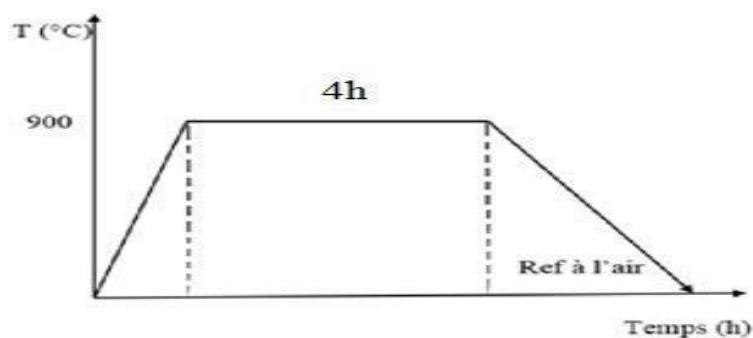


Figure.III.9 : Traitement de recuit de normalisation

Après l'application du traitement thermique de recuit de normalisation, les pièces doivent présenter :

- Structure de traitement thermique : ferrito-perlitique, pas de martensite au maximum 10 % DE BAINITE, pas de structure en bande.
- Résistance à la traction : $RT=98-118\text{kgf/mm}^2$.
- Allongement de rupture : 11%.



Figure.III.10 : Atelier du traitement thermique des aciers

III.2.6. Nettoyages au grenaillage d'acier :

Cette opération consiste à éliminer la couche de calamine formée après forge et traitement thermique. Elle est très importante pour obtenir des surfaces prêtes pour l'opération qui suit.

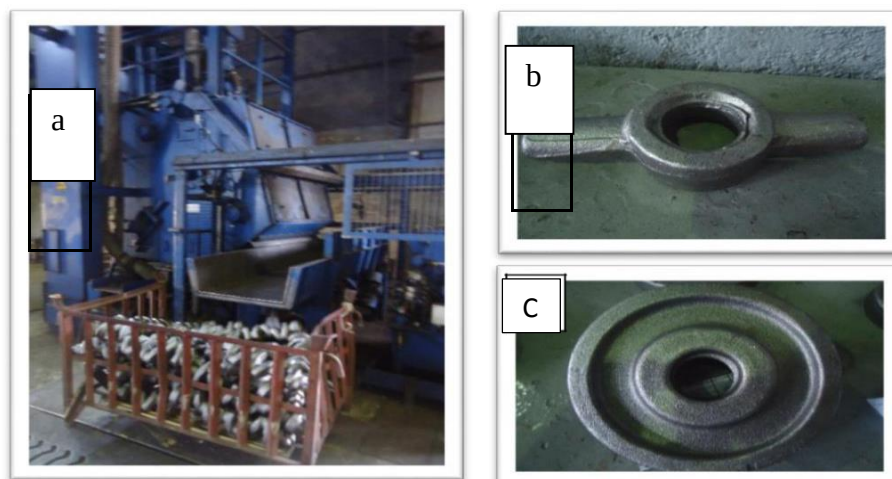


Figure.III.11 : Opération de nettoyage en grenaillage

(a : Grenailleuse a tambour n° 22117-22134, b : croisillon différentiel brut ; c : roue dentée brut)

III.2.7. Usinage des pièces :

L'opération d'usinage consiste à finaliser la pièce et livrer cette dernière à l'opération du traitement de nitruration par plasma.

Les pièces passent par plusieurs serrages (opérations du tournage, alésage, fabrication des dentures, rectification...) pour obtenir la surface et les côtes finales du dessin technique.



Figure.III.12 : Opérations d'usinage.

III.2.8. Traitements thermochimiques de nitruration par plasma :

1. Présentation du four de nitruration par plasma :

La nitruration par plasma a été effectuée au niveau de l'entreprise ETRAG Constantine.

L'équipement de la nitruration par plasma est un nouvel investissement au niveau de l'entreprise, sous garantie du fabricant Autrichien **RUBIG**.

Le four du traitement est un four de la marque **RUBIG Engineering**, four sous vide vertical, à double chambre de traitement. Il constitue une installation autonome, à cycles de traitement automatique.

La création du plasma est assurée par l'application d'une haute tension (600V environ) entre les parois du bâti et les substrats et une introduction des gaz réactifs tels que l'hydrogène, l'azote et l'argon.

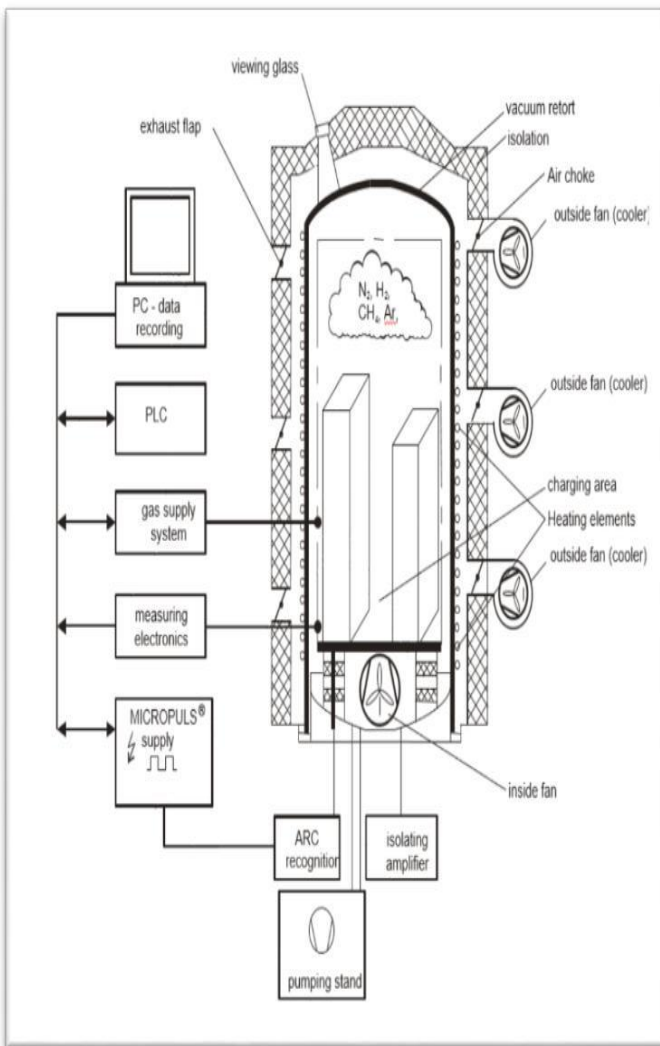


Figure.III.13 : Représentation schématique et photo de l'installation du four de nitruration par plasma

2. Composants principales du four :

- Chambre de traitement (2)
- Pompe à vide
- Chambre de commande numérique
- Station de refroidissement à l'eau
- Gazes de nitruration ionique
- Générateur plasma
- Bag d'oxydation par l'eau.

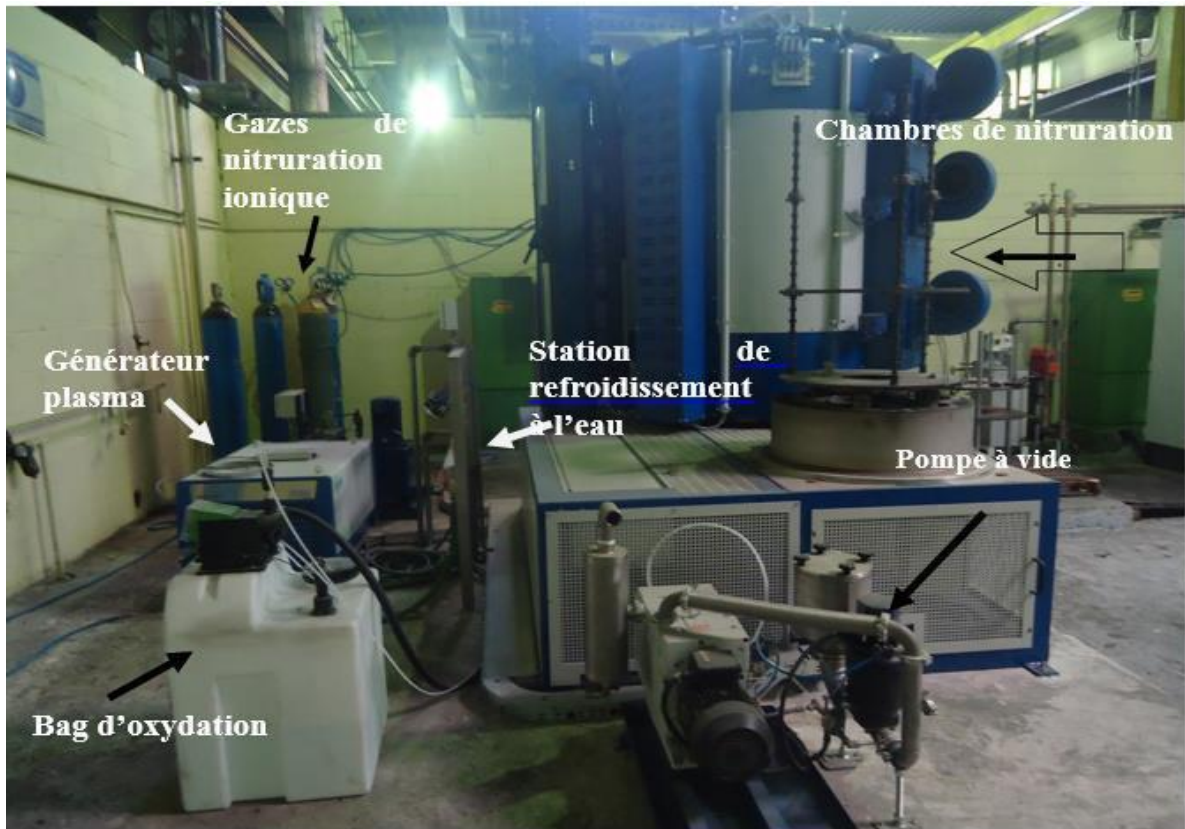


Figure.III.14 : Composants du four de traitement de nitruration ionique.

3. Gaz utilisés :

Selon la nature des gaz utilisés, on procède à un type de traitement thermochimique. Il est possible de réaliser la nitruration ou la nitrocaburation en introduisant les gaz spécifique à chaque traitement.

Au niveau de l'entreprise, les gazes utilisées sont :

- L'argon Ar, sert à décaper ou nettoyer la surface et les rendre propres pour faciliter la diffusion de l'azote.
- L'hydrogène H₂, sert a assuré un milieu désoxydant.
- L'azote N₂, l'azote et le gaz principale dans ce traitement dont la réaction de formation du plasma est la suivante :





Figure.III.15 : Gazes du four de nitruration par plasma

4. Le générateur plasma :

Le générateur plasma assure la différence du potentiel entre l'anode et la cathode. La valeur du produit « tension x intensité » donne la puissance du plasma.

- $I_{avg} = 300 - 1200 \text{ A}$
- $U = 0 - 700 \text{ V}$
- $P = 35 - 140 \text{ Kw}$



Figure.III.16 : GENERATEUR PLASMA

5. les étapes de la nitruration par plasma : (annexe 4)

c. Le Chauffage 0-400°C : le chauffage est assuré par des éléments chauffants qui entourent les parois du four.

d. Pulvérisation cathodique : Cette opération primaire consiste à décaper des atomes superficiels du métal ; l'effet de ce décapage provoque un nettoyage des surfaces 0.3µm d'épaisseur, en les amenant à un état physiquement propre.

Tableau III.9 : Conditions de la pulvérisation cathodique

Paramètres de nitruration par plasma	Température (°C)	Pression (mbar)	Composition Du Gaz (%)	Tension (V)	Durée (Heur)
Pulvérisation cathodique 1	450	1	5à10 Ar 80 à 85 H ₂ 5 à 10 N ₂	600	0.16
Pulvérisation cathodique 2	510	1	5à10 Ar 80 à 85 H ₂ 5 à 10 N ₂	600	1
Pulvérisation cathodique 3	560	1	5à10 Ar 80 à 85 H ₂ 5 à 10 N ₂	600	1

***Nitruration** : Les paramètres saisis pour la nitruration ionique sont représentés dans le tableau III.10

Tableau III.10 : Condition de la nitruration ionique

Paramètres de nitruration par plasma	Température (°C)	Pression (mbar)	Composition Du Gaz (%)	Tension (V)	Durée (Heur)
Nitruration 1	560	2.5	25% H ₂ – 75%N ₂	450	10
Nitruration 2	570	2.5	25%H ₂ – 75% N ₂	500	7h30min
Nitruration 3 (refroidissement par plasma)	400	2.5	25%H ₂ – 75%N ₂	400	2h

***Refroidissement** :

Le refroidissement s'effectue dans une atmosphère d'azote du 400°C à 140°C.

Le four de nitruration ionique RUBIG Engineering a plusieurs utilisations à savoir l'oxydation et la post-oxydation des surfaces des pièces selon les exigences des pièces. Dans notre cas ces deux traitements ne sont pas utilisés.

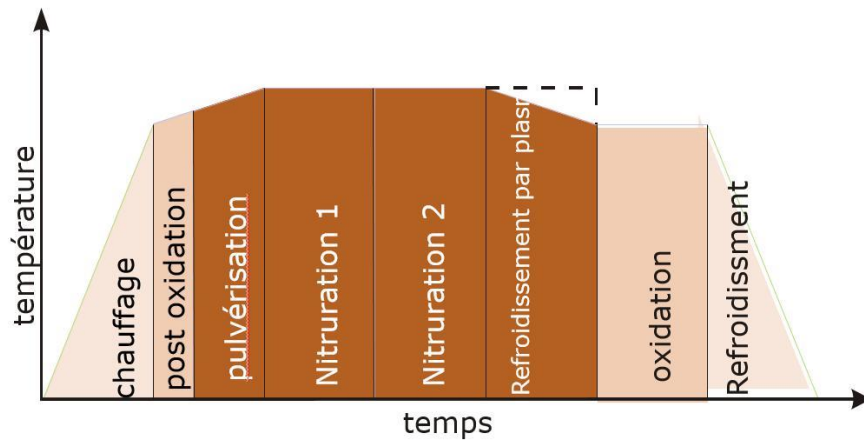


Figure.III.17 : Schéma représentatif de cycle de traitement de nitruration par plasma

III.2.9.Présentation des pièces étudiées : Les deux pièces roue dentée et croisillon différentiel travaillent à l'usure, la fatigue cyclique et à la compression, elles doivent présenter une dureté superficielle élevée avec une ductilité à cœur pour résister aux chocs.

- **La roue dentée en ST70** : les dentures nécessitent une surface dure pour pouvoir résister aux efforts produits lors de la rotation du moteur.

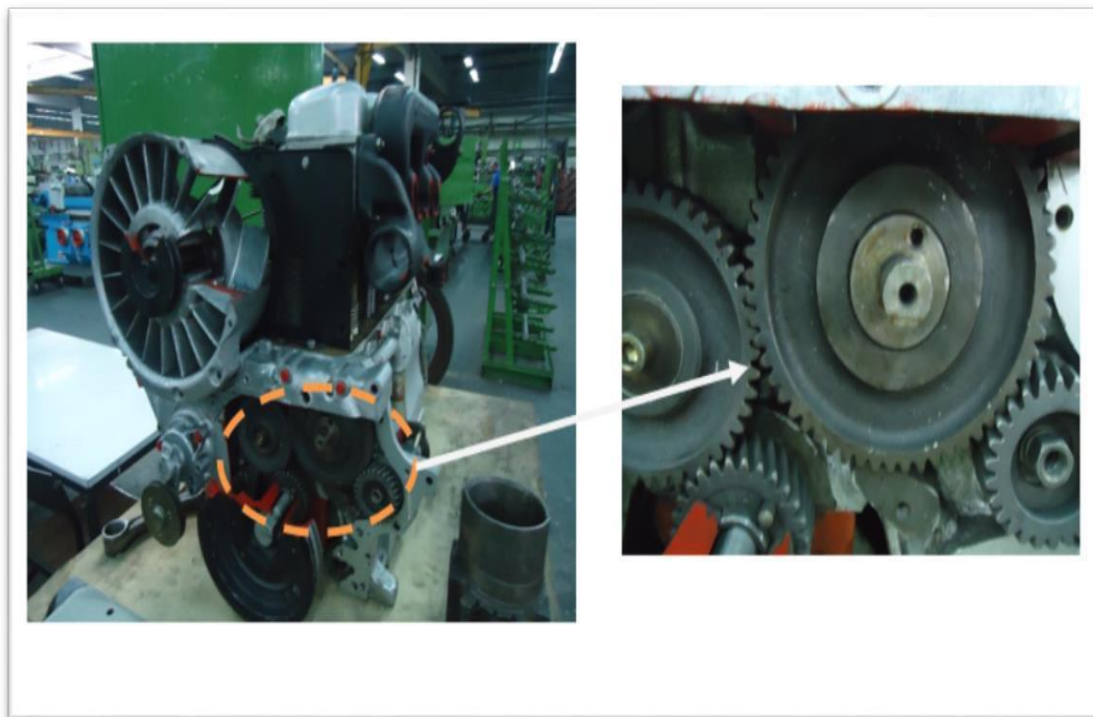


Figure.III.18 : la roue dentée du moteur à 6 cylindres ; tracteur CX100

b. Le croisillon différentiel en 42CD4 et C45 :

Le croisillon différentiel est une pièce de l'unité différentielle (annexe 5), elle est responsable de la transmission du mouvement qui vient de la boîte vitesse vers les grandes roues du tracteur. L'unité différentielle est composée de deux grandes roues coniques et deux petites roues coniques et le carter différentiel.

Les deux petites roues coniques tournent sur le croisillon différentiel, il doit acquérir une surface glissante très résistante à l'usure et à la fatigue cyclique, ces propriétés sont obtenues par traitement thermochimique de diffusion (nitruration ionique).

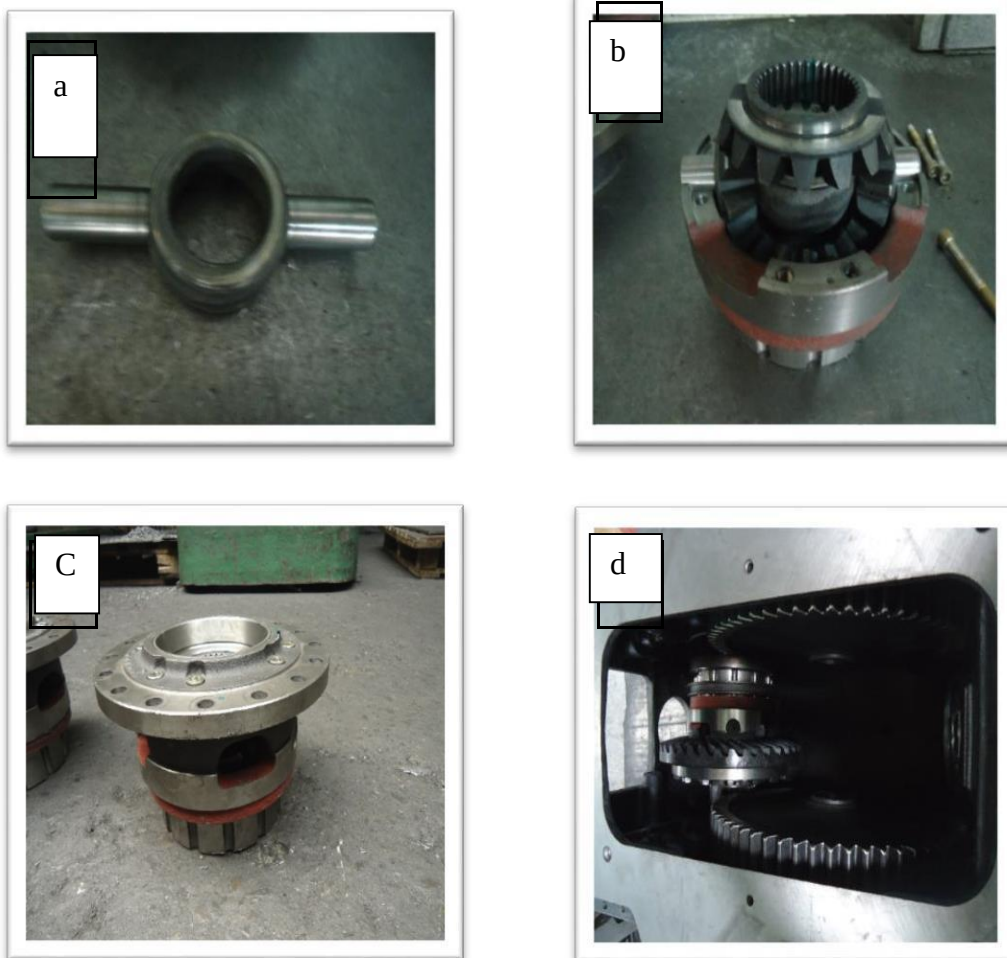


Figure.III.19 : Système de transmission du mouvement par l'unité différentielle
(a : Le croisillon différentiel, b : Vue à l'intérieur du différentiel, c : l'unité différentielle, d : Montage de l'unité différentielle dans le pont arrière du tracteur)

III.3 Caractérisation :

III.3.1. Analyse chimique :

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé la technique de la spectroscopie pour confirmer la composition chimique des trois nuances étudiées.

Cette technique consiste à photographier le spectre puis à le projeter sur l'intermédiaire de la plaque photo.

L'analyse spectrale a pour but de séparer les radiations des longueurs d'ondes différents, les prismes de l'appareil reçoivent au faisceau de rayon parallèle provenant d'une fente éclairée par la lumière à étudier située au foyer de l'objectif du collimateur, le faisceau dispersé par les prismes est ensuite repris par un objectif de chambre qui forme sur une plaque photographique des raies spectrales caractéristiques à chaque élément d'alliage, grâce à cette technique on détermine les compositions chimiques et quantitatives des aciers.

Le spectromètre utilisé dans notre cas est spectromètre d'émission optique **SOLARIS CCDPLUS** celle de l'entreprise ETRAG qui ne peut analyser que les métaux et pas d'autre matières.



Figure.III.20 : Spectromètre d'émission optique

III.3.2 Préparation des échantillons :

a. Découpage :

Les échantillons ont été découpés par une tronçonneuse de type « Bitesh Europe » et une micro tronçonneuse de type « Mecatome TZ10 ». Munis d'un système de refroidissement

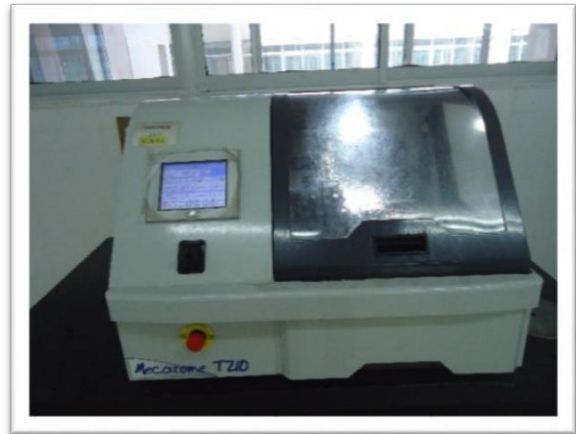


Figure.III.21 : Équipements de découpage
(a : trouçonneuse, b : Micro rançonneuse)

b. Enrobage :

Après découpage, tous les échantillons ont enrobés à froid

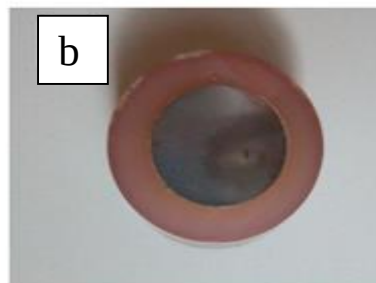


Figure.III.22 : les échantillons sont enrobés à froid
(a : l'acier 42CD4 ; b : l'acier C45)

c. Polissage :

On a effectué un polissage en utilisant du papier abrasif de (SiC) de granulométrie de plus en plus fine (grade 320 - 400 - 600 - 800 - 1000 – 1200-4000) tourner sur une polisseuse de type « Bitech Europe MP séries » sous l'eau.

La finition a été faite sur des papiers feutres à l'aide de la pâte de diamanté à granulométrie fine de (6 μ m) jusqu'à l'obtention d'une surface miroir.



Figure.III.23 : Polisseuse de type *Bitech Europe*

d. l'attaque chimique :

Pour révéler la microstructure interne, tous les échantillons polis ont subi une attaque chimique à la surface en utilisant du Nital 3% (3 ml d'acide nitrique HNO_3 dans 97 ml d'alcool éthylique $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). au niveau du laboratoire de l'ENSMM

III.3.3. Examen au microscope optique :

La microscopie est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une image des structures à l'échelle microscopique. Le principe : une onde est envoyée sur l'échantillon, cette onde est captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable. Cette image est soit observée à l'œil nu, soit enregistrée par camera CCD et stocke sur ordinateur pour traitement.

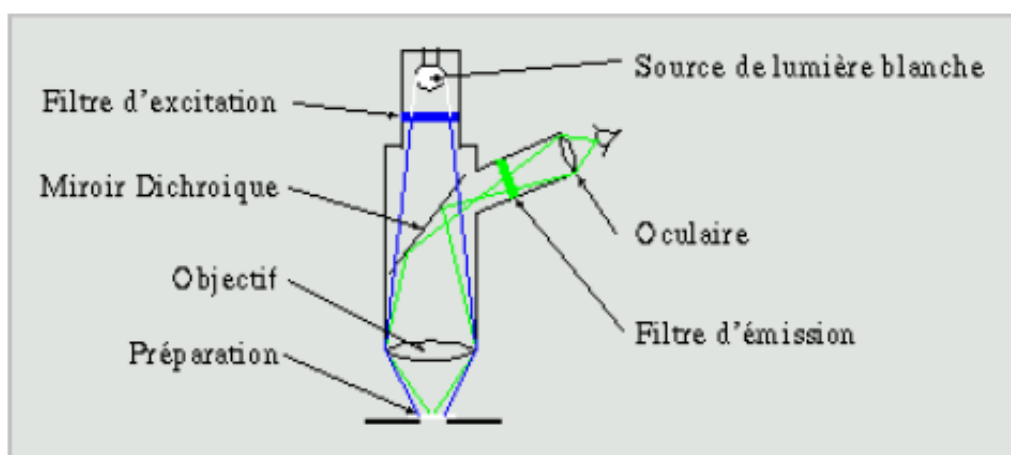


Figure.III.24 : Principe de fonctionnement du microscope optique

Les observations optiques ont été effectuées à l'aide d'un microscope « NIKON Eclipse LV 150N » au niveau du laboratoire de l'ENSMM, les échantillons étant préalablement polis. La structure métallurgique des échantillons a été révélée par attaque chimique. Les micrographies ont été prises avec un ordinateur assisté par camera, utilisant des grossissements allant de X100 à X1000.



Figure.III.25 : Schéma du microscope métallographique

III.3.4.Microdureté Vickers :

Outre l'examen métallographique effectuée au microscope optique après polissage et Attaque de l'échantillon au nital, l'un des moyens essentiels nécessaire du métallurgiste pour caractériser un traitement thermochimique est l'essai de dureté Vickers.

Dans le cas du traitement superficiel l'intérêt de la microdureté, en plus du fait qu'elle nous renseigne sur la profondeur de la couche nitrurée, elle permet d'avoir une idée même qualitative sur la variation des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur. Les essais de microdureté ont été réalisés sur une coupe transversale des pièces traitées, parallèlement à la direction de diffusion, à l'aide d'un microduremètre de type Vickers « INOVATEST » au niveau du laboratoire de l'ENSM. La charge utilisée est de 50gf, la durée de chargement et déchargement est de 10 secondes. Chaque valeur reportée sur la courbe est la moyenne de quatre mesures. La dureté Vickers se calcule selon la relation suivante : $HV = 1854 P / d^2$ ou

P représente le poids normal, **d** représente la moyenne des diagonales « d_1 et d_2 » de L'empreinte provoquée par le pénétrateur en diamant dans l'angle au sommet est de 136° .



Figure.III.26 : La Microduromètre Vickers

III.3.5.Mesure de rugosité :

La rugosité (Ra) c'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique qui représente des motifs géométriques élémentaires à caractère répétitif. Ces motifs correspondent, généralement, aux traces d'outils générées par l'usinage.

Le rugosimètre : mesure la rugosité qui permet de quantifier la grandeur des écarts géométriques par rapport à la surface théorique, la forme des motifs de surface et leur répartition, de prévoir quelle sera l'évolution la plus possible de la surface de contact avec celle de la hauteur des aspérités.

Description d'appareil utilisé

Le rugosimètre à palpeur (deux dimensions) de type TR-220, ou le profil est délivré à partir de l'exploitation suivant une ligne de contact :

- Un enregistrement de profil
- Une évolution des écarts géométriques correspond Ra et Rz et Ry

Ra représente la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts (Y_i) par rapport à la ligne moyenne.

$$Ra = \sum_{i=1}^n |Y_i|$$

Ry : représente la somme de la hauteur Y_p de la saillie la plus haute par rapport à la ligne moyenne et de la profondeur Y_v du creux le plus bas par rapport à la ligne moyenne

$$Ry = Y_p + Y_v$$

Rz : hauteur des irrégularités.

La distance parcourue est de l'ordre de 1cm et la valeur moyenne représente la valeur de (08) parcours effectués sur différents endroits de l'échantillon.



Figure.III.27 : Rugosimètre surfest SJ-301 assisté par une imprimante type Mitutoyo

III.3.6. Analyse microstructurale par microscope électronique à balayage :

Nous avons utilisé le microscope électronique à balayage afin de visualiser les couches formées à la surface de l'acier après la nitruration ionique. La même préparation de surface décrite ci-avant a été effectuée, sauf qu'il faut nettoyer les échantillons à ultrason avant de les attaquer chimiquement. Les observations par le microscope électronique à balayage sont accomplies au niveau du laboratoire de génie des matériaux de l'école nationale supérieure des mines et de la métallurgie-annaba- par un MEB de marque FEI



Figure.III.28 : nettoyage à l'ultrason

Ce microscope est destiné à l'observation d'échantillons secs et conducteurs ainsi qu'à l'analyse des éléments chimiques présents par un spectromètre de dispersion d'énergie EDAX

(analyse EDS). L'observation de la microstructure s'effectue avec le mode d'imagerie d'électrons secondaires du MEB appelé mode SEI (Secondary Electron Imaging).

Ce mode permet d'observer des objets ayant une morphologie et un relief importants. Les topographies sont obtenues via un détecteur collectant les électrons secondaires émis par l'échantillon. La résolution est de l'ordre de quelques nanomètres. Les parties sombres et claires visibles sur les images obtenues dépendent de la position des détecteurs par rapport à l'échantillon et surtout de l'angle entre le faisceau incident et la surface analysée. En effet, l'émission secondaire varie selon $\frac{1}{\cos(i_0)^p}$ où i_0 correspond à l'angle entre le faisceau incident et la normale à la surface de l'échantillon, et, $p < 1$ dépend de l'énergie des électrons incidents

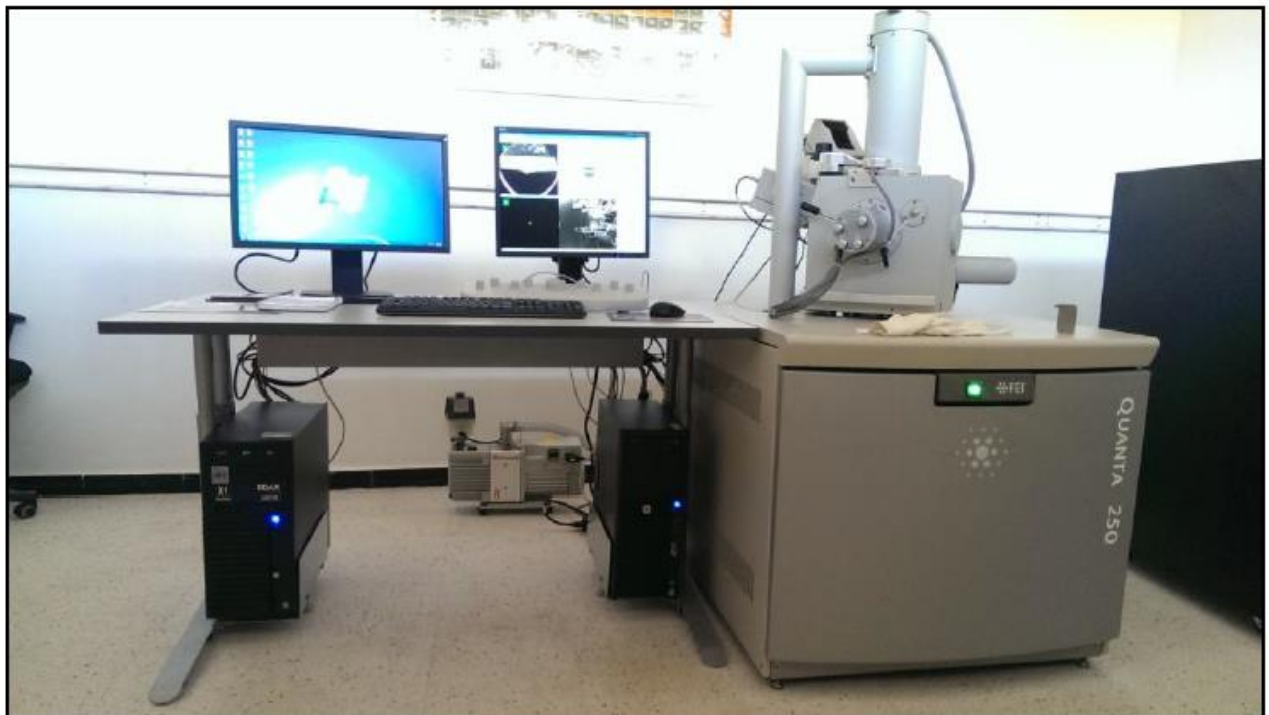
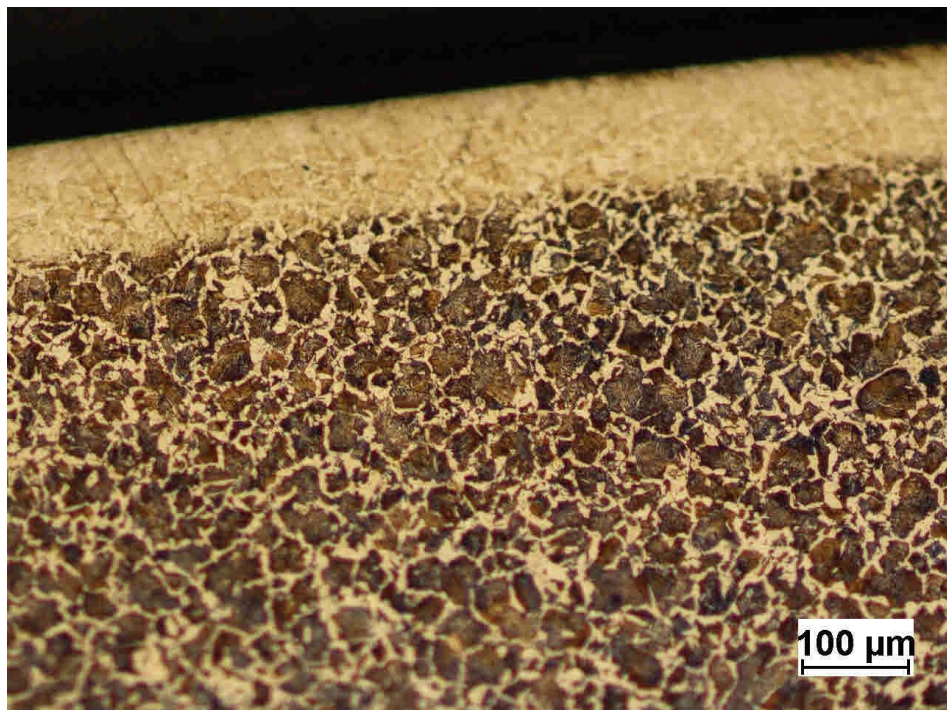


Figure.III.29 : Vue du MEB utilisé

CHAPITRE IV *RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS*



IV. Résultatsexpérimentaux et discussions :

IV.1. Analyse spectrale :

L'analyse de la composition chimique par spectrométrie des aciers de nuances 42CD4, C45 et St70 a déterminé les éléments chimiques en pourcent poids. La composition chimique de ces matériaux est présentée dans les tableaux IV.1 et IV.2 respectivement. D'après ces résultats on peut dire que la composition de trois nuances c'est-à-dire le pourcentage des éléments d'alliages sont dans les normes en comparant avec la composition chimique de ces trois nuances avec les résultats du logiciel **La clé des aciers 2010**.

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier 42CD4

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Al%
Résultat	0.40	0.45	0.76	0.018	0.037	0.97	0.11	0.18	0.020
Ref. MIN	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ref. MAX	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	Cu%	Co%	Ti%	V%	W%	Pb%	Sn%	N%	B%
Résultat	0.233	0.002	0.018	0.00	0.08	0.003	0.006	0.102	0.000
Ref. MIN	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ref. MAX	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	As%	Bi%	Ca%	Ce%	La%	Nb%	Sb%	Ta%	Te%
Résultat	0.000	0.000	0.007	0.009	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000
Ref. MIN	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ref. MAX	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	Zr%	Fe%							
Résultat	0.000	96.592							
Ref. MIN	----	----							
Ref. MAX	----	----							

Tableau IV.2 : Composition chimique de l'acier C45

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Al%
Résultat	0.46	0.37	0.66	0.020	0.021	0.14	0.06	0.00	0.011
Ref. MIN	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ref. MAX	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	Cu%	Co%	Ti%	V%	W%	Pb%	Sn%	N%	B%
Résultat	0.191	0.000	0.006	0.00	0.08	0.000	0.006	0.060	0.000
Ref. MIN	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ref. MAX	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	As%	Bi%	Ca%	Ce%	La%	Nb%	Sb%	Ta%	Te%
Résultat	0.000	0.000	0.008	0.016	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ref. MIN	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ref. MAX	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	Zr%	Fe%							
Résultat	0.000	97.875							
Ref. MIN	----	----							
Ref. MAX	----	----							

Tableau IV.3 : Composition chimique de référence de l'acier 42CD4 (la norme DIN)

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
Min	0.38	-	0.60	-	-	0.90	0.15
Max	0.45	0.40	0.90	0.035	0.025	1.20	0.30

Tableau IV.4 : Composition chimique de référence de l'acier XC45 (la norme DIN EN)

	C	Si	Mn	S	P	Cr	MO
Min	0.42	0.40	-	-	-	-	-
Max	0.50	0.50	0.80	0.035	0.40	0.10	0.40

Tableau IV.5 : Composition chimique de référence de l'acier A70 (la norme DIN EN) en pourcent poids

	C	Si	Mn	S	P	Cr	N
Min	0.21	0.55	1.70	-	-	-	-
Max	-	-	-	0.045	0.045	1.00	0.015

D'après ces tableaux on remarque que le pourcentage de carbone essentiellement est dans la fourchette pour les aciers ainsi que le pourcentage de chrome qui varient entre 0.9 et 1[2].

IV.2. Caractérisation structurale

IV.2.1. État du traitement thermique

Les échantillons choisis pour notre étude ont subi une gamme de traitement thermique selon la nuance c'est-à-dire les traitements thermiques de recuit de normalisations. D'après la **figure IV.1**, On observe que :

1. cas de l'acier St70 :

La structure de l'acier St70 est une structure de revenu avec des précipités des carbures.

2. Cas de l'acier 42CD4 :

La structure de l'acier 42CD4 est une structure ferrito-perlitique avec une distribution homogène de la ferrite et de la perlite (pas de structure en bande).

3. Cas de l'acier C45 :

3.1. Structure du cœur :

L'étude par microscopie optique des coupes transversales des échantillons C45 (test 1) et C45 (test 2) a montré une structure composée principalement de grains équiaxes de ferrite et de perlite qui correspond à une teneur en carbone située en 0.4-0.5% (**Fig.1V.1 .b**). Cette teneur correspond à notre avis à la teneur en carbone tolérée par la norme de l'acier de construction de type C45. Cependant, nous pouvons confirmer que la structure du cœur n'a pas subi de prétraitement thermique, cela implique que c'est une structure issue d'un traitement de recuit. Le niveau de la dureté atteint une valeur moyenne de (220HV)

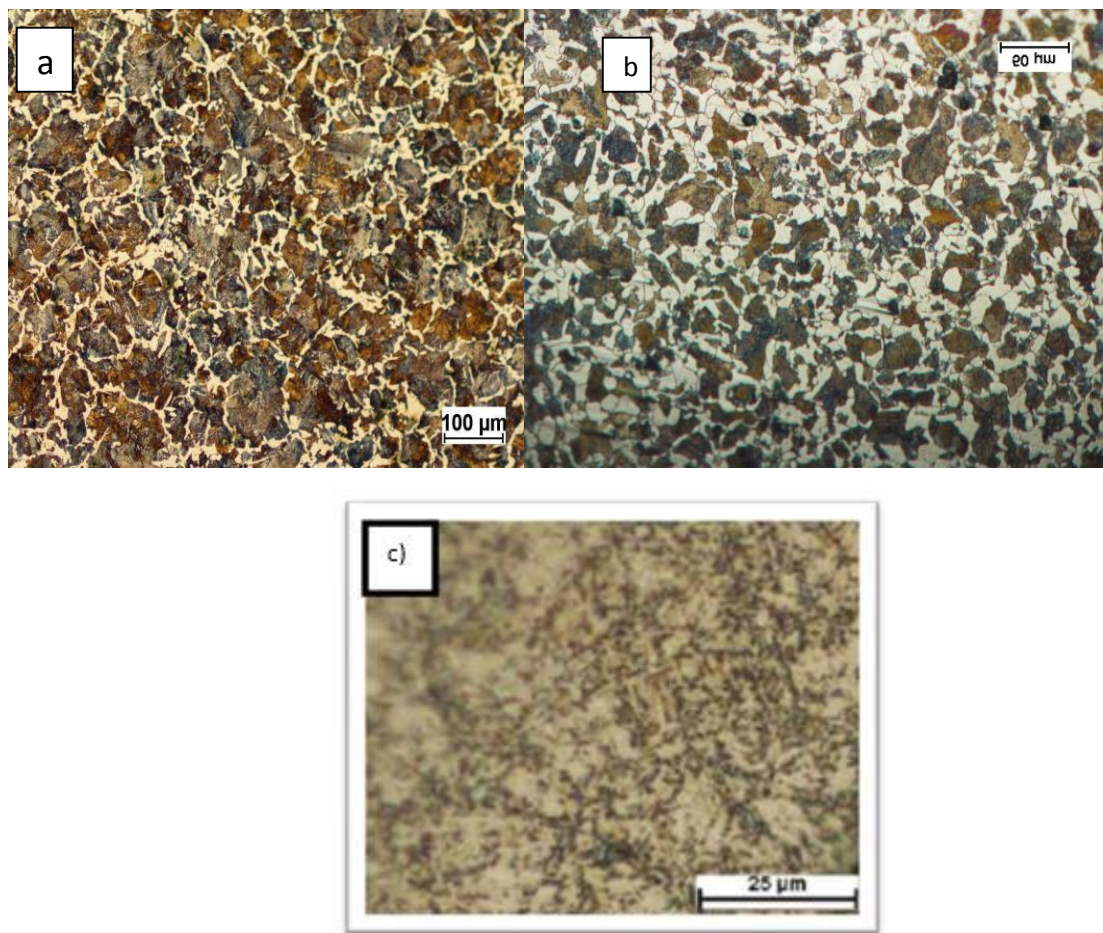


Figure .IV.1 : Micrographie optique de trois nuances (a: l'acier C45, b : l'acier St70, c : l'acier 42CD4).

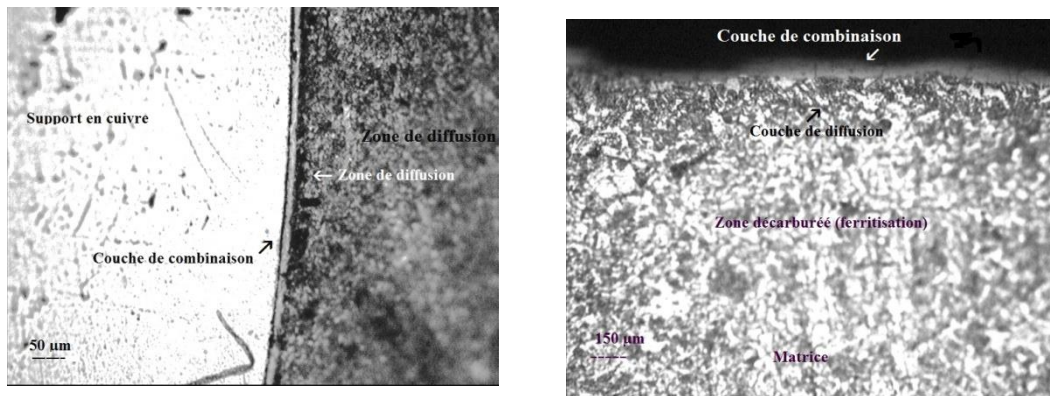
IV.2.2 : Traitement de nitruration par plasma :

a). Microstructure des couches nitrurées (acier C45) :

L'étude par microscopie optique du profil de structures au niveau des dentures depuis la surface jusqu'au cœur montre la formation en extrême surface d'une couche de combinaison d'épaisseur de 20µm, continue (couche blanche) suivie d'une très fine couche de diffusion accompagnée d'une zone décarburée (*présence uniquement de la ferrite*). L'épaisseur de la couche décarburée est de l'ordre de 100µm, au-delà de cette couche, nous pouvons remarquer

la zone riche en carbone qui a correspond à la structure du cœur (Perlite en présence de la ferrite).

Nous avons constaté approximité des zones non affectées par le phénomène de la décarburation, la formation d'une couche de combinaison continue d'épaisseur 20μm suivie d'une zone ferrito-perlitique (*Fig.IV.2*).



a)
b)
c)

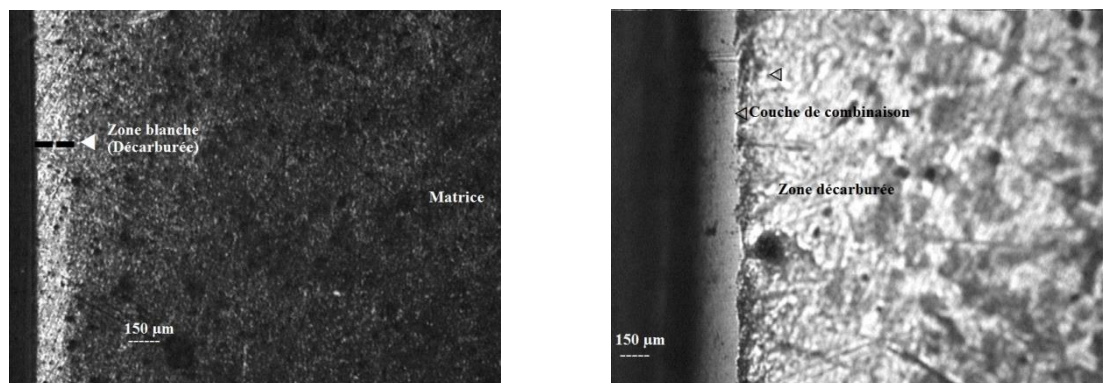
a)

b)

Figure IV.2(a,b). Microstructures de l'acier C45 ayant subi une nitruration ionique
b) C45 (test1), b) C45 (test2)

b). Cas de l'acier St70 :

L'étude par microscopie optique des coupes transversales des échantillons de l'acier St70 (test 1) a montré qu'en extrême surface une couche de combinaison très épaisse et continue suivie d'une couche de diffusion entièrement décarburee d'épaisseur de l'ordre 170μm (*Fig.IV3 a,b*).



a)

b)

Figure IV.3(a,b).Micrographies optiques (coupes transversales) de l'acier St70(test1) ayant subi une nitruration ionique

L'analyse de l'acier St70(test 2) a montré en surface la formation d'une couche de combinaison d'épaisseur 50µm suivie d'une couche de diffusion décarburée.

La structure du cœur correspond à une structure de revenu à haute température de type sorbitique (Ferrite en présence de carbures) caractérisée par une dureté de l'ordre 300HV

1c) Effet des éléments d'addition sur la croissance des couches nitrurées

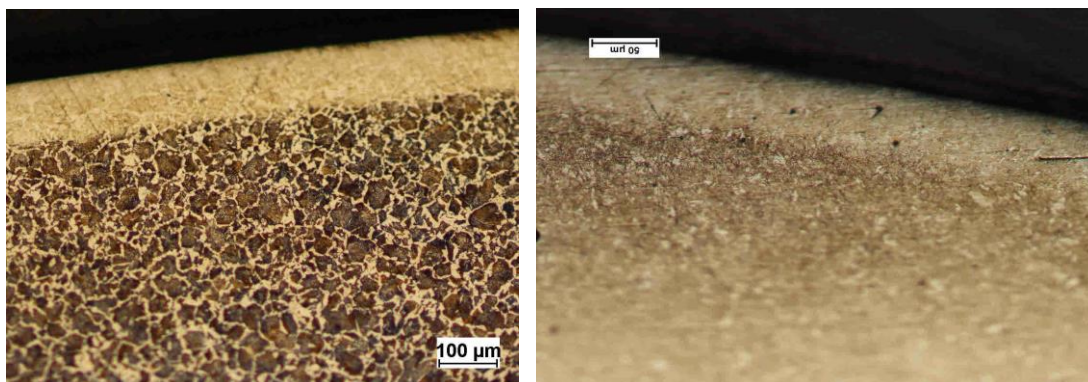
D'après les micrographies obtenues après nitruration par plasma (**figures IV.4a-c**), et **Tableau IV.6** qui représente les épaisseurs de la couche de combinaison et de diffusion.

Nous pouvons dire que l'épaisseur des couches de nitruration varie d'un acier à autre. Par exemple, il a été constaté que la couche de nitruration de l'acier St70 est plus épaisse par rapport à la couche de l'acier CK45 et l'acier 42CD4. Ceci est dû à l'effet des traitements thermiques préalables d'amélioration (trempe et revenu) et aussi l'effet des éléments d'alliage et comme le chrome, le molybdène qui freinent la diffusion de l'azote et par conséquent ralentissent la cinétique de croissance des couches.

Epaisseur (µm)	C45	42CD4	St70
Couche de combinaison	20	10	50
Couche de diffusion	142	140	170

Tableau IV.6 : Epaisseur de la couche de combinaison et de diffusion.

b



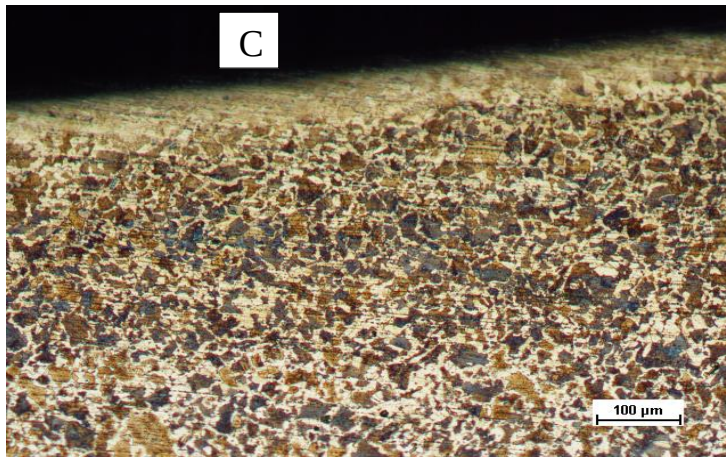


Figure .IV .4(a-c) : Micrographies optiques des nuances C45, 42CD4 et ST70 nitrurés par plasma a) : XC45, b) : 42CD4, c) : ST70.

Si l'atmosphère contient plus de 10% d'azote cela conduit à la formation très rapide des nitrures pendant le traitement. D'autres auteurs ont mis l'accent sur l'absence de nitrure en surface du matériau pouvant être le résultat de l'arrachement de la pulvérisation cathodique

LES paramètres : ‘‘Pression, tension, temps de maintien’’ de nitruration par plasma sont mal géré (nouvelle équipement installé) au niveau de l’entreprise ETRAG .Cela peut être due à la diminution du rapport N₂/H₂ et de la température ce qui conduit à une réduction considérable de l'épaisseur de la couche de combinaison ainsi que de la nature des phases formés.

1d) Origine de la décarburation

Généralement, les traitements thermiques et thermomécaniques opérés dans le domaine austénitique entre 850 et 1100°C, en atmosphère **oxydante** le carbone a tendance à s'échapper de la pièce en acier pour les couches extérieures qui deviennent moins riches en carbone que les couches centrales :

- le carbone situé en surface réagit avec l'atmosphère (voir *Diagramme. d'Ellingham*), par exemple dans une atmosphère contenant du **dioxygène**, on a $2C_{(s)} + O_2 \rightarrow 2CO\uparrow$; $C_{(s)} + O_2 \rightarrow CO_2\uparrow$; ceci «attire» le carbone situé dans la masse par **diffusion**. La décarburation entraîne un changement au niveau de la composition chimique au niveau de la surface et les sous couches entraînant systématiquement une ferritisation et une diminution considérable au niveau des caractéristiques de traction (R_e et R_m), et de dureté.

La décarburation peut être volontaire : c'est une manière de diminuer la teneur en carbone d'un acier. Cependant, cela concerne les couches superficielles de la pièce. La décarburation peut également être un phénomène « parasite », non recherché, durant des processus de travail à chaud comme le **laminage** à chaud ou bien le **recuit**. Le phénomène de la décarburation est d'autant plus prononcé dans le cas des produits traités dans des fours à atmosphère non contrôlée par exemple oxydante.

La décarburation est la réduction du taux de carbone, en surface d'un acier, qui survient pendant le traitement thermique. Il a été montré que la décarburation peut réduire la résistance à la fatigue des aciers à hautes caractéristiques (1650 MPa et au-delà) de 70 % à 80 % et pour les aciers de plus faibles caractéristiques (1000 MPa) de 45 à 55 %.

La décarburation est un phénomène de surface qui n'est pas lié à sa profondeur. Une profondeur décarburée de 75 μm peut être aussi néfaste pour la tenue en fatigue qu'une profondeur décarburée de 750 μm [15,16].

Lors de la nitruration par plasma la formation de la couche de combinaison est le résultat de plusieurs mécanismes qui peuvent intervenir simultanément ou successivement sous l'effet de deux principaux phénomènes à savoir la pulvérisation cathodique et l'adsorption. Dans ce cadre plusieurs études ont été fait et ils ont montré que l'influence de la composition de l'atmosphère gazeuse est très importante c'est à dire si la quantité d'azote disponible est inférieure à 10 % dans le gaz, il peut y avoir absence de la couche de combinaison [15-16] car la présence de cette couche dépend essentiellement de la concentration critique d'azote en surface

IV.3.Caractérisation mécanique

IV.3.1. Profil de microdureté

(Les *figures* IV.5 et IV.6 et IV.7) illustrant les profils de microdureté établis à partir de la surface des aciers C45, 42CD4 et St70 nitrurés par plasma à 570°C durant un temps de diffusion de 8h.

a) l'acier 42CD4 :

Pour l'acier 42CD4 après la nitruration par plasma la dureté de l'extrême surface est de l'ordre de 782 HV ce qui confirme la formation d'une couche de combinaison constituée de mélange de deux phases (γ' et ϵ) de type Fe_4N et Fe_{2-3}N ou de type $\text{Fe}_4(\text{C}, \text{N})$ $\text{Fe}_{2-3}(\text{C}, \text{N})$ de structure successivement cubique à faces centrées (cfc) dans laquelle un atome d'azote occupe le site octaédrique situé au centre de la maille.

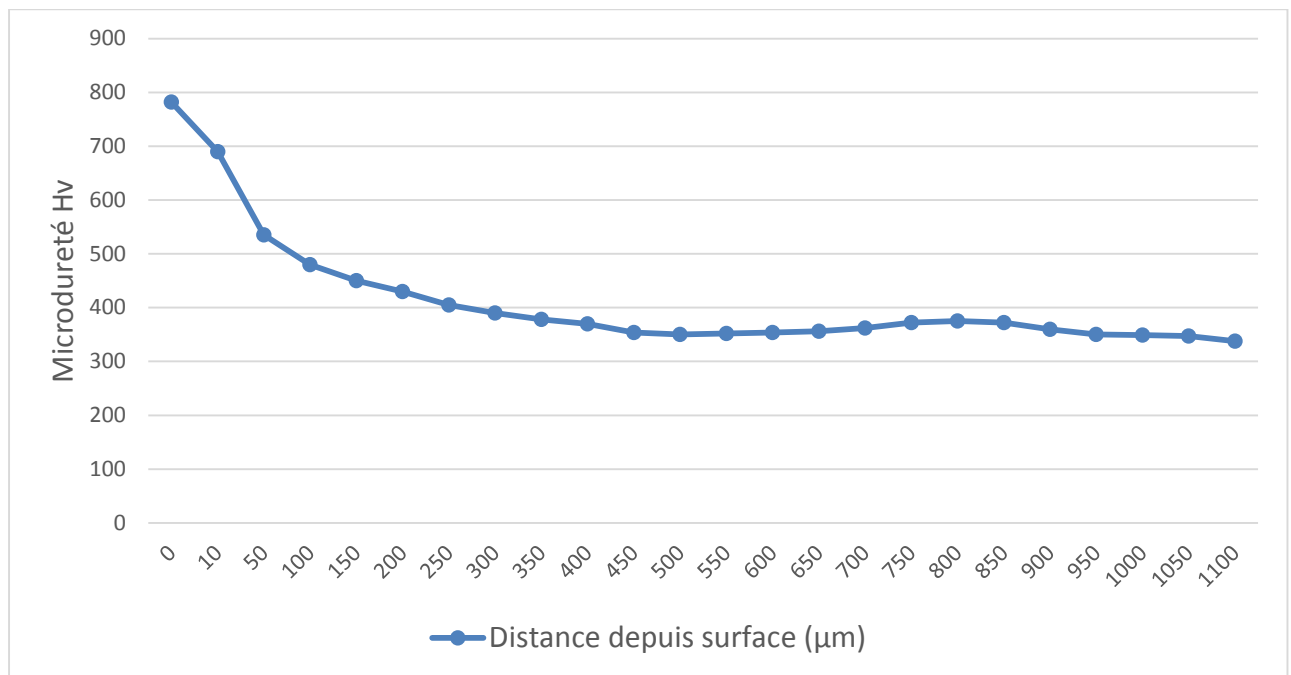


Figure.IV.5 : Profil de microdureté de l'acier 42CD4 nitruré par plasma.

D'après le profil de la figure.IV.5, nous remarquons que la dureté atteint un maximum vers les couches extrême surface puis diminue accidentellement jusqu'à atteindre un niveau de dureté de l'ordre (300 HV) puis elle se stabilise .

Cette chute de dureté est expliquée par le fait que la structure est décarburée et a entraîné une ferritisation de la zone

Conformément au diagramme d'équilibre Fe-Azote, ce nitrure est stable dans un domaine de composition qui, à 590°C, s'étend de 19 à 20,2 atomes % d'azote soit 5,5 à 5,75 % en masse et de structure hexagonale compacte (hc) dont les sites octaédriques sont occupés par des quantités d'atomes d'azote variables selon la composition du nitrure. Ce dernier est stable à partir de 24 atomes % à 570°C soit 7,35 % en masse. [5]. Concernant le durcissement de la couche de diffusion est lié à la présence des éléments carburigènes tels que le chrome et le molybdène de tel sorte en premier lieu, l'azote est en solution solide interstitielle ou combiné sous forme de nitrures ou carbonitrures (diffusion de carbone). En seconde l'affinité de combinaison de Cr (Mo) avec l'azote favorise la formation des précipités de nitrures finement dispersés dans la zone de diffusion. Ces précipitations conduisent à un durcissement important.

b) L'acier C45 :

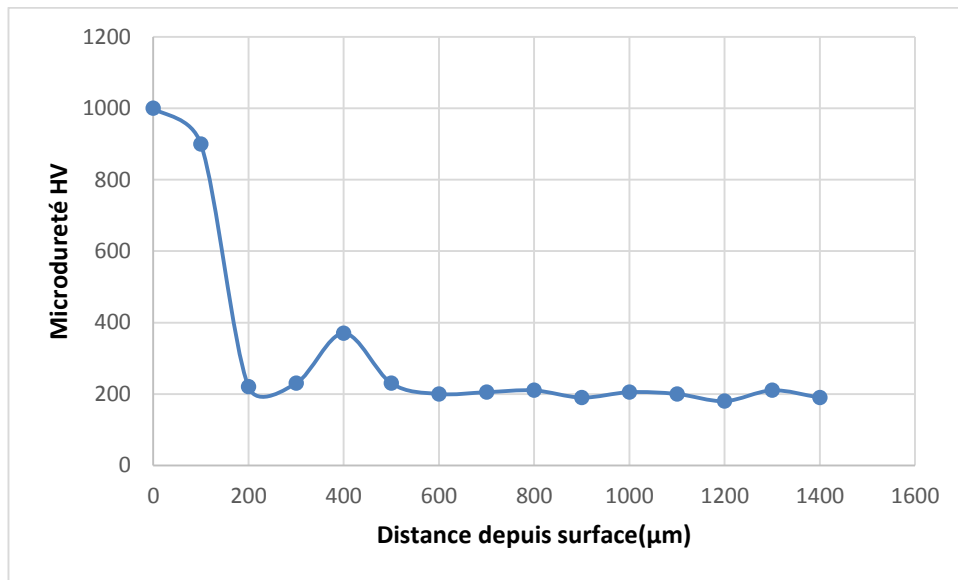


Figure.IV.6 : Profil de microdureté de l'acier C45 nitruré par plasma

Pour l'acier C45 après nitruration par plasma avec une couche de combinaison environ 20μm et une couche de diffusion environ 142μm ; La dureté en surface atteint 1000HV et chute jusqu'à 220HV, puis elle remonte à partir de 200μm pour atteindre un niveau de dureté qui correspond à la dureté du substrat.

D'une manière générale la variation de la microdureté suit la variation de la teneur de carbone et de l'azote.

Sous l'effet de présence des carbures dans l'acier, on peut observer des différences de cinétiques de croissance des couches liées à l'état de traitement thermique subi avant nitruration. À cet égard, et pour ceux qui participent à la formation de la couche de combinaison, à de gros carbures espacés correspondent de grandes distances de diffusion et, par conséquent, de plus longues durées de dissolution dans la phase ε.

c) L'acier St70 :

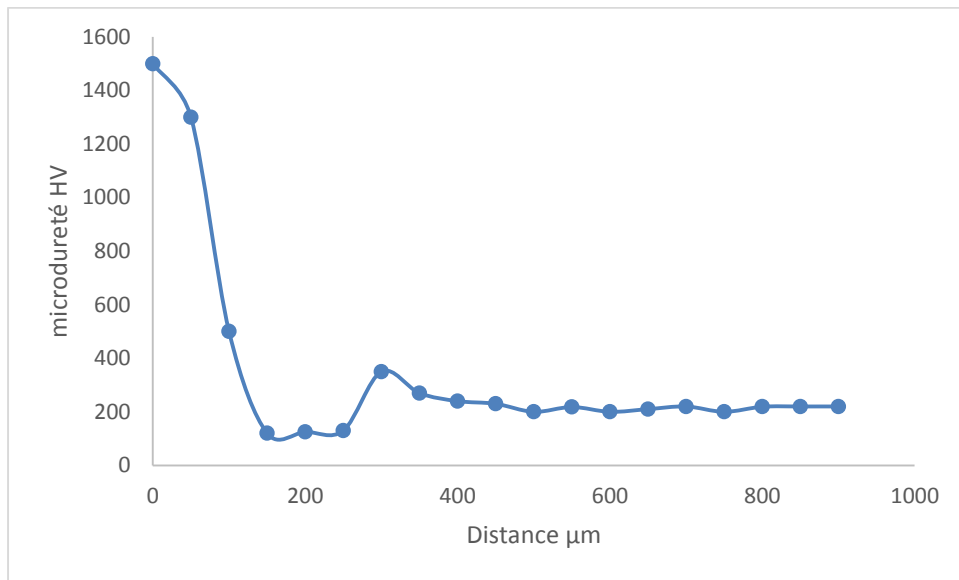


Figure.IV.7 : Profil de microdureté de l'acier st70 nitruré par plasma

Le profil de microdureté en fonction de la profondeur au niveau de zone denture, montre qu'au niveau de la zone de combinaison, la dureté atteint 1500HV, au-delà, on observe une diminution considérable de la dureté jusqu'à 120HV. Ce niveau de dureté correspond parfaitement au niveau de la dureté de la ferrite, preuve de l'existence d'une zone ferritisée suite au phénomène de la décarburation. Au-delà de cette zone, la dureté croît de nouveau pour atteindre un niveau de dureté de 350HV, puis elle se stabilise.

Le traitement des aciers à l'état recuit requiert généralement une durée de nitruration plus grande que celle d'un état trempé revenu conduisant à une répartition fine et dispersée des carbures. Bien évidemment, la nature de l'élément d'alliage influe sur la nature des phases formées et donc sur les duretés.

Pour ces raisons la dureté de l'acier 42CD4 après la nitruration ionique est faible par rapport à l'acier C45 et l'acier st70.

IV.3.2.Analyse par microscope électronique à balayage MEB :

Après la nitruration ionique, nous avons examiné les couches nitrurées sur les surfaces des échantillons sur une coupe transversale par microscopie électronique. (Fig.IV.8) montre l'existence sur la surface du St70 d'une couche nitrurée d'une épaisseur de 241.2 μm

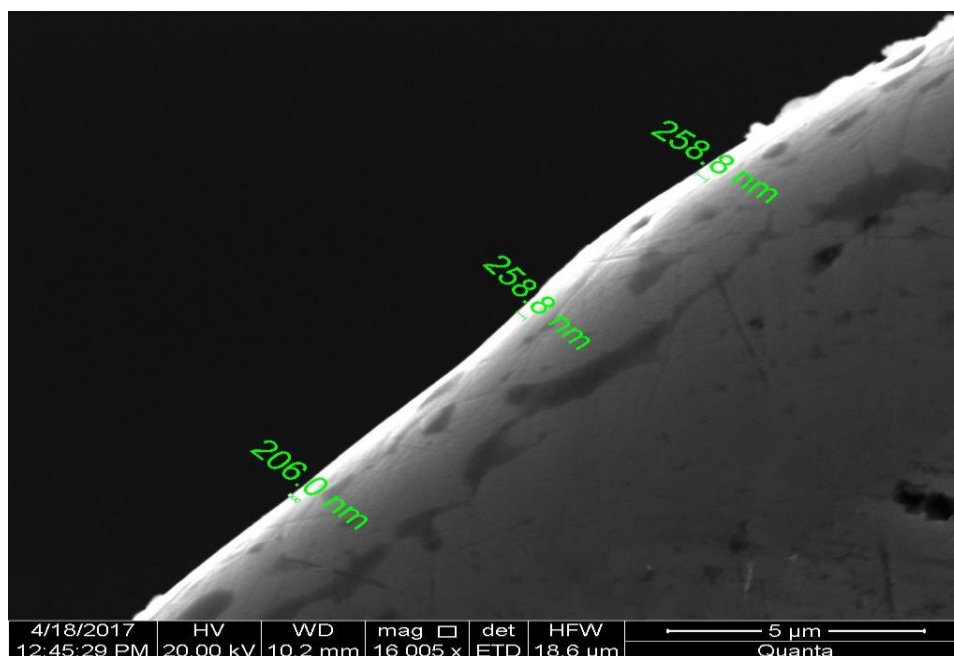


Figure IV.8.Micrographie par MEB de la coupe transversale du st70 nitruré

IV.3.3. La Rugosité :

Le tableau IV.7 montre les valeurs de la rugosité Ra des trois nuances d'aciers étudiés avant traitement thermochimique de nitruration et après nitruration par plasma.

Rugosité μm	C45	42CD4	St70
Après nitruration par plasma	1.161	0.90	0.57

Tableau IV.7 : la rugosité Ra des trois nuances avant et après traitements thermochimiques

D'après ces résultats on constate que la rugosité augmente lors de la nitruration ionique pour les trois nuances

Concernant l'acier C45, nous remarquons que la rugosité après traitement de nitruration par plasma est plus élevée par rapport les autre nuances (42CD4 et St70) bien qu'il y a un décapage de la surface par le gaz d'argon Ar et cela est dû probablement à l'état de surface initial de l'échantillon ou bien à l'arrachement de la couche de combinaison par la pulvérisation cathodique

Conclusion générale :

De ce travail découle les conclusions

1. La nitruration ionique appliquée aux aciers de construction St70, XC45 et 42CD4 à la température 550°C/8h dans un milieu N_2 en présence d' H_2 a provoqué en extrême surface une couche de combinaison (couche blanche) formée principalement de $Fe_{2-3}N + Fe_4N$ d'épaisseur allant de (50 μm).
2. Il a été constaté que la nitruration a été réalisée pour des structures de recuit (Ferrite et perlite) excepté pour l'acier St70 ou il a subi une amélioration (trempe suivie d'un revenu à haute température).

3. En sous couches, les aciers ont été décarburés ce qui a entraîné une baisse brusque de dureté qui correspond à la zone ferritisée.
4. La décarburation a entraîné une perte de carbone et la formation des zones douces. L'origine de cette décarburation de ces aciers provienne de l'atmosphère oxydante des fours.
5. Les structures qui doivent être recommandées pour être nitrurer, ce sont des structures qui doivent subir une trempe complète suivie d'un revenu à haute température favorisant une structure de type sorbitique ou troostitique granulaire et assurant un bon compromis entre résistance et ductilité.
6. Les structures ferrito-perlitique pour les aciers de nitruration ne sont pas recommandées.

Références bibliographiques

- 6) I.LAKHTINE, METALLOGRAPHIE ET TRAITEMENTS THERMIQUES DES METAUX ;Troisième édition, p259-262,1982
- 7) A.CORNET, F.HLAWKA. « Science des métaux. métallurgie mécanique du microscopique au macroscopique » ; Edition elipses, Paris 2010 ; p 275-281.
- 8) R.Léveque. « TRAITEMENTS ET REVETEMENTS DE SURFACE DES METAUX », 2007, édition Dunod ; Paris2007, p302-304.
- 9) O.BELAHSEN, « Comportement à la corrosion de l'acier 32CrMoV13, nitruré par procédé plasma », thèse de magistère, 2008.

10) N.REMDANE, « Etude de la résistance à l'usure abrasive et à la corrosion des couches nitrocarburées des aciers microalliés de types X70 et X52 », thèse de magistère, 2009.

11) D. Ghiglione, C. Louroux, C. Tournier. Pratique des traitements thermochimiques de nitruration, nitrocarburation et dérivés. Technique de l'ingénieur M1227 (2002).

- O.BELAHSEN, Etude comparative du comportement chimique et tribologique des aciers nitrurés, thèse de doctorat, decembre2013.
- HARKATI-BELAID Mounia, Relation microstructure-endommagement d'un acier à outil de travail à froid, thèse doctorat, 2010.
- ATHMANI Moussa, Amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermochimiques (Cémentation), thèse magistère, 2011.
- Robert LÉVÊQUE. Traitements superficiels des aciers à outils. Technique de l'ingénieur M1135.

[11]. A comparative study on the tribological behaviors of nitrided and sulfur-nitrided 35CrMo steel lubricated in PAO base oil with Mo DTC additive ,Wen Yue, Tribology International 44 (2011) 2029–2034.

□ Influence des éléments d'alliage sur le mécanisme de nano- précipitation et mécanisme de durcissement d'alliage modèle (Fe-Cr) et (Fe-Cr-C) et des aciers industriels nitrurés, G.CAROLINE, Juin 2006.

□ Tribologie, principes et solution industrielles, René Gras, Dunod , Paris ,2008.

□ Traitements et revêtements de surface des métaux, Robert L'évêque, Dunod , Paris ,2007

[15]. Properties and Selection, Metals Handbook, Eighth Edition, Vol. 1, pp. 223-224.

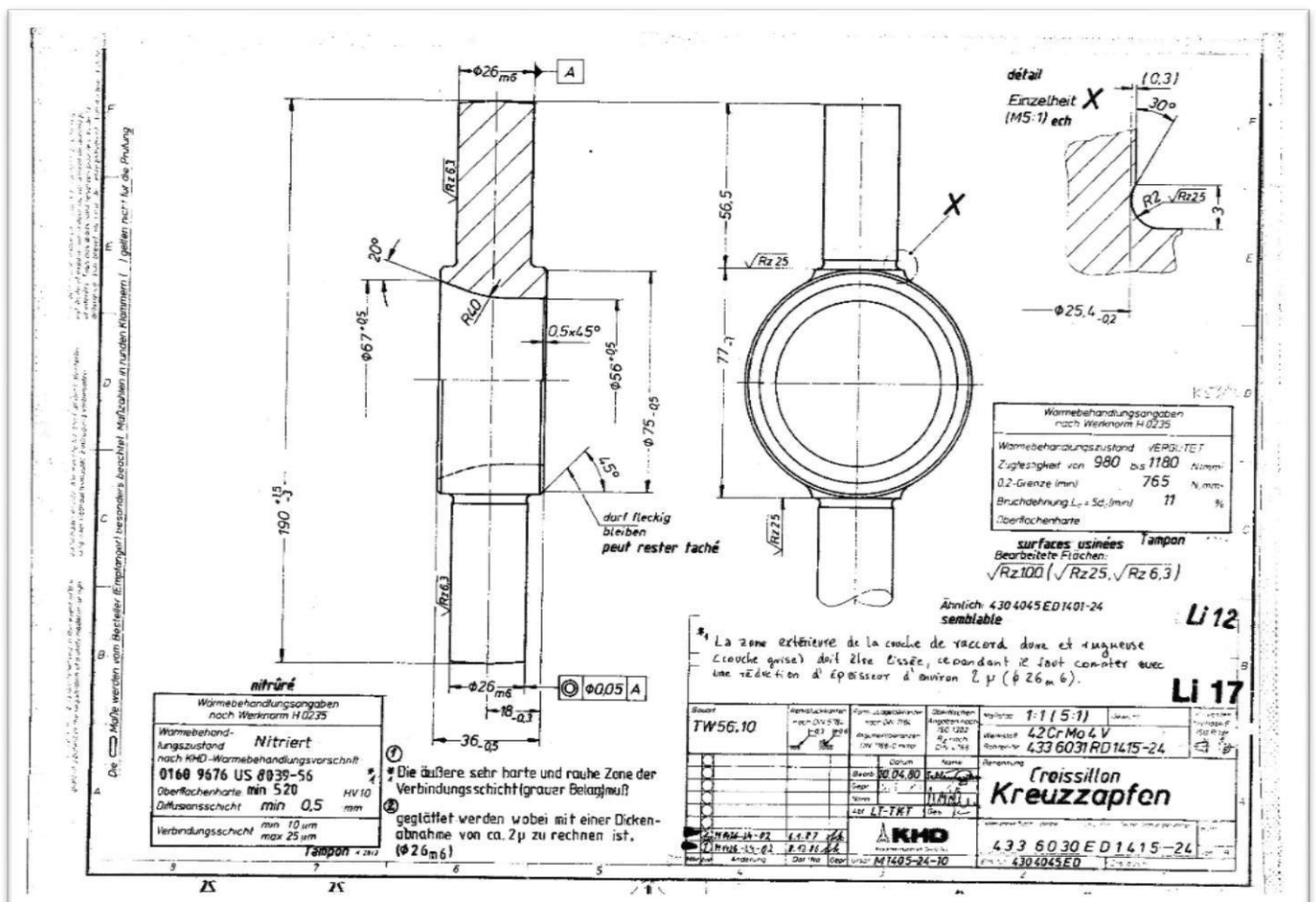
[16]. Jackson and Pochapsky; The Effect of Composition on the Fatigue Strength of Decarburized Steel, Translations of the ASM, Vol. 39, pp. 45-60. 3. Bush; Fatigue Test to Evaluate Effects of Shot Peening on High Heat Treat Steel - Lockheed Report No. 9761.

Annexe

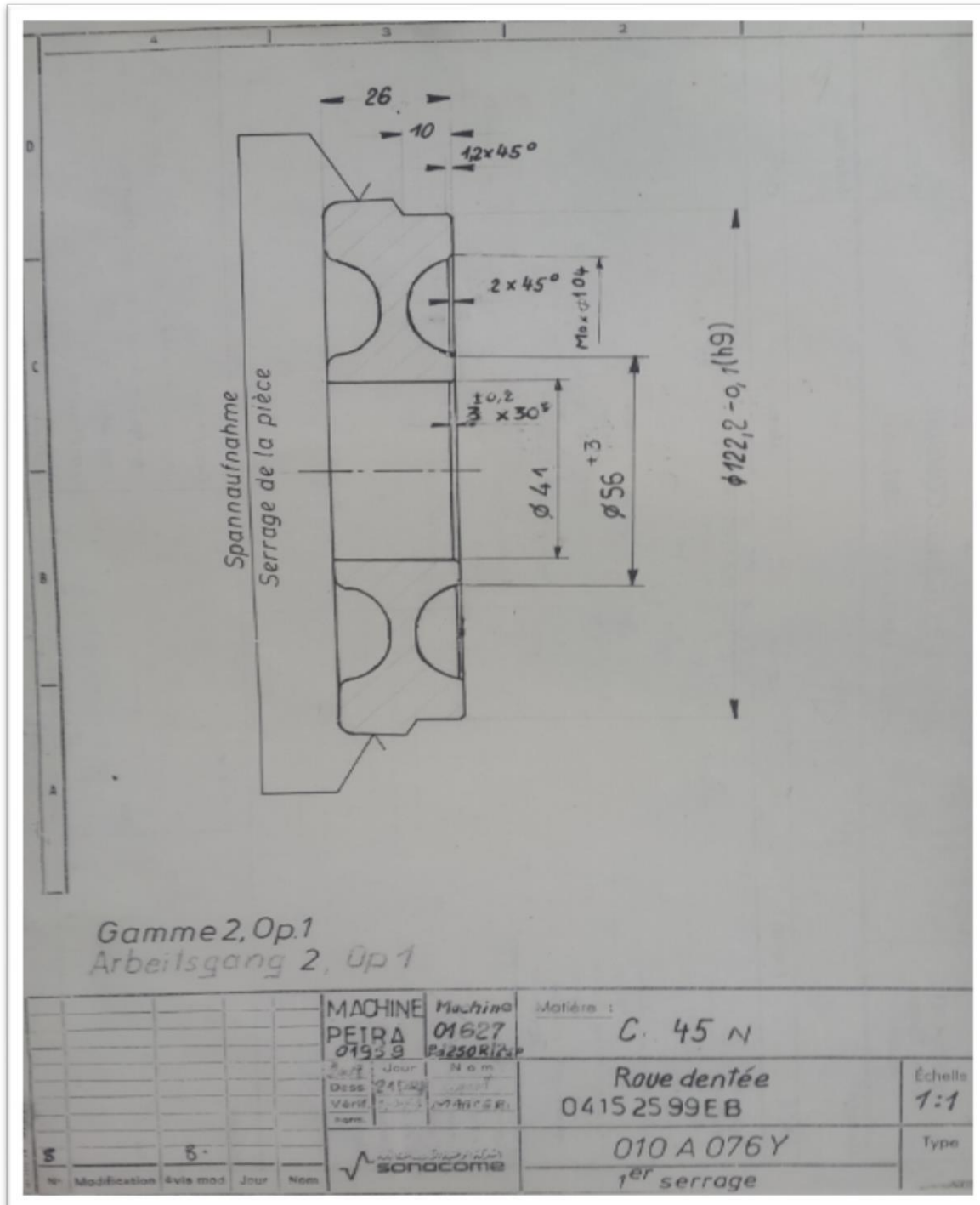
Annexe 1 : Affinité standard de formation des nitrures à 540°C

Phase	Affinité standard de formation ΔH (J/mole de N ₂)
Fe ₂ N	- 71,82
Fe ₄ N	- 28,58
Mo ₂ N	+ 33,15
CrN	+ 105,14
Cr ₂ N	+ 115,94

Annexe 2 : Dessin technique du croisillon différentiel



Annexe 3 : Dessin technique de la roue dentée



Annexe 4 : Paramètres de la nitruration ionique

Recette			Nom de charge : cromalloy		Numéro de recette : 52		Nom de recette : Etrag III		Client : etrag		Pièces : n.a.		RÜBIG Engineering 11/05/2015 09:49:22	
Chauffement				Étapes										
Température de charge	[°C]	400	Numéro d'étape	1	2	3	4	5	6	7				
WT3	[°C]	550	Nom d'étape	Sputter	Sputter	Sputter	Nitriding	Nitriding	Nitriding	Nitriding				
WT2	[°C]	550	Pression [mbar]	1	1	1	2.5	2.5	2.5	2.5				
WT1	[°C]	550	Température de charge [°C]	450	510	560	560	570	570	400				
Choix de thermocouple		0	Choix TC	0	0	0	0	0	0	0				
			H2 [l/h]	30	30	30	25	25	25	25				
			N2 [l/h]	4	4	4	75	75	75	75				
			Ar [l/h]	4	4	4	0	0	0	0				
			CH4 [l/h]	0	0	0	0	0	0	0				
Oxydation														
Température de charge	[°C]	500	Tension [V]	450	600	600	450	500	500	400				
Temps [hh:mm:ss]		01:00:00	Nombre impulsions nég.	1	1	1	1	1	1	1				
Post-oxydation		0	Nombre impulsions pos.	0	0	0	0	0	0	0				
Paramètres de commande														
Choix de thermocouple			Durée impulsions nég. [µs]	70	70	70	100	100	100	100				
			Durée impulsions pos. [µs]	4	4	4	4	4	4	4				
			Temps de pause [µs]	140	140	140	300	300	300	300				
			Durée d'étape [hh:mm:ss]	00:00:10	01:00:00	01:00:00	00:00:10	00:30:00	07:00:00	02:00:00				
WT3		0	Seuil de température	False	False	False	False	False	False	False				
WT2		0	Rampe	False	True	True	False	True	False	True				
WT1		0												
Alarm actif	TE1	True												
	TE2	True												
	TE3	True												
	TE4	True												
Turbine de convection														
		False												
Post-oxydation														
		False												

Annexe 5 : Composants de l'unité différentielle.

