

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la construction

Département Génie Mécanique



Mémoire

de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Sciences Des Matériaux

Thème

**Etude comparative de l'aptitude à la découpe
des tôles magnétiques**

M800-65A et M800-65D

(EI)

Proposé par l'EI :

M^r : BELABBAS - F

Dirigé par :

M^{me} : BAGUENANE - G

Réalisé par :

M^{elle} : CHEBINI-Siham

Promotion 2011

Remerciements

Arrivée à terme de mon travail, je tiens à remercier tout d'abord le Grand Dieu Tout puissant de m'avoir guidée tout au long de ce projet.

Je témoigne toute ma gratitude à ma promotrice

M^{me} G.BENALIA.BAGUENANE et mon co- promoteur

M^r BELABBAS-ferhat pour leur encadrement durant ce projet.

Je remercie également les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de jugé mon travail.

Je remercie également tout les responsables et personnel de l'Electro-Industrie de FREHA pour avoir accepté de m'accueillir au sein de l'entreprise dans le cadre du projet de fin d'étude.

Je remercie aussi les travailleurs de la bibliothèque de Génie Mécanique, les responsables de laboratoire SDM, les responsables de laboratoire de fonderie S.N.V.I, les responsables de laboratoire de la BCR, le responsable de laboratoire chimie de HASNNOUA

Je remercie aussi tous mes amis et les enseignants qui ont contribué à ma formation

Enfin, je témoigne ma gratitude et sympathie à toute personne qui m'ont aidée de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ❖ *Ma grand-mère ;*
- ❖ *Toute ma famille ;*
- ❖ *Toute ma promotion de SDM et mes amies les
informaticiennes Lila, Zahra, Nawal et Hayat*
- ❖ *Les étudiants de Génie Mécanique.*

Sommaire

Présentation générale de l'EI

1-Présentation de l'entreprise (Electro-Industrie).....	01
1-1 Situation géographique	01
1-2 Histoire.....	01
1-3 Organisation générale	01

La première partie : synthèse bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I- Les aciers	03
I-1 Définition.....	03
I-2 La métallurgie du fer	03
I-2-1 Obtention de la fonte	03
I-3 Diagramme d'équilibre fer carbone.....	04
I-3-1 Les éléments d'alliages dans l'acier.....	06
I-3-2 Influences des éléments d'alliages sur les propriétés des aciers.....	07
I-4 Les différents types d'aciers	08
I-5 Les normes définissant les aciers	10
II- Tôles magnétiques	13
II-1 Introduction	13
II-2 Définition du laminage.....	13
II-2-1 Le laminage à chaud	14
II-2-2 Le laminage à froid	14
II-3 Traitement thermique des aciers	15
II-3-1 Définition	15
II-3-2 La trempe	15
II-3-3 Le recuit	16

II-3-4 Le revenu	17
II-4 Les différentes qualités de tôles magnétiques élaborées en métallurgie .	18
II-4-1 Rôle de l'addition de silicium dans le fer	18
II-4-2 Les tôles fer-silicium à grains orientés (GO).....	18
II-4-3 Les tôles fer-silicium à grains non orientés (NO).....	19

Chapitre II : Le magnétisme dans les aciers

I- Relations d'électromagnétisme.....	20
II- Les différents matériaux magnétiques	23
II-1 Matériaux magnétique doux (ferromagnétique)	23
II-1-1 Le ferromagnétisme à l'échelle du cristal.....	24
II-2 Matériaux magnétique durs.....	24
II-3 Le moment magnétique dans les microstructures ferritique et perlitique.....	24
III- Les caractéristiques magnétiques normalisées des tôles (NO).....	25
IV- La courbe de première aimantation	27
V- L'hystérésis	28
V-1 L'hystérésis dans les matériaux doux et les matériaux durs.....	29
V-2 L'énergie d'anisotropie magnétocristalline	30

Chapitre III : Le procédé de découpage et le profil de la tôle découpée

I- L'opération de découpage	33
I-1 Définition.....	33
I-2 Principe de découpage.....	33
I-3 Dimensions de l'outil.....	34
I-4 Alimentation du métal	35
I-5 Comportement de matériau pendant l'opération de découpage	35
II- La lubrification en découpage.....	36
III- Les paramètres qui influent sur le procédé de découpage	37
III-1 Jeu entre le poinçon et la matrice.....	37
III-2 La géométrie de l'outil	39
III-3 Coefficient de frottement	39
III-4 Epaisseur de la tôle.....	40

III-5	Vitesses de découpe	40
III-6	Température de découpe	41
IV-	La force de découpe	41
V-	La force de jonc annulaire.....	42
VI-	Force contre-poinçon.....	42
VII-	Profil du bord de découpe	42

Chapitre IV : Essais mécaniques, magnétiques et microstructures

I-	Essais mécaniques.....	45
I-1	La traction.....	45
I-1-1	Principe de l'essai	46
I-1-2	L'éprouvette de traction	46
I-1-3	La machine de traction.....	48
I-1-4	Les conditions d'essai de traction	48
I-1-5	Grandeurs mesurées	48
I-1-6	Détermination des caractéristiques mécaniques	50
I-2	La dureté	50
I-2-1	Principe de l'essai de la dureté.....	51
I-2-2	Les conditions d'essai de la dureté	52
I-2-3	Essais de Microdureté	52
II-	L'analyse chimique.....	52
III-	La micrographie	53
III-1	Examen par microscopie optique (MO)	53
III-2	Examen par microscopie électronique à balayage (MEB)	55
III-3	Examen par microscopie à transmission (MET)	56
III-4	Paramètres microstructuraux	57
III-5	Importance de la métallographie	58
IV-	Différents types de critères qui influent sur les propriétés mécaniques.....	58
IV-1	Critères métallographiques	58
IV-2	Critères fondés sur les efforts de formage	59
IV-3	Critères de ductilité.....	59

IV-4	Influence de la microstructure sur les critères.....	59
IV-4-1	La teneur en carbone	59
IV-4-2	Composition de différents types de microstructure	59
IV-4-3	Rôles des éléments d'additions	59
IV-4-4	Autres paramètres.....	60
V-	Essai magnétique	60
V-1	Mesure des pertes magnétiques	60
V-1-1	Le cadre Epstein	60
V-1-2	Grandeurs mesurées.....	61

La deuxième partie : Techniques expérimentales, Résultats et discussions

Chapitre V : Techniques expérimentales

I-	Présentation de la tôle à étudier.....	65
I-1	Tôles magnétiques livrée à l'état semi-fini	65
I-2	Tôles magnétiques à grains non orientés livrées à l'état fini	65
II-	La composition chimique.....	66
III-	Essai de traction	67
IV-	Essai de dureté	68
V-	Examens micrographiques.....	69
VI-	Essai de microdureté	71
VII-	Essai de découpage	72
VIII-	Essai magnétique	73

Chapitre VI : Résultats et interprétations

I-	La composition chimique.....	76
II-	Essai de traction	77
III-	Essai de dureté	85
IV-	Examens micrographiques.....	89
IV-1	La microstructure de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D).....	89
VI-2	Analyse du profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).....	103

V-	La microdureté.....	108
VI-	Essai magnétique	110

«Listes Des Figures »

La première partie : synthèse bibliographique

Figure I-1 : Diagramme d'équilibre fer-cémentite	05
Figure I-2 : Influence des éléments d'alliage sur la température de la transformation eutectoïde d'équilibre	07
Figure I-3 : Principe de laminage.....	14
Figure I-4 : Les différentes microstructures d'acier	16
Figure I-5 : Traitement de revenu	18
Figure II-1 : Les domaines d'un cristal ferromagnétique.....	24
Figure II-2 : Microstructures magnétiques de la ferrite et de la perlite.....	25
Figure II-2 : Courbe de première aimantation d'un matériau ferromagnétique.....	27
Figure II-4 : Cycle d'hystérésis	28
Figure II-5 : Cycle d'hystérésis, Matériaux doux et durs.....	30
Figure II-6 : Représentation schématique de l'orientation des moments magnétiques par rapport au réseau cristallin.....	31
Figure III-1 : Découpage d'une tôle	33
Figure III-2 : Outil de découpage	34
Figure III-3 : Dévidoir à berceau.....	35
Figure III-4 : Courbe effort-pénétration lors d'une opération de découpage....	36
Figure III-5 : Jeux et dépouilles.....	38
Figure III-6 : Matrices et poinçons.....	39
Figure III-7 : Tôle découpée avec une vitesse traditionnelle et avec une grande vitesse	40
Figure III-8 : Profil de découpe lors du poinçonnage	43
Figure IV-1 : Courbe brute de traction	45

Figure IV-2 : Formes générale des éprouvettes de traction.....	46
---	-----------

Figure IV-3 : Courbes de traction force-allongement.....	49
---	-----------

Figure IV-4 : Microscope optique (MO)	53
--	-----------

Figure IV-5 : microscope électronique à balayage (MEB).....	55
--	-----------

Figure IV-6 : microscope électronique à transmission (MET)	56
---	-----------

Figure IV-7 : Mode d'assemblage de N bandes unitaire en circuit Epstein	61
--	-----------

La deuxième partie : Techniques expérimentales, Résultats et discussions

Figure V-1 : Eprouvette de traction normalisée non proportionnelle.....	67
--	-----------

Figure V-2 : Machine de traction	68
---	-----------

Figure V-3 : Duromètre.....	69
------------------------------------	-----------

Figure V-4 : Microduromètre.....	72
---	-----------

Figure V-5 : Presse Schuler.....	73
---	-----------

Figure V-6 : Cadre Epstein	74
---	-----------

Figure V- 7: Interface du logiciel permettant de commander le cadre Epstein	75
--	-----------

Figure VI-1 : Courbes de traction des éprouvettes N° 6et 7 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens L de laminage.....	79
--	-----------

Figure VI-2 : Courbes de traction des éprouvettes N° 8, 9 et 10 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens L de laminage.....	80
---	-----------

Figure VI-3 : Courbes de traction des éprouvettes N° 6, 7 et 8 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens T de laminage.....	81
--	-----------

Figure VI-4 : Courbes de traction des éprouvettes N° 9 et 10 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens T de laminage.....	82
--	-----------

Figure VI- 5: Courbes de traction des éprouvettes N° 7 et 8 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens 45° de laminage.....	83
Figure VI-6 : Courbes de traction des éprouvettes N° 9 et 10 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65D), dans le sens 45° de laminage	84
Figure VI-7 : Courbes de traction des éprouvettes N° 2 et 3 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens L de laminage.....	87
Figure VI-8 : Courbes de traction des éprouvettes N° 4 et 5 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens L de laminage.....	88
Figure VI-9 : Courbe de traction de l'éprouvette N° 5 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens T de laminage	89
Figure VI-10 : Courbe de traction de l'éprouvette N° 6 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens T de laminage	90
Figure VI-11 : Courbe de traction de l'éprouvette N° 9 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens T de laminage	91
Figure VI-12 : Courbe de traction des éprouvettes N°6 et 7 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens 45° de laminage.....	92
Figure VI-13 : Courbe de traction de l'éprouvette N° 8 et 9 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens 45° de laminage	93
Figure VI-14 : Microstructures de la tôle livrée à l'etat fini(M800-65A)	99
Figure VI-15 : Microstructures de la tôle livrée à l'etat fini (M800-65D) non recuit	100
Figure VI- 16: Microstructures de la tôle livrée à l'etat semi-fini(M800-65D) après recuit.....	100
Figure VI-17 : Evolution de la microstructure magnétique sous contrainte.....	101
Figure VI-18 : Image obtenue par analyse au MEB de la dent d'une feuille statorique de la tôle (M800-65D)	102
Figure VI-19 : Image obtenue par analyse au MEB de la dent d'une feuille statorique de la tôle (M800-65A)	102
Figure VI-20 : Image obtenue par analyse au MEB de Faciès de rupture de la feuille statorique de la tôle (M800-65A).....	104
Figure VI-21: Image obtenue par analyse au MEB d'épaisseur de Faciès de rupture la de la feuille statorique de la tôle (M800-65A)	104

Figure VI-22 : Profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) coupée à une vitesse $V_1=V_0$	105
Figure VI-23 : Profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) coupée à une vitesse $V_2=2V_0$	106
Figure VI-24 : Profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) coupée à une vitesse $V_3=2,5V_0$	106
Figure VI-25 : Courbe de la variation de l'épaisseur de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) en fonction de la vitesse de découpe.....	107
Figure VI-26: Dent prélevée de la feuille statorique	108
Figure VI-27: Dimension de la dent de la feuille statorique	108
Figure VI-28 : Courbe de la microdureté des dents des feuilles statorique de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la (M800-50A)	109
Figure VI-29 : Courbe de l'induction magnétique de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de champ magnétique (Annexe D)	111
Figure VI-30 : Courbe de la perméabilité magnétique de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de champ magnétique (Annexe D)	111
Figure VI-31 : Courbe des pertes totales spécifiques magnétiques de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de l'induction magnétique (Annexe D).....	112
Figure VI-32 : Courbe des pertes totales spécifiques magnétiques de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de l'induction magnétique (Annexe D).....	113

«Listes Des Tableaux »

La première partie : synthèse bibliographique

Tableau I-1 : Types d'aciers au carbone.....	08
Tableau I-2 : Les désignations dans le cas où le premier symbole est une lettre	10
Tableau I-3 : Principe de fabrication des tôles magnétiques non orientées selon les deux technologies en usage	20
Tableau II- 1 : Caractéristiques magnétiques normalisées des tôles.....	26
Tableau IV-1 : Dimensions des éprouvettes.....	47
Tableau IV-2 : Tableau de différentes méthodes de mesure de la dureté	51
Tableau IV-3 : Réactifs d'attaque chimique.....	54

La deuxième partie : Techniques expérimentales, Résultats et discussions

Tableau V-1 : Composition chimique du la Tôle (M800-65D) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI	66
Tableau V-2 : Composition chimique du la Tôle (M800-65A) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI	66
Tableau VI-1 : Composition chimique du la Tôle (M800-65D) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI	76
Tableau VI-2 : Composition chimique du la Tôle (M800-65A) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI	76
Tableau VI-3 : Caractéristiques mécanique de la tôle livrée à l'état semi fini (M800-65D) obtenu par l'essai de traction dans les différentes directions du laminage	77
Tableau VI-4: Le rapport R_c/R_m des éprouvettes dans les différentes directions de laminage	78

Tableau VI-5 : Caractéristiques mécanique de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) obtenu par l'essai de traction dans les différentes directions de laminage	85
Tableau VI-6: Le rapport R_e/R_m des éprouvettes dans les différentes directions de laminage	86
Tableau VI-7: Récapitulatif des résultats de l'essai de traction	93
Tableau VI-8 : Résultats de l'essai de dureté Vickers sur la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).....	95
Tableau VI-9 : Résultats de l'essai de dureté Vickers sur la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) non recuite	96
Tableau VI-10 : Résultats de l'essai de dureté Vickers sur la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) recuite	97
Tableau VI-11: Récapitulatif des résultats de l'essai de dureté	98
Tableau VI-12 : Valeurs de la variation de l'épaisseur des zones arrachée et coupée en fonction de la vitesse.....	107
Tableau VI-13 : Résultats obtenus de la microdureté	109
Tableau VI-14 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant la direction longitudinale (direction de laminage) et suivant le sens transversal pour une autre bande.....	110
Tableau VI-15 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant une seule direction pour les deux bandes pour la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).....	114
Tableau VI-16 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant une seule direction pour les deux bandes pour la tôle livrée à l'état semi- fini (M800-65D) recuite.....	114
Tableau VI-17 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant une seule direction pour les deux bandes pour la tôle livrée à l'état semi- fini (M800-65D) non recuite.....	115
Tableau VI- 18 : Récapitulatif de l'anisotrope magnétique de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) recuite et non recuite	115

Problématique

La construction des machines électrique, générateurs, transformateurs, moteurs, ...etc, nécessite l'emploi des matériaux magnétiques qui repose sur l'utilisation des propriétés magnétiques du fer et des aciers qui représentent pratiquement les seuls matériaux magnétique utilisés en construction électrique sous forme de tôles magnétiques qui s'empilent sous la forme de paquets rotorique et statorique pour former des circuits magnétiques source principale de magnétisme (planche I, II) .

Dans le but de réaliser ces circuits magnétiques l' Electro-Industrie utilisait pour des moteurs jusqu'à une certaine puissance des tôles magnétiques en acier non allié ce qu'on appelle feuillards livrés à l'état semi fini c'est- à- dire sans recuit final, de sorte que l'opération de finition s'effectue au niveau de l'entreprise après l'opération de découpage, mais suite à la non disponibilité du four pour effectuer le recuit, l'Electro-Industrie réalise actuellement ces circuits avec une nouvelle tôle qui est une tôle magnétique à grains non orientés livrées à l'état fini.

La découpe de ce produit de substitution (planche III, IV) s'effectue avec l'outil qui initialement avait été conçu pour le feuillard, le procédé de découpage engendre :

- ➔ Des bavures sur les tôles découpées ;
- ➔ Non maintien des dimensions des tôles découpées dans les limites de tolérance exigées ;
- ➔ Planéité des tôles ;
- ➔ Le comportement des déchets dans les ouvertures des matrices....etc.

Ce qui est dû à certains paramètres de construction de l'outil de découpe qui peut connaître des problèmes de casse, d'écaillage et d'usure progressive des parties actives. Le jeu de découpe est un paramètre important car il exerce une action directe sur l'aspect de la pièce découpée, comme on peut s'intéresser aussi au :

- ➔ coefficient de frottement tôle-outil ;
- ➔ épaisseur de la tôle, et, aussi ;
- ➔ la vitesse de découpe, et ;
- ➔ la température du milieu ambiant.

Alors l'aptitude à la découpe avec cet outil sera très mauvaise ce qui engendrent une dégradation des propriétés magnétiques des tôles, ce phénomène nuit au rendement de la machine électrique.

L'objectif de ce travail est de faire une étude comparative de l'aptitude à la découpe entre le feuillard livré à l'état semi-fini et la tôle magnétique livrée à l'état fini car une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu lors de la découpe, nous permettra d'améliorer l'aptitude à la découpe de la tôle magnétique livrée à l'état fini.

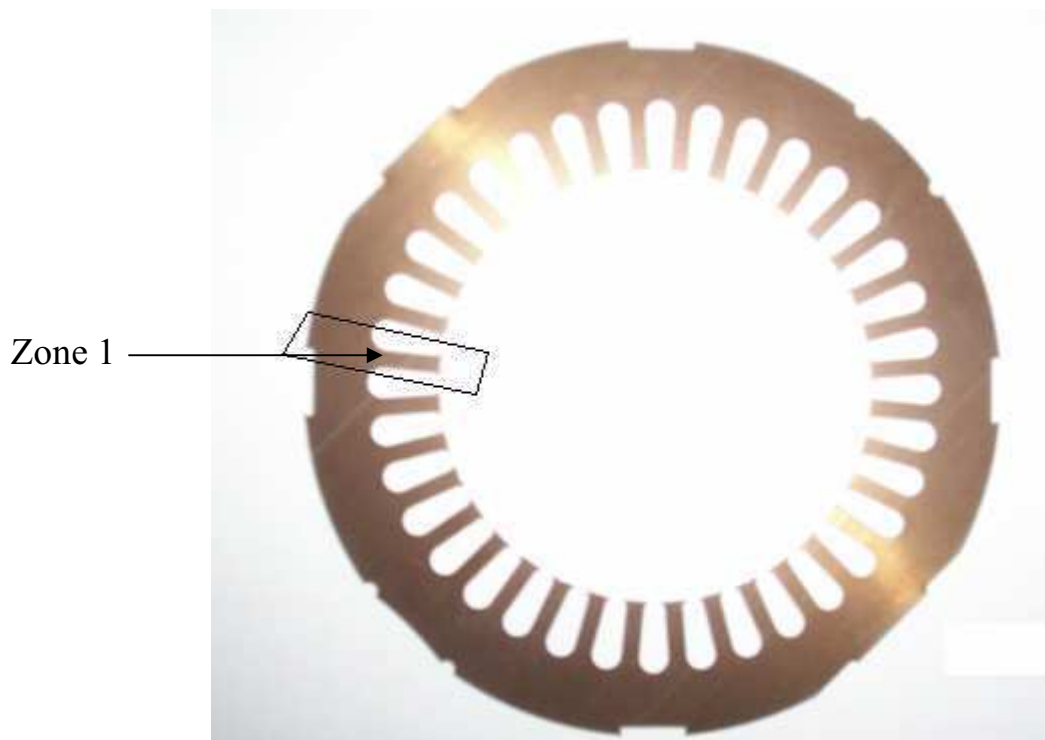


Planche I : Paquet de feuilles statorique.



Paquet des
feuilles
rotorique

Planche II : Paquet de feuilles statorique.



Zone 1

Planche II : Feuille statorique pour circuit magnétique.



Planche IV : Feuille rotorique pour circuit magnétique.

Dans le but de fournir des machines dont les qualités techniques sont garanties, les ingénieurs de laboratoire physique de l'Electro-Industrie sont obligés de faire une démarche pour étudier l'aptitude à la découpe de la nouvelle tôle livrée à l'état fini (M800-65A).

Le découpage de cette tôle joue un rôle très important sur le produit fini, qui est réalisé sur des presses à découpe, et tout changement dans le produit rends l'outil inutilisable, car les procédés de découpe utilisent des techniques qui déforment plastiquement le matériau jusqu'à la rupture finale, il engendre ainsi une dégradation inévitable des caractéristiques magnétiques des tôle essentiellement au bord découpé.

Les pièces découpées de cette tôle sur les quelles porte notre étude, sont les feuilles statorique et rotorique (planche III, IV), qui forment des circuits magnétiques pour des moteurs électriques.

L'objectif de ce travail vise à étudier l'aptitude à la découpe de la tôle magnétique livrée à l'état fini (M800-65A), ce mémoire se compose de deux parties :

- La première partie est consacrée à la synthèse bibliographique ;
- La deuxième partie présente les matières premières et les techniques expérimentales ainsi que l'interprétation des résultats.

La première partie est divisée en quatre chapitres :

Le premier est consacré aux généralités sur les aciers.

Dans le second chapitre, on s'intéresse au magnétisme dans les aciers. Le procédé de découpage et le profile de la tôle découpée seront abordés dans le troisième chapitre. Et dans le quatrième chapitre ceux sont les essais mécaniques, magnétiques et les observations microstructurales.

La seconde partie se compose de deux chapitres :

Le premier (chapitre V) fait le point sur la nature des matériaux utilisés, les dispositifs, la méthode expérimentale et l'ensemble des techniques de caractérisation telles que la microscopie optique(MO), la microscopie électronique à balayage(MEB), la microdureté, et un essai magnétique avec le cadre Epstein (réalisé à l'E.I).

Le second chapitre (chapitre VI) est consacré à la présentation des principaux résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

Le travail est clôturé par une conclusion générale qui répond à notre problématique posée dans le début de ce travail.

Présentation de l'entreprise

1- Présentation de l'entreprise (Electro-Industrie) :

1-1 Situation géographique :

L'Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques (EI) est une entreprise publique économique, elle est située à environ 130 Km à l'est de la capitale Alger et à 30 Km à l'est de la ville de TIZI OUZOU et à 3 Km à l'ouest de la ville d'Azazga. Sa construction a débutée en Avril 1977, sa superficie totale est de 40000 m².

1-2 Histoire :

Electro-industries est créée le 01/12/1998 comme entreprise publique économique (EPE Electro-industries /SPA) issue de la restructuration de l'ex ENEL (Entreprise nationale des industries électrotechniques), cette dernière est native de la réorganisation de l'ex SONELEC (société nationale des industries électriques).

1-2 Organisation générale :

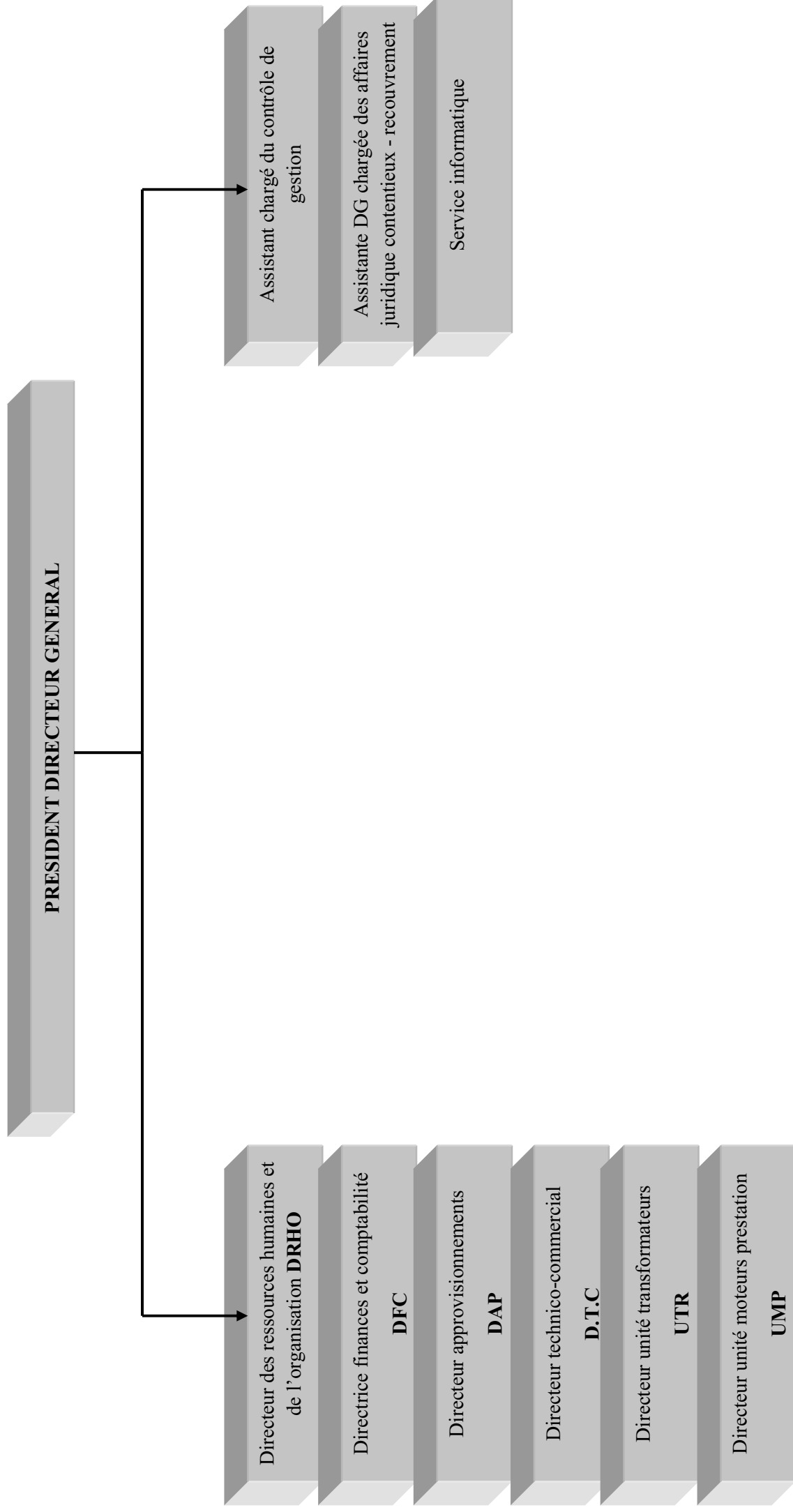
L'Electro-Industries est composée de deux (02) unités ; toutes situées sur un même site :

- ❖ Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT ;
- ❖ Unité de fabrication de Moteurs Electriques, Alternateurs et Prestations Techniques.

Les produits fabriqués par l'ENEL sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE. La production actuelle de l'entreprise est écoulee sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire annuel de 1,8 Milliards de Dinars. La capacité de production du transformateur d'EI couvre les besoins du marché local à 70% environ et ces ventes de moteurs représentent 30% de la capacité de production (seul fabricant de ces produits en Algérie).

L'entreprise emploie un effectif de 780 travailleurs dont 14% de cadres, 31% de maîtrise et 53% d'exécution.

ORGANIGRAMME DIRECTION GENERAL DE L'ELECTRO -INDUSTRIE D'AZAZGA



La première partie

Synthèse Bibliographique

Chapitre - I

Généralités sur les aciers

Introduction

Dans ce premier chapitre, on va s'intéresser à la matière première de notre produit qui est un des alliages à base de fer qui jouent et continuent à jouer un rôle capital dans l'industrie en général et l'électrotechnique en particulier, le fer est un matériau parmi les plus abondants de l'écorce terrestre, connu et préparé depuis des millénaires avec des techniques sans cesse améliorées, en plus de ses qualités mécaniques, il se révèle de surcroît, possédait des qualités magnétiques exceptionnelles et sans le fer, les premiers pas de l'électrotechnique auraient été bien plus lents.

I- Les aciers :

I-1 Définition :

Le fer pur est très rare, mais il se trouve sous forme d'alliage à base de fer, avec un pourcentage en carbone d'environ 0,02% à 2,14% en masse, c'est un acier, il peut être :

- ❖ Hypoeutectoïde : si sa teneur en carbone est inférieure à 0,85% ;
- ❖ Eutectoïde : si sa teneur en carbone est égale à 0,85% ;
- ❖ Hypereutectoïde : si sa teneur en carbone est supérieure à 0,85% [1]

I-2 La métallurgie du fer (sidérurgie) :

La sidérurgie est la métallurgie du fer, elle consiste à traiter le minerai de fer pour obtenir des fers industriels, les aciers et les fontes.

I-2-1 Obtention de la fonte :

❖ Minerai :

il est formé d'oxydes (l'oxyde magnétique Fe_3O_4 , l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique hydraté ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ou du carbonate mélangé à une gangue (FeCO_3 associé à une gangue MgCO_3 , CaCO_3).

❖ Traitement mécanique des minerais :

Concassage : les concasseurs rotatifs ou à mâchoires écrasent le minerai brut.

Criblage : les cribleurs (tamis vibrants) trient les produits concassés.

Triage : pour les minerais magnétiques, on peut séparer par magnétisme l'oxyde de la gangue.

Le broyage : les broyeurs à cylindres, boulets ou centrifuge réduisent les fines à moins de 10mm pour les traiter dans les chaînes d'agglomération.

❖ Agglomération :

L'opération consiste à transformer par cuisson un mélange de poussières, de coke, de fines, de minerai fin. Le mélange déposé dans des compartiments sur la chaîne est allumé et la combustion se poursuit sous l'action de l'air aspiré pendant la transition de la chaîne. En fin de parcours, l'aggloméré tombe sur un brise-mottes ou un concasseur puis, un crible permet l'élimination des fers qui sont recyclés.

❖ Combustible :

Le combustible utilisé dans un haut fourneau est le coke métallurgique qui, permet la fusion du minerai et de la gangue puis réduction par son carbone, l'oxyde de fer.

❖ Le haut fourneau :

Sert à fabriquer la fonte à partir des matières premières précédentes.

❖ Convertisseur à l'oxygène :

La fonte en fusion est versée sur un lit de ferraille. On brûle les éléments indésirables (carbone et résidus) contenus dans la fonte en insufflant de l'oxygène pur. On récupère les résidus (la scorie). On obtient de l'acier liquide, qui est versé dans une poche.

Puis, on passe aux procédés d'affinage selon les caractéristiques de l'acier qu'on veut obtenir, parmi ces procédés :

- Procédé Martin ;
- Procédé au four électrique à arc ;
- procédé O.L.P (Oxygène-Lance-Poudre) ;
- Procédé Thomas.

I-3 Diagramme d'équilibre fer-carbone :

Une bonne connaissance et maîtrise du diagramme d'équilibre Fer -Carbone est très important, car il nous permet de connaître les microstructures de notre matériau, températures de transformation, leurs compositions chimiques et leurs pourcentage en phase et aussi une bonne maîtrise des traitements thermiques.

En réalité, il existe deux diagrammes :

- ❖ Diagramme d'équilibre stable Fer – Graphite: cas général des fontes grises;
- ❖ Diagramme équilibre métastable Fer – Cémentite : cas général des aciers et des fontes blanches.

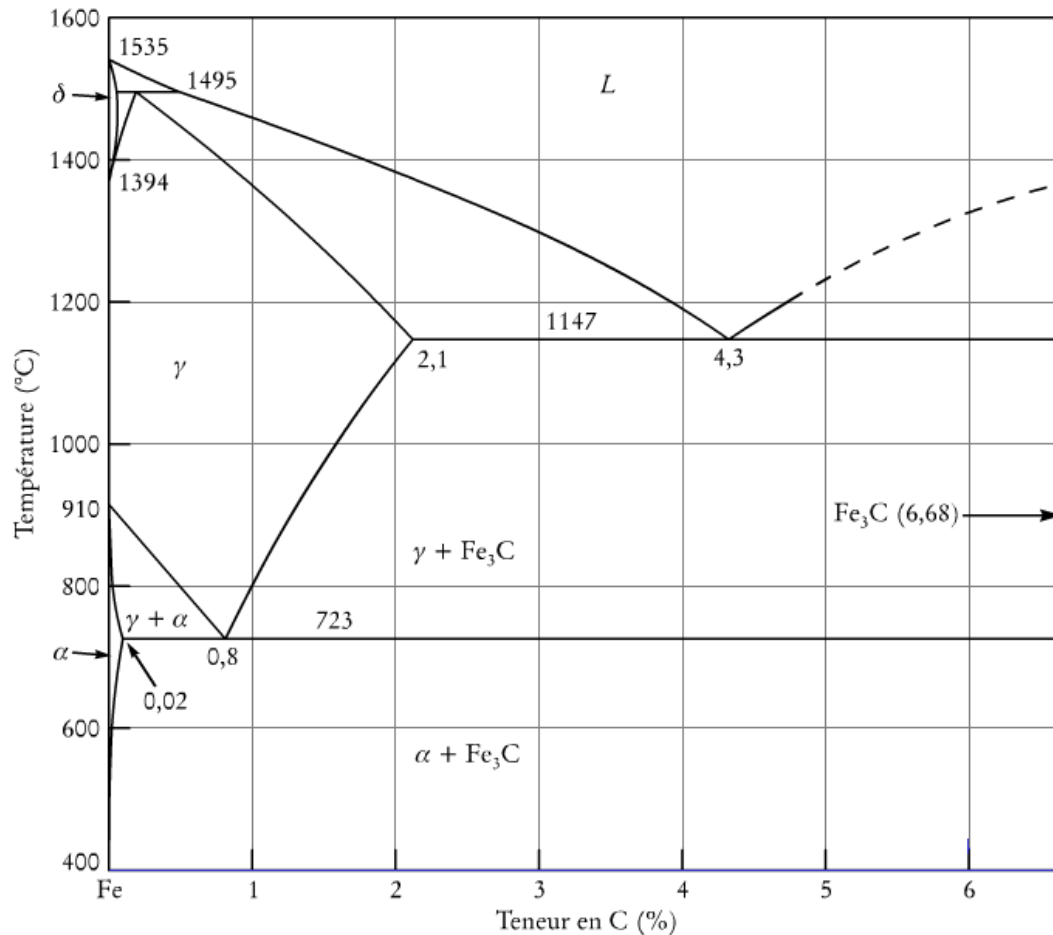


Figure I-1 : Diagramme d'équilibre Fer-Cémentite. [3]

La figure ci-dessus montre le diagramme d'équilibre Fer-Cémentite (équilibre métastable), il représente la composition des phases, la structure des alliages, la concentration de fer pur et de la cémentite qui correspond à 6,67% de carbone.

- La phase α : appelée ferrite à réseau cubique centré, à 768°C qui est le point de curie, les propriétés magnétiques disparaissent ;
- La phase γ : de structure très voisine de celle de la ferrite, mais se rencontrant aux températures comprises entre 1400 et 1528°C ;

- La phase γ : à réseau cubique à faces centrées. La solubilité du carbone dans le fer γ à 1145°C atteint 1,7%, cette solution solide de carbone insérée dans le fer γ s'appelle l'austénite ;
- Pour une teneur massique en carbone de 6,67%, il y a naissance d'une combinaison chimique, le carbure de fer (Fe_3C) qui s'appelle la cémentite. [4]

I-3-1 Les éléments d'alliages dans l'acier : [5]

Le diagramme Fer-Carbone (Figure I-1) fait apparaître un péritectique, un eutectique lors de la solidification et un eutectoïde lors des transformations allotropiques du fer.

Les éléments d'alliages introduits modifient à la fois les conditions d'équilibre et les états à l'équilibre : ils peuvent modifier les conditions de formation de l'agréat eutectoïde, en modifiant la température à laquelle il apparaît (Figure I-2) et l'on distingue alors :

❖ Les éléments gammagènes :

Les principaux éléments gammagènes sont les suivants : Nickel, Manganèse, Cobalt, Cuivre, Aluminium. Ces éléments sont appelés gammagènes parce qu'ils favorisent la transformation ($\alpha \longrightarrow \gamma$) du fer. [6]

❖ Les éléments d'alliages alphagènes :

Les principaux éléments alphagènes sont les suivants : Chrome, Molybdène, Silicium, Tungstène, Vanadium. Ils sont à structure cubique centrée comme le fer α .

Ils tendent à maintenir la forme α du fer ; ils évitent toute transformation au chauffage pour une teneur suffisante. [6]

I-3-2 Influences des éléments d'alliages sur les propriétés des aciers :

Carbone : il a une influence sur les propriétés mécaniques de l'acier car il est le facteur principal de la variation de la dureté de l'acier.

Aluminium : excellent désoxydant. Associé à l'oxygène, réduit la croissance du grain en phase austénitique. Peut rendre l'acier inapte à la galvanisation à chaud.

Chrome : c'est l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation, Il joue aussi un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion.

Cobalt : utilisé dans de nombreux alliages magnétiques. Provoque une résistance à l'adoucissement lors du revenu.

Manganèse : forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Augmente modérément la trempabilité.

Molybdène : augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Augmente la trempabilité.

Nickel : favorise l'austénitisation des aciers à forte teneur en chrome.

Titane : pouvoir carburigène élevé, réduit donc la dureté de la martensite. Elimine le carbone en solution à haute température et réduit le risque de corrosion intergranulaire (TiC se forme avant Cr_{23}C_6 évite donc l'appauvrissement en chrome au joint de grain).

Niobium : même avantage que le titane mais beaucoup moins volatil. Dans le domaine du soudage, il le remplace donc dans les métaux d'apport.

Phosphore : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité due au revenu.

Silicium : favorise l'orientation cristalline requise pour la fabrication d'un acier magnétique, augmente la résistivité électrique. Améliore la résistance à l'oxydation de certains aciers réfractaires. Utilisé comme élément désoxydant.

Tungstène : améliore la dureté à haute température des aciers trempés-revenus. Fonctions sensiblement identiques à celles du molybdène.

Vanadium : augmente la trempabilité. Élève la température de surchauffe. Provoque une résistance à l'adoucissement par revenu (effet de durcissement secondaire marqué).

I-4 Les différents types d'aciers :

❖ Aciers ordinaires :

Ce sont des aciers standards qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone (Tableau I-1).

Tableau I-1 : Types d'aciers au carbone. [29]

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Emplois
Extra-doux	$C \leq 0,15$	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	Charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
Demi-doux	$0,20 \leq C \leq 0,30$	Pièce de machines pour application mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
Demi-dur	$0,30 \leq C \leq 0,40$	Petit outillage, éléments de machines agricoles, organe de transmission
Dur	$0,4 \leq C \leq 0,6$	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, pièces moulées et traitées.
Extra-dur	$C \leq 0,6$	Outils d'usage et découpe, câbles, ressorts

❖ Les aciers alliés :

Un acier est considéré comme fortement allié, si l'un des éléments qui le compose représente plus de 5% du mélange. Dans le cas contraire, on dit qu'il est faiblement allié. Les aciers possèdent des caractéristiques spécifiques selon le ou les composant(s) qui sont ajoutés : nickel, chrome, manganèse.....etc.

❖ Les aciers à outils :

Ces aciers sont utilisés dans la fabrication d'outils destinés à la mise en forme d'autres matériaux avec ou sans enlèvement de matière, ces aciers se caractérisent d'une

dureté élevée, résistance à l'usure, ténacité élevée, trempabilité, tenue à chaud et résistance aux chocs thermiques. [7]

❖ Les aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2% de carbone, on distingue aussi les aciers inoxydables qui contiennent moins de 2,5% de Nickel. [5]

Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage. Le chrome et le nickel, leurs confèrent de bonnes propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables sont classés en quatre familles : ferritique, austénitique, martensitique et austéno-ferritique. Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus malléables et conservent cette propriété à très basse température (-200 °C).

I-5 Les normes définissant les aciers :

La norme NF EN 10027 « système de désignation des aciers » définit deux systèmes européens de désignation des aciers :

- Une désignation symbolique (Partie 1) ;
- Une désignation numérique (partie 2) qui constitue une désignation simplifiée.

▪ Lecture d'un alliage symbolique :

Deux modes de désignation symboliques faisant appel à des symboles littéraux et numériques sont prévus selon le type d'acier considéré :

- Un mode qui fait référence à l'emploi et aux caractéristiques mécaniques ou physiques ;
- Un mode qui fait référence à la composition chimique.

Pour décrire et expliquer l'interprétation des différentes désignations, il sera fait référence au premier symbole apparaissant dans chacune d'elles (lettre d'abord prise dans l'ordre alphabétique suivis de chiffres) en suivant, ensuite dans chaque cas, l'ordre de lecture des symboles.

❖ Le premier symbole est une lettre :

Tableau I-2 : Les désignations dans le cas où le premier symbole est une lettre. [5]

Le premier symbole est une lettre	Désignation
La lettre B	Acier à béton, le nombre de Trois chiffres qui suit la lettre B, indique la valeur minimale de la limite d'élasticité (en N/mm^2).
La lettre C	Acier non allié, les chiffres qui suivent la lettre C indique la teneur moyen en carbone.
La lettre D	Acier livré en produit plats pour emboutissage à froid, la lettre qui suit concerne les conditions dans lesquelles le produit a été laminé : • C le produit a été laminé à froid ; • D le produit a été laminé à chaud ; • X les conditions de laminage ne sont pas spécifiées.
La lettre E	Acier de construction mécanique, le nombre de Trois chiffre qui suit la lettre E, indique la valeur minimale de la limite d'élasticité (en N/mm^2).
La lettre G	Acier moulé. La suite de la désignation se lit comme s'il s'agissait d'un acier corroyé.
La lettre L	Acier pour tube de conduite, le nombre de Trois chiffres qui suit la lettre E, indique la valeur minimale de la limite d'élasticité (en N/mm^2).
La lettre M	Acier magnétique, le nombre de quatre chiffres qui suit la lettre M indique la valeur maximale des pertes totales spécifiée (en W/Kg) le nombre des deux chiffres qui

	suit le nombre précédent indique l'épaisseur, la lettre qui termine la désignation à la signification suivante : • A, grains non orientés ; • D, non allié semi fini ; • E, allié semi- fini ; • N, grains orientés normaux ; • P, grains orientés à haute perméabilité ; • S, grains orientés à pertes réduites.
La lettre P	Aciers pour appareils à pression. Le nombre de trois chiffres qui suit la lettre P indique la valeur minimale de la limite d'élasticité (en N/mm ²).
La lettre R	Aciers pour rails, le nombre de quatre chiffres qui suit la lettre R indique la valeur minimale spécifiée de la résistance à la traction (en N/mm ²).
La lettre X	Cette désignation fait référence à la composition chimique de l'acier, il s'agit d'un acier allié, dont la teneur d'au moins d'un des éléments d'alliage est égale à 5%. Le nombre de un, deux ou trois chiffres qui suit la lettre X indique la teneur moyenne spécifique en carbone.

❖ **Le premier symbole est un chiffre :**

Cette désignation fait référence à la composition chimique de l'acier. Il s'agit :

- Soit d'un acier non allié avec une teneur en manganèse $\geq 1\%$;
- Soit d'un acier de décolletage ;
- Soit d'un acier allié dont la teneur en chaque élément d'alliage est inférieure à 5%.

▪ **Lecture d'une désignation numérique : [5]**

La désignation numérique attribuée à chaque nuance d'acier a un numéro caractéristique. Actuellement ce numéro comporte cinq chiffres (mais ultérieurement, il pourra en comprendre sept) et il est compris entre 10 000 et 199 999.

En lisant le nombre de gauche à droite :

- Le premier chiffre signifie qu'il s'agit d'un acier ;
- Le deuxième et troisième chiffre constituent le numéro de groupe de l'acier ;
- Les quatrième et cinquième chiffres forment un numéro d'ordre arbitraire attribué à chaque nuance dans le cadre de la norme du produit.

Ainsi donc seul le numéro du groupe, fournit un élément d'appréciation du type de l'acier considéré.

Le premier chiffre d'un numéro du groupe (c'est-à-dire le deuxième chiffre du symbole en partant de la gauche) permet d'identifier la grande catégorie à laquelle appartient l'acier considéré parmi les catégories suivantes :

10***	Acier de qualité ;
11***	Acier non allié spécial ;
12***	Acier allié spécial à outil ;
13***	Acier allié spécial divers ;
14***	Acier allié spécial inoxydable ou réfractaire ;
15***	Acier allié spécial de construction ;
16***	Acier allié spécial de construction ;
17***	Acier allié spécial de construction ;
18***	Acier allié spécial de construction ;
19***	Acier de qualité ;

Le deuxième chiffre du numéro de groupe (c'est-à-dire le troisième chiffre du symbole en partant de la gauche) correspond à différents sous-types de nuances propres à chaque type ; la signification de ce deuxième chiffre est généralement liée à la composition chimique de l'acier.

II- Mise en forme des tôles magnétiques :

II-1 Introduction :

Les aciers extra doux sont les plus utilisés pour réaliser les tôles par le procédé de laminage pour l'industrie en général. Lors de leur fabrication, de nombreux paramètres sont définis dans l'objectif est d'améliorer et d'optimiser leur caractéristiques mécanique.

II-2 Définition du laminage :

Lors du laminage, le métal est engagé entre deux cylindres tournant en sens inverses (figure I-2), qui engendre une déformation plastique par des contraintes principales de compression, cela va engendrer à son tour une réduction d'épaisseur de S_0 à S , au cours de ce procédé se développe le phénomène d'écrouissage au fil duquel, la densité de dislocation et leurs enchevêtrement devenant de plus en plus élevés, il faut appliquer une contrainte sans cesse croissante pour poursuivre la déformation plastique, tout cet ensemble va engendrer le durcissement par écrouissage, qui se manifeste par l'augmentation de la limite d'élasticité du matériau, à la suite d'une prédéformation, diminution concomitante de la ductilité. [3]

Le phénomène d'écrouissage est régi par la loi suivante :

$$\sigma = K \varepsilon^n \dots\dots\dots \text{I-1}$$

Où :

K : est une constante, et, n : est appelé coefficient d'écrouissage,

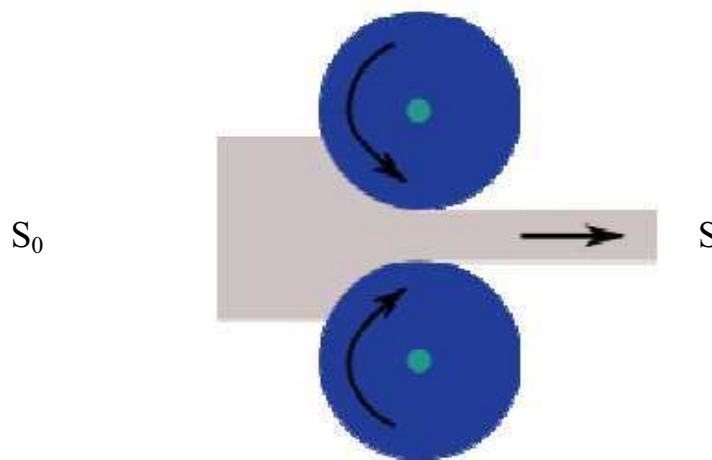


Figure I- 2 : Principe du laminage. [23]

On distingue deux types de laminage :

II-2-1 Le laminage à chaud :

Le laminage à chaud est une opération capitale pour les matériaux et alliage, car c'est au cours de cette étape que les précipités se déforment plus facilement, les brames ou les blooms sont réchauffés dans un four de réchauffage, le laminage est effectué à l'état austénitique particulièrement malléable. Le dégrossissage a lieu entre 1100 °C à 1200 °C et la finition peut se faire à des températures allant jusqu'à 800 °C. les tôles minces et les fils sont enroulés en bobines ; les tôles fortes, les larges plats et les profilés sont débités en longueur. [7]

II-2-2 Le laminage à froid :

La moitié environ des produits laminés est commercialisée à l'état laminé à chaud. Les produits minces sont obtenus par laminage à froid des produits laminés à chaud. Le laminage à froid augmente la dureté et la limite d'élasticité, améliore l'état de surface, mais réduit la formabilité, il introduit des textures d'orientation cristalline de déformation plane. si le produit doit subir des déformations ultérieures importantes, un recuit est nécessaire pour restaurer la formabilité. [7]

II-3 Traitement thermique des aciers :

L'importance commerciale des traitements thermiques est considérable.

Les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent, de conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie, ou à sa mise en œuvre dans les meilleures conditions, sous forme de demi-produit ou d'ébauche. Ces améliorations contribuent très souvent à une diminution des coûts, car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché quand on sait les traiter convenablement, ou la diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

II-3-1 Définition :

Consiste à faire subir au matériau un cycle thermique comprenant un chauffage jusqu'au domaine austénitique qui permet une homogénéisation de la structure du matériau, suivi par un maintien à des temps différents qui se termine par un refroidissement à une vitesse bien déterminée. [3]

II-3-2 La trempe :

C'est la mise en équilibre par un refroidissement qui retient la situation d'équilibre à haute température à une température plus basse; la trempe vient toujours après un maintien à hautes températures (température de l'état hors d'équilibre). On réalise la trempe, à l'eau, à l'air et à l'huile, comme aussi il y'a d'autres milieux selon le produit final recherché. Les trois facteurs de trempe sont :

- La teneur en carbone qui conditionne l'augmentation possible de dureté.
- la température de trempe, elle doit permettre la formation de l'austénite.
- La vitesse de trempe, le refroidissement doit être suffisamment rapide pour permettre l'augmentation de la dureté, on définit aussi VC_1 et VC_2 la vitesse critique tel que pour :
 - $V < VC_1$: il n'y a pas de modification de la dureté initiale.
 - $V > VC_2$: il n'y a pas de modification de la dureté finale.

Ainsi, la condition caractéristique de la trempe est la martensite, C'est de l'austénite transformée grâce au refroidissement rapide de l'acier.

On peut classer par ordre croissant, les constituants formés grâce à la trempe

Perlite > Troostite > Bainite > Martensite. Voir la figure I-3.

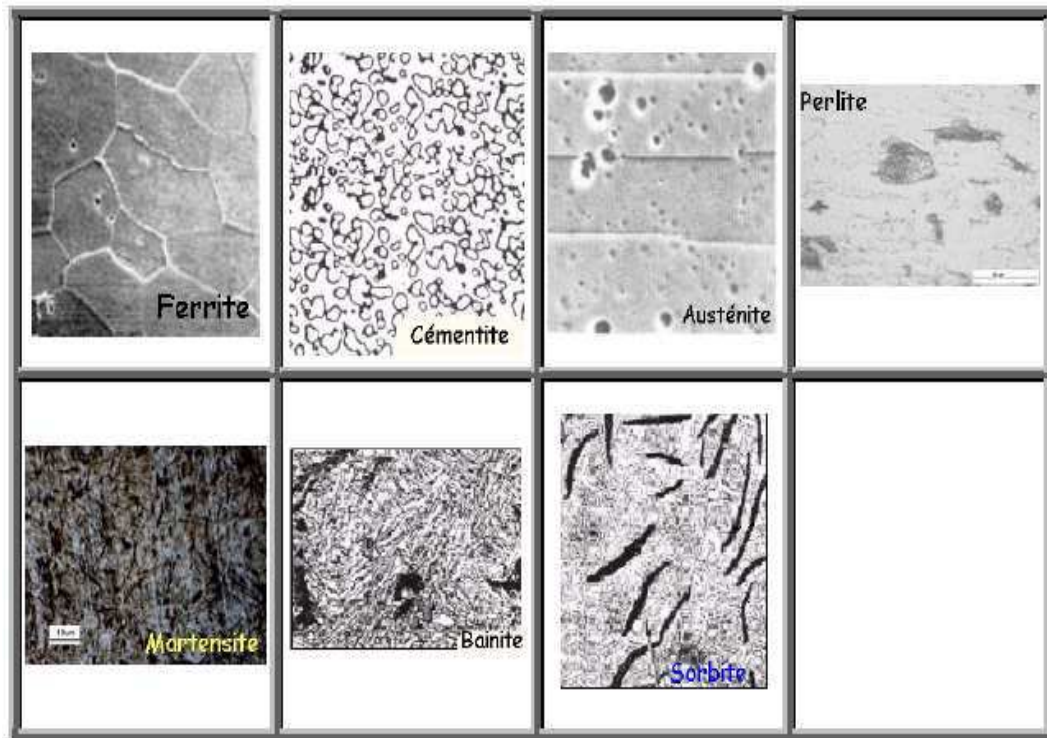


Figure I-3 : Les différentes microstructures d'acier. [22]

La trempe se fait dans un ou plusieurs bains de trempe tels que:

- ❖ Trempe à l'air ;
- ❖ Trempe à l'eau ;
- ❖ Trempe à huile ;
- ❖ Trempe à gaz.

II-3-3 Le recuit :

Globalement, un recuit comporte un chauffage et un maintien à une température telle que l'acier soit partiellement ou totalement porté à l'état austénitique, dite température de recuit, suivi d'un refroidissement généralement lent.

❖ Les différents types de recuits :

➤ Le recuit d'homogénéisation

S'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation) de l'austénite. Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide γ) à une température aussi élevée que possible afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage.

➤ **Le recuit de régénération ou normalisation**

Sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique.

Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite. Sous les mêmes conditions, mais pour une durée un peu plus longue (15 à 30 min), on pratique.

➤ **Le recuit d'adoucissement**

S'effectue sur des pièces trempées pour faciliter ensuite leur usinage et leur formage. On peut obtenir le même résultat par un revenu à une température en-dessous de la température de transformation pendant environ 15h. Le recuit de détente remet l'alliage en équilibre mécanique, en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage. La température du traitement n'est pas liée à la transformation $\alpha \rightleftharpoons \gamma$, mais dépend fortement de l'acier.

➤ **Le recuit de recristallisation**

Sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation. Pour un acier ordinaire, ce traitement s'effectue au-dessus de 600°C. Il est clair qu'un de ces traitements mentionnés peuvent remédier à plusieurs défauts à la fois.

➤ **Le recuit isotherme**

Comme on peut citer brièvement le recuit pour formage à froid et le patentage qui est un recuit provoquant la formation de structure favorable en tréfilage de l'acier.

II-3-4 Le revenu :

Est un traitement thermique pratique, généralement après trempe et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilité).

Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à A_{c1} (selon la résistance exigée) suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante.

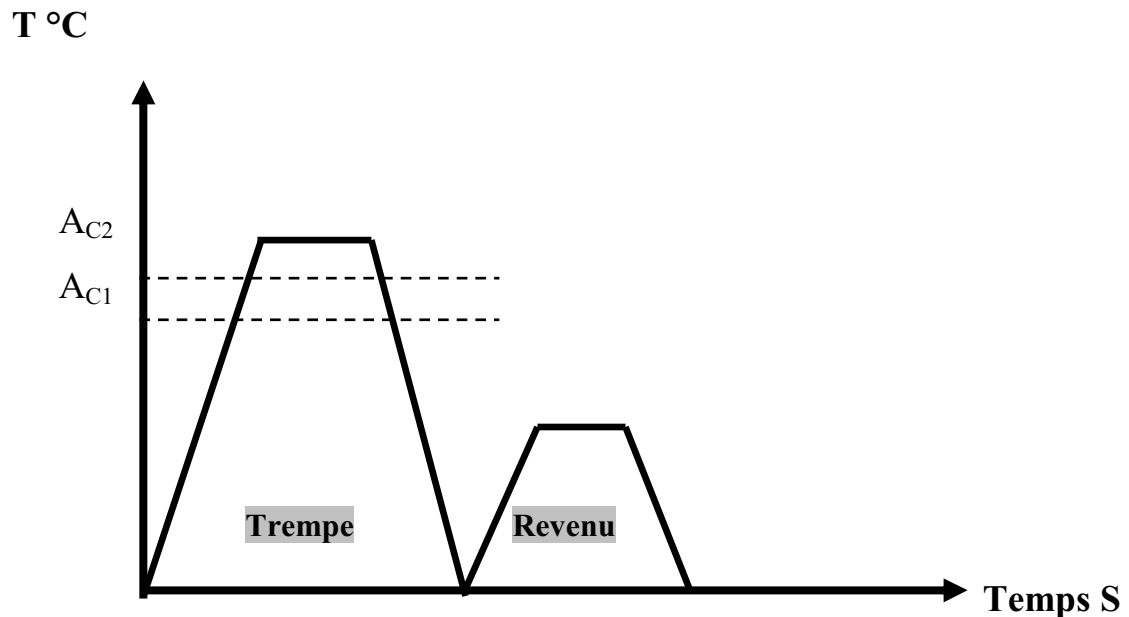


Figure I-4 : Traitement de revenu. [7]

II-4 Les différentes qualités de tôles magnétiques élaborées en métallurgie :

Bien que le fer soit un élément fondamental pour son moment magnétique intrinsèque, il n'est jamais utilisé pur en construction électrique mais la plus part du temps en association avec d'autres éléments d'alliages. Il s'agit essentiellement du silicium.

II-4-1 Rôle de l'addition du silicium dans le fer :

- ❖ Entraîne un durcissement de l'alliage, ce durcissement rend possible l'aptitude à la découpe dans les tôles minces.
- ❖ Diminution sensible de l'anisotropie magnéto cristalline du fer.
- ❖ Favorise la conductibilité thermique de l'alliage qui conditionne l'évacuation des pertes.

II-4-2 Les tôles fer-silicium à grains orientés (GO) : [8]

Ces tôles sont utilisées pour la construction de tous les circuits magnétiques feuilletés à champ unidirectionnel, comme dans le cas des transformateurs. Le critère spécifique de ces tôles réside dans leur texture cristalline. Tous les cristaux cubiques centrés que compte la tôle ont ici des orientations très voisines d'une orientation idéale, qu'on appelle « l'orientation de Gauss », ou (110) [001] en notation de Miller. Ainsi la direction du laminage, dans le plan de la tôle, est très voisine d'une arête du cube, qui est aussi une direction de facile aimantation.

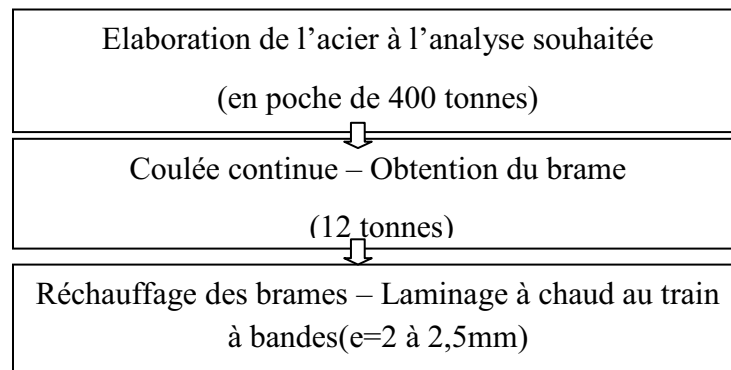
II-4-3 Les tôles fer-silicium à grains non orientés (NO) :

Elles sont utilisées pour la construction des moteurs et générateurs soumis à l'action d'un champ tournant, cet alliage possède des propriétés isotrope dans le plan de la tôle, il existe deux types qui sont :

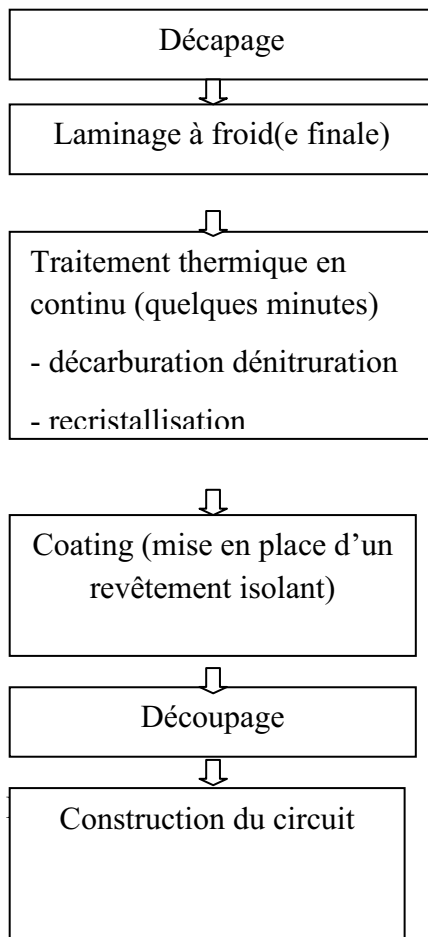
- Les tôles recuites, ayant reçu un revêtement final isolant, dites « fully-process »
- Les tôles non terminées, livrées à un état intérimaire semi-fini
« semi-process ». [8]

Le tableau ci-dessous indique les opérations successives menant aux produits utilisés.

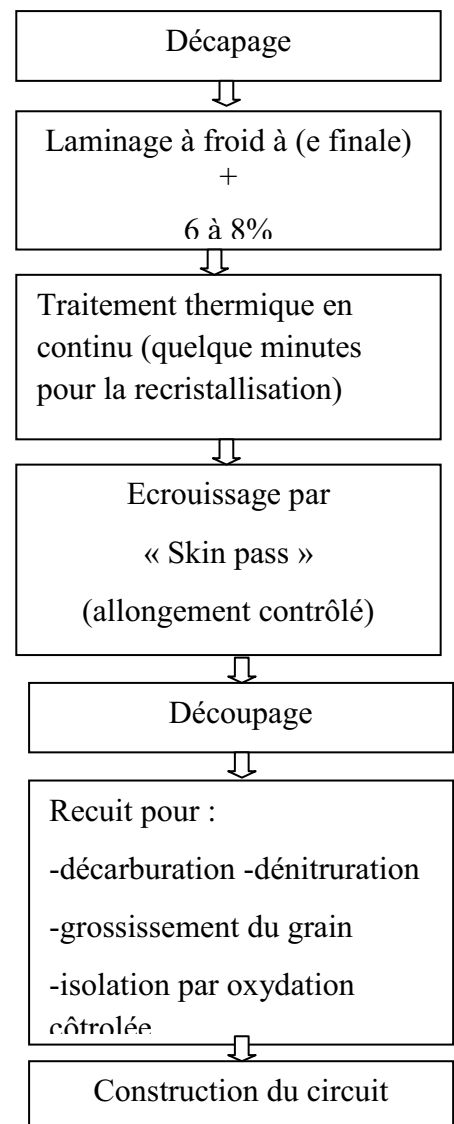
Tableau I-3 : Principe de fabrication des tôles magnétiques non orientées selon les deux technologies en usage. [8]



Production des tôles « Fully-process »



Production des tôles « semi-process »



**Opération effectuées
Chez le constructeur
électricien**

Conclusion :

Dans ce premier chapitre de nombreux paramètres sont définis dans le but de faire apparaître le processus d'élaboration de l'acier, de l'état de minerai jusqu'à ce qu'il devienne une tôle finie ordinaire ou magnétique.

Dans le chapitre suivant, on va traiter l'origine du magnétisme dans les aciers, et ces différentes caractéristiques.

Chapitre - II

Le magnétisme dans les aciers

Introduction :

L'origine du magnétisme est atomique, car tous les matériaux métalliques ont des propriétés magnétiques propre à eux, si on considère un atome libre c'est-à-dire qui n'est pas soumis, ni à un champ magnétique, ni à l'interaction d'autres atomes voisins celui-ci présentera un moment magnétique élémentaire qui est le résultat des moments magnétique du noyau d'une part et des électrons d'autre part.

I- Relations d'électromagnétisme :**❖ Excitation magnétique dans le cas d'une bobine longue :**

$$H = N.I / L \dots\dots\dots \text{II-1}$$

N : Nombre de spires ;

I : Intensité du courant, (en, Ampère) ;

N.I : (En ampère-tour) ;

L : Longueur moyenne du circuit, (en, mm) ;

H : champ magnétique (en, ampère par mètre).

❖ L'induction magnétique :

- Dans l'air :

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \dots\dots\dots \text{II-2}$$

- Dans les matériaux :

$$B = \mu_r \mu_0 H \dots\dots\dots \text{II-3}$$

$\mu_0 := 4 \pi 10^{-7} \text{ H. m}^{-1}$ est la constante magnétique ;

μ_r : Perméabilité relative du matériau ;

B : Induction magnétique, (en, Tesla) ;

Tout matériau magnétique est équivalent à une distribution convenable de moments magnétiques, on appelle intensité d'aimantation la densité volumique du moment magnétique :

$$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{M}}{dV} \dots \dots \dots \text{II-4}$$

Le module du moment étant (en, A.m²), le module de l'aimantation s'exprime (en, A/m).

A la place de l'aimantation, les spécialistes des matériaux qui travaillent en construction électrique, préfèrent utiliser généralement la polarisation magnétique :

$$\mathbf{J} = \mu_0 \frac{d\mathbf{M}}{dV} \dots \dots \dots \text{II-5}$$

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ H. m}^{-1}$$

μ_0 : Est la constante magnétique.

Chaque matériau est caractérisé par une excitation magnétique (H) et une induction magnétique (B), lorsqu'on augmente l'excitation H dans une bobine munie d'un noyau magnétique, le champ B mesuré varie selon une courbe appelée courbe de première alimentation.

II- Les différents matériaux magnétiques :

On distingue deux types de matériaux magnétiques :

II-1 Matériaux magnétique doux (ferromagnétique):

Grande perméabilité, faible champ coercitif, Ils conservent mal l'aimantation obtenue par induction, c'est le cas du fer, du cobalt, du nickel et de certains alliages. Ce sont les corps « bon conducteurs » du magnétisme, particulièrement apte à la confection des circuits magnétique, mais sont le siège de courants de Foucault et des pertes par hystérésis. On constate également un phénomène de sursaturation, cela s'explique par le fait que les distances interatomiques sont faibles. [8]

II-1-1 Le ferromagnétisme à l'échelle du cristal :

❖ Le domaine de Weiss :

Un cristal ferromagnétique est constitué de deux domaines adjacents appelés domaines de Weiss, le premier domaine avec une paroi à 180° qui se compose de moments magnétiques élémentaire dont la direction est à 180° et le deuxième domaine avec une paroi à 90° .

Le moment magnétique est orienté perpendiculairement au premier domaine à 180°

(Figure II-1). [8]

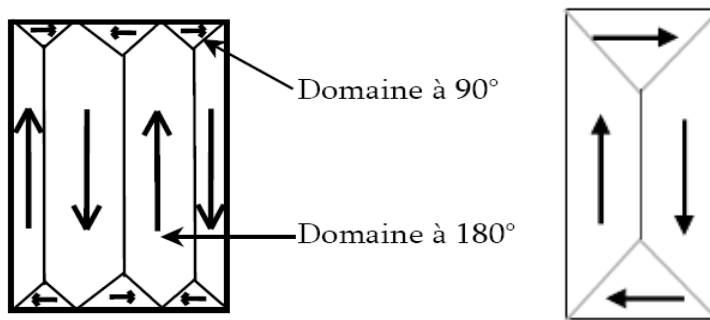


Figure II-1 : Les domaines d'un cristal ferromagnétique. [8]

❖ Les parois de Bloch :

Les domaines de Weiss sont séparés par des frontières appelées « parois de Bloch », ces parois constituent un retournement progressif des moments atomiques d'une direction d'aimantation à une autre. [8]

II-2 Matériaux magnétique durs :

Ils conservent bien l'aimantation, c'est le cas des aciers, ils peuvent constituer les aimants permanents, ce sont des générateurs statiques de flux magnétique. [8]

II-3 Le moment magnétique dans les microstructures ferritique et perlitique:

La perlite correspond à un constituant composé de deux phases : la ferrite et la cémentite. La ferrite est un matériau magnétique doux tant dit que la cémentite est magnétiquement dure. La cémentite peut se présenter sous différentes formes, lamellaire ou globulaire au sein de la ferrite, ce qui influe sur les domaines de Weiss qui influe à son tour

sur les parois de Bloch, et l'influence majeure sera sur l'orientation des moments magnétique au sein du cristal (Figure II-2). [8]

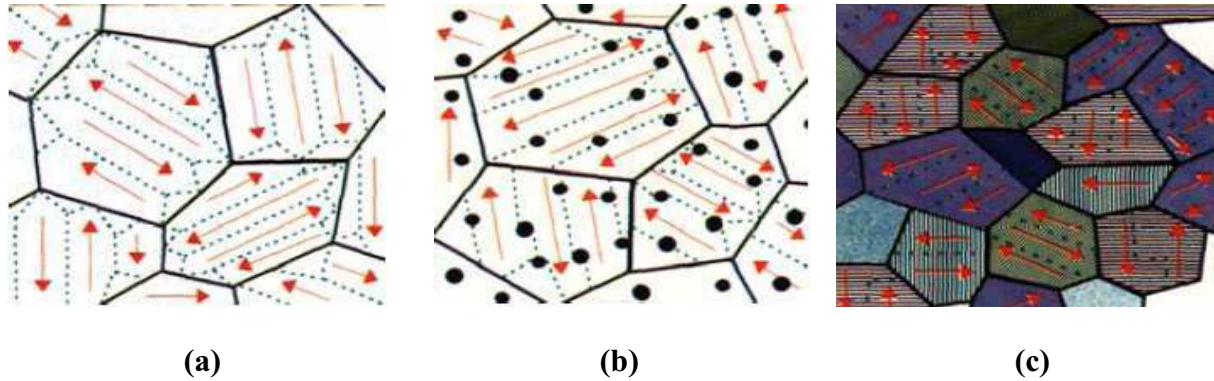


Figure II-2 : Microstructures magnétiques de la ferrite et de la perlite. [27]

- (a) Microstructure ferritique simple, domaines 180° et 90° ;
- (b) Microstructure perlitique globulaire ;
- (c) Microstructure perlitique lamellaire.

III- Les caractéristiques magnétiques normalisées des tôles (NO) :

Pour chaque épaisseur, la classification des tôles sur le marché est assurée à partir de leurs pertes spécifiques, mesurées pour une polarisation sinusoïdale d'amplitudes 1.5 T, à 50 Hz. Cette pratique correspond plus à une convention qu'à une nécessité technique en pratique dans le cas des qualités les plus courantes qu'on utilise pour construire les petits moteurs. Il importe alors davantage d'obtenir une induction importante dans un champ d'excitation de 5000 A.m^{-1} que d'avoir des pertes très réduites. [8]

Le tableau II-1 indique les caractéristiques magnétiques de quelques tôles à grains non orientés.

Tableau II- 1 : Caractéristiques magnétiques normalisées des tôles. [8]

	Epaisseur nominale (mm)	Pertes spécifique maximales (W/Kg pour B=1.5T)	Induction minimale(T) pour un champ H (A/m)			Utilisation principale	Désignation normalisée
			2500	5000	10000		
Qualités Fully-process	0.35	2.50	1.49	1.60	1.71	Grosses machines tournantes	M250-35A
	0.50	2.70	1.49	1.60	1.71	Grosses machines tournantes	M270-50A
	0.50	4.70	1.52	1.62	1.73	Moteurs de moyenne de puissance	M470-50A
	0.65	6.00	1.54	1.64	1.75	Petits moteurs Relais	M600-65A
	0.65	8.00	1.58	1.68	1.76	appareillage domestique	M800-65A
Qualité Semi-process	0.50	3.90	1.45	1.54	1.75	Moteurs de moyen de puissance	M390-50D
	0.65	5.20	1.55	1.65	1.76	Petits moteurs	M520-65D
	0.65	10.00	1.58	1.68	1.79	Relais appareillage domestique	M100-65D

IV-La courbe de première aimantation :

A partir d'un état désaimanté ($J = 0$), l'application d'un champ magnétique d'excitation régulière provoque l'apparition d'une polarisation magnétique $J(H)$ (figure II-3).

L'énergie de couplage avec le milieu extérieur est :

$$U_m = J.H \dots \dots \dots \text{II-6}$$

On définit aussi la polarisation maximale, J_s , dite à saturation, correspond à un alignement parfait de tous les moments atomiques sur le champ appliqué, c'est une grandeur limite, caractéristique intrinsèque du matériau ferromagnétique. [8]

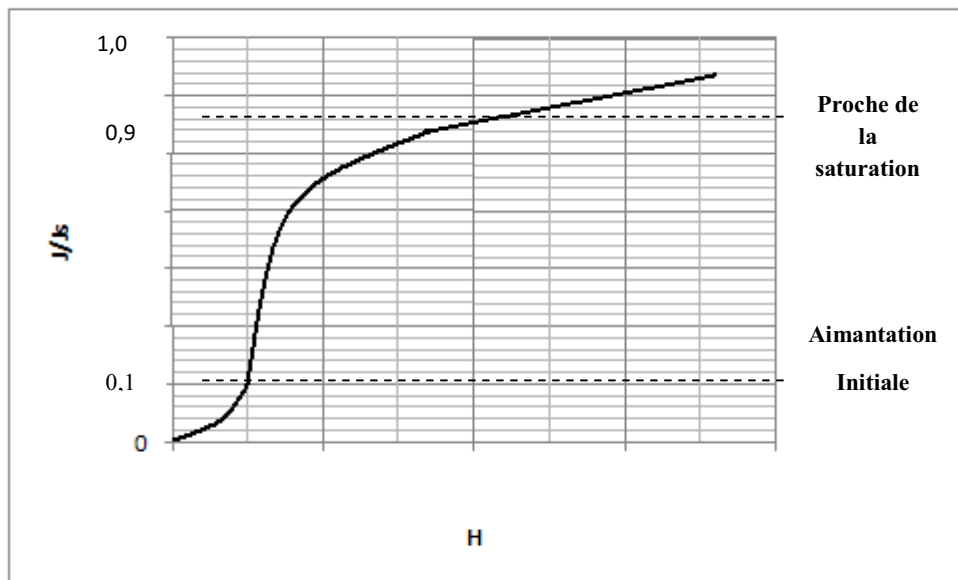


Figure II-3 : Courbe de première aimantation d'un matériau Ferromagnétique. [8]

- **Le domaine de l'aimantation initiale (champs faibles) ($J/J_s \ll 0,1$, $H \ll H_c$) :**

Dans ce domaine des champs faibles, qu'on appelle aussi domaine de Rayleigh, il existe de l'hystérésis. Quand on parle d'un état désaimanté, et qu'on applique au matériau un champ H régulièrement croissant, sa polarisation magnétique moyenne dans la direction du champ appliqué augmente suivant une loi parabolique.

- **Les champs forts ($J/J_s > 0,9$) :**

Chaque cristal est alors un vaste domaine où l'aimantation quitte progressivement la direction de facile aimantation la plus favorable pour se rapprocher de la direction du champ appliqué en luttant contre les force d'anisotropie magnéto cristalline, la polarisation magnétique $J(H)$ dans le domaine des champs forts ne dépend que de la valeur du champ H appliqué et non pas de ses variations antérieures, il n'y a donc plus d'hystérésis.

V- L'hystérésis :

L'aimantation d'un matériau ferromagnétique soumis à un champ dont l'intensité varie entre deux limites se traduit par la courbe suivante :

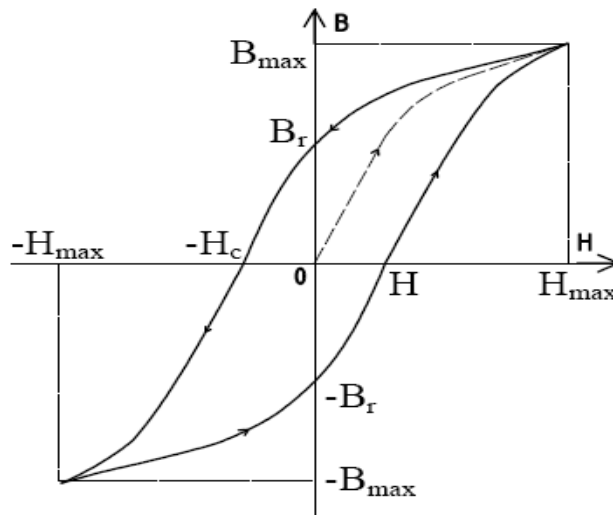


Figure II-4 : Cycle d'hystérésis. [9]

La figure II-4 nous montre l'évolution du champ magnétique dans un matériau ferromagnétique en fonction d'une excitation magnétique alternative variant entre $-H_{\max}$ et $+H_{\max}$

- B_r : induction rémanente, c'est à dire l'induction restante dans le matériau lorsque $H = 0$ (en, $A.m^{-1}$).
- H_c : excitation coercitive, c'est à dire le champ qu'il faut produire pour annuler l'induction magnétique rémanente dans le matériau ferromagnétique.

On appelle HYSTERESIS, le dédoublement de la courbe d'aimantation $B = f(H)$ mettant en évidence le retard à la désaimantation des matériaux ferromagnétiques.

Le phénomène d'hystérésis est responsable de l'échauffement des tôles des circuits magnétiques soumis à des champs variables.

V-1 L'hystérésis dans les matériaux doux et les matériaux durs :

❖ **Matériaux doux:**

- Cycle d'hystérésis étroit ;
- Champ rémanent B_r et excitation coercitive H_c faibles ;
- Pertes par hystérésis faibles ;
- Ils s'aimantent et se désaimantent très facilement.

On les utilise pour réaliser des circuits magnétiques de machines (moteurs, génératrices, transformateurs, ...).

❖ **Matériaux durs:**

- Cycle d'hystérésis large ;
- Induction rémanente B_r et excitation coercitive H_c importants ;
- Pertes par hystérésis importantes ;
- Ils s'aimantent et se désaimantent très difficilement.

On les utilise pour réaliser des aimants permanents (Figure II-5).

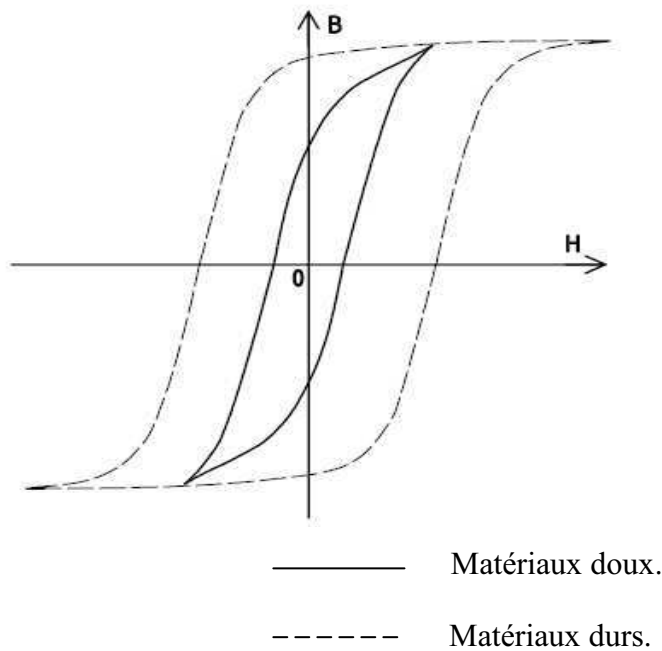


Figure II-5 : Cycle d'hystérésis, Matériaux doux et durs. [9]

V-2 L'énergie d'anisotropie magnéto cristalline :

Les matériaux magnétiques ne sont pratiquement jamais des matériaux isotropes, on dira qu'il s'agit d'un matériau isotrope, si toutes les propriétés de l'échantillon sont indépendantes de l'orientation de J_s . L'énergie interne du cristal varie avec l'orientation de J_s , il existe des directions cristallographiques privilégiées, dans lesquelles les moments s'orientent de préférence, les arêtes de la maille cubique dans le cas du fer, sont appelées « des directions de facile aimantation ». Pour amener l'aimantation à saturation dans une autre direction moins favorable, il faut fournir au cristal une énergie supplémentaire apportée par le champ magnétique extérieur appliqué, et qui sert à vaincre les forces internes dues à l'anisotropie magnéto cristalline, le fer est considéré comme un matériau magnétique très anisotrope. [8]

Il existe d'autres formes d'anisotropies magnétiques, par exemple celle que l'on provoque dans les tôles par laminage. Dans le cristal de référence, l'énergie d'anisotropie (W_{an}) se réduit à l'anisotropie magnéto cristalline.

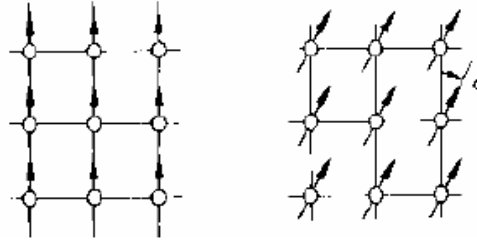


Figure II-6 : Représentation schématique de l'orientation des moments magnétiques par rapport au réseau cristallin. [10]

La fonction $W_{an}(\alpha)$ diffère d'une matière à l'autre. Dans l'espace à trois dimensions, cette fonction s'écrit $W_{an}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ où les α_i sont les cosinus directeurs d'Is par rapport aux axes cristallins (Figure II-6)

Dans le fer, W_{an} est minimum selon les directions $\{100\}$. Sous l'effet de l'énergie magnéto cristalline seule, la polarisation spontanée aura donc tendance à s'aligner parallèlement aux arêtes du cristal de référence.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a montré que les moments magnétiques sont bouclés au sein du réseau cristallin et c'est bien évident qu'une déformation au sein de ce cristal, va engendrer une désorientation des moments.

Notre tôle magnétique va être la cible de l'outil de découpe qui exercera un effort bien déterminé pour la découpée, donc l'outil de découpe joue un rôle important sur les caractéristiques magnétique de la pièce découpée, ce qui nous a incité à lui consacrer le chapitre suivant.

Chapitre - III

**Le procédé de découpage
et le profil de la tôle
découpée**

Introduction :

L'objectif visé à travers ce chapitre est de présenter une étude bibliographique sur le procédé de mise en forme par découpage des tôles, ainsi que l'influence de l'outil de découpe sur les caractéristiques de la pièce finie, et la question capitale qui se pose ici une fois que le procédé de découpage est terminé, comment et quelle sera l'état du matériau au voisinage des bords découpés ?

I- L'opération de découpage :**I-1 Définition :**

Parmi tous les procédés industriels de mise en forme : le filage, le matriçage, l'emboutissage, le pliage, il y a le découpage de tôles qui est une opération particulière qui consiste à enlever de la matière par un cisaillement normal au plan de la tôle. [11]

I-2 Principe de découpage :

Le découpage s'effectue sur une presse. Il consiste à appliquer sur une tôle un effort variable par l'intermédiaire d'un poinçon (partie mobile), et une matrice (partie fixe), qui joue le rôle d'une contre lame comme l'illustre la figure III-1

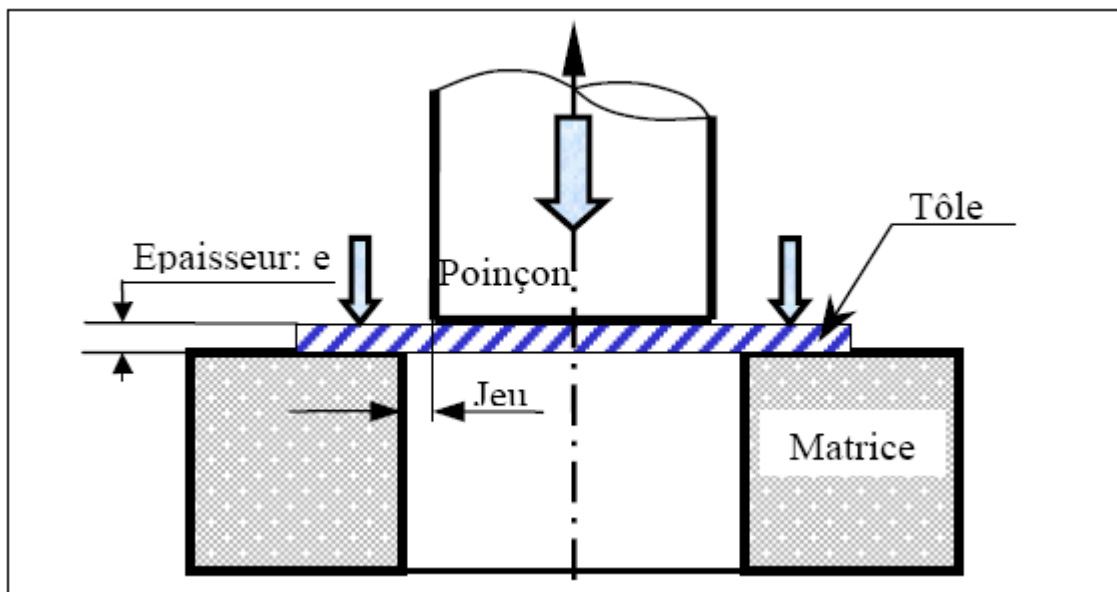


Figure III-1 : Découpage d'une tôle. [11]

Au moment du découpage, l'outillage (poinçon- matrice) subit des sollicitations cycliques et un échauffement engendré par le travail des actions de contact entre la tôle, le poinçon, la matrice et par la puissance dissipée au sein de la matière. Il en résulte des problèmes de cassures, ainsi que l'usure progressive des parties actives. [11]

I-3 Dimensions de l'outil : [24]

C'est un outil obtenu à partir d'un assemblage matrices- poinçons (Figure III-2) qui sont fabriqués à base d' :

❖ Aciers :

- Z200 C12 (norme AFNOR) de composition chimique 2% de carbone + 12% de chrome ;
- Aciers à outils 3D (AISI-USA).

❖ Carbures : obtenus par frittage

- Carbure de Tungstène : 75 à 88% de W ;
- Carbure de Titane : à 3% de Ti ;
- Carbure de Tantale + Cobalt = liant.

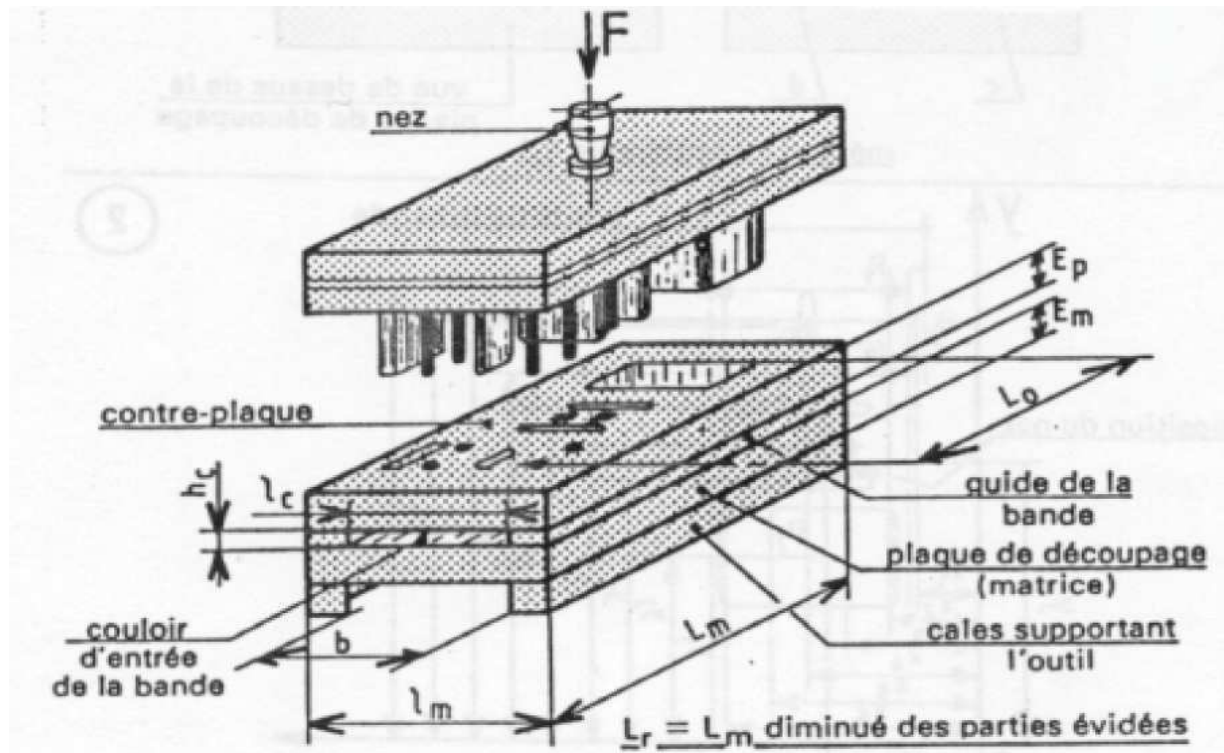


Figure III-2 : Outil de découpage. [24]

I-4 Alimentation du métal :

Pour augmenter la cadence de production des pièces, on utilise des systèmes d'alimentation automatique de la tôle, à partir d'une tôle de plusieurs mètres de longueur, enroulée sur elle-même, et installée dans un dévidoir (Figure III-3). [24]

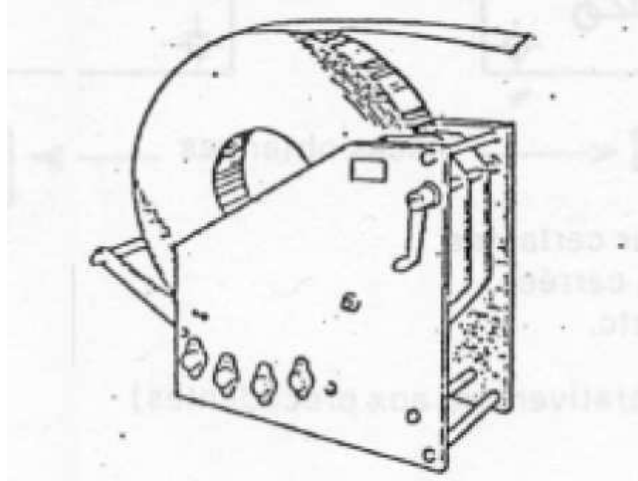


Figure III-3 : Dévidoir à berceau. [24]

I-5 Comportement du matériau pendant l'opération de découpage :

Maillard, a décrit le comportement d'un acier de type XES, au cours de la découpe ainsi que les différentes étapes de l'opération de découpage, à travers une analyse de la courbe expérimentale présentant l'effort vertical exercé sur le poinçon, en fonction de sa pénétration à travers la tôle. Son allure générale est donnée par la courbe de la Figure III-4. [14]

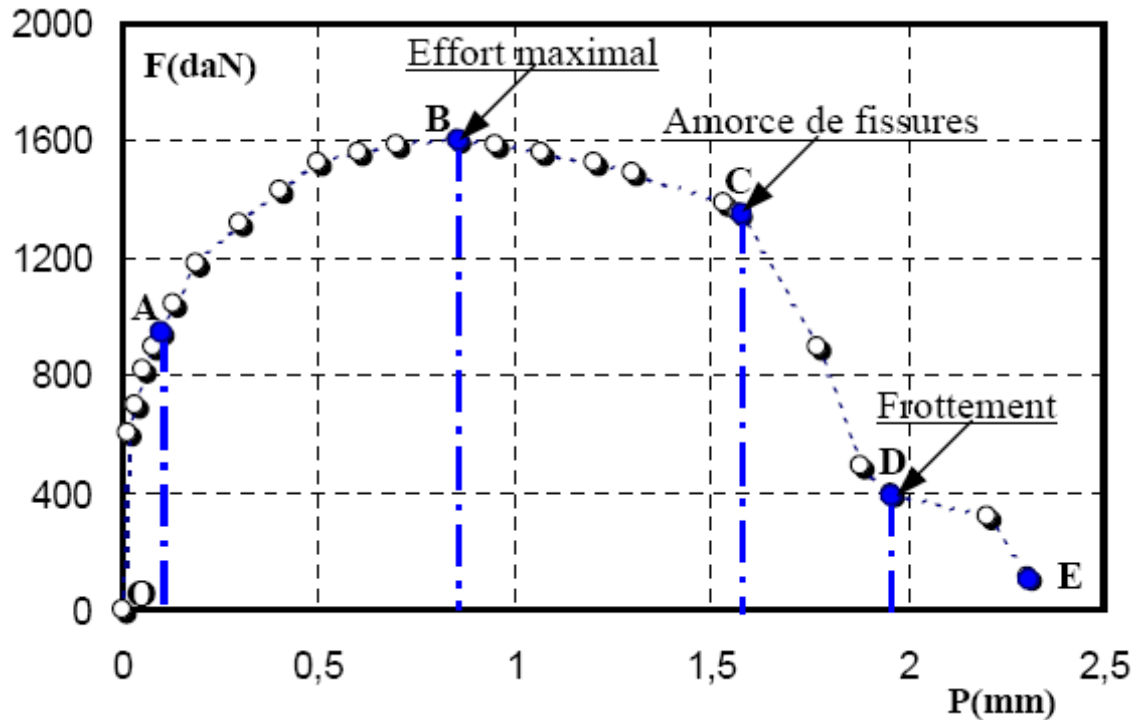


Figure III-4 : Courbe effort-pénétration lors d'une opération de découpage. [14]

Cette courbe, illustre les différentes phases de l'opération qui rendent compte à la fois, du comportement du matériau et du degré de pénétration du poinçon dans la tôle. On distingue dans l'opération de découpage cinq phases principales, classées comme suit :

- Phase OA : Comportement élastique du matériau ;
- Phase AB : Plastification avec écrouissage ;
- Phase BC : Plastification et réduction de la section en cisaillement ;
- Phase CD : Amorçage et propagation de fissures ;
- Phase DE : Frottement entre :
 - Poinçon et tôle ;
 - Matrice et pièce découpée ;
 - Pièce découpée et tôle.

II- La lubrification en découpage : [20]

Les sollicitations appliquées sur les outils de découpage sont beaucoup plus importantes que celles que l'on trouve dans les autres opérations (emboutissage, pliage....etc.) il serait alors important de déterminer le lubrifiant qui réduit au maximum l'usure de l'outil.

La dégradation des poinçons de découpage se manifeste de plusieurs manières :

- ❖ Grippage tôle / outil ;
- ❖ Ecaillage du bord d'attaque ;
- ❖ Rupture de l'outil ;
- ❖ Usure progressive.

Le lubrifiant contribue à éviter les trois premières causes de la dégradation et il limite l'usure progressive de l'outil.

L'usure de l'outil engendre des dommages sur la qualité de la pièce découpée :

- Conditionner la hauteur des bavures de ces pièces ;
- Réaffutage du poinçon, ce qui influe sur sa durée de vie.

III- Les paramètres qui influent sur le procédé de découpage :

III-1 Jeu entre le poinçon et la matrice :

Le jeu J correspond à la distance radiale séparant l'arête coupante de l'outil, de la matrice. Il est généralement rapporté à l'épaisseur de la tôle (en %) par l'expression suivante :

$$J = \frac{R_m - R_p}{e} * 100\% \dots \dots \dots \text{II-1}$$

R_m : rayon de la matrice, en (mm) ;

R_p : rayon de l'outil, en (mm) ;

e : épaisseur de la tôle, en (mm).

La figure III-5 comporte schématiquement les champs de variabilité possible pour le jeu J poinçon / matrice et pour la dépouille des matrices. [15]

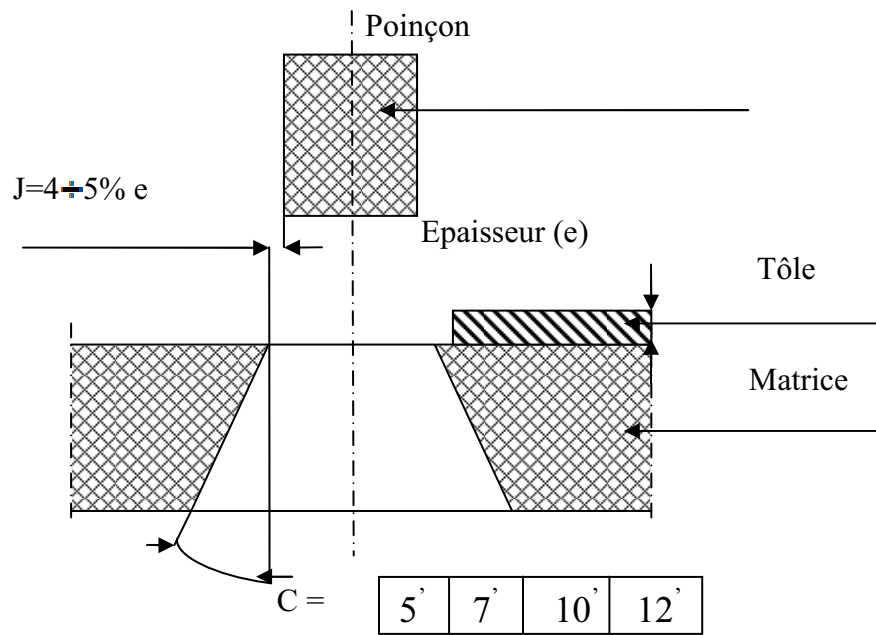


Figure III-5 : Jeux et dépouilles. [16]

Il est recommandé que l'outil adopte des valeurs de jeu J et de dépouille C proportionnellement plus grande au fur et à mesure que les valeurs de l'allongement $A\%$ de la tôle prévue augmentent et que les valeurs de la charge de la limite élastique R_e , de la charge de rupture R_m et du rapport R_e / R_m diminuent.

A titre d'indication, les valeurs minimales du jeu ($J=4\%$) et de dépouille ($C=5'$ / côté) seront adoptées lorsqu'on prévoit l'utilisation des tôles avec des valeurs d'allongement $A\%$ comprise entre 1 et 13%, des valeurs de rupture R_m autour de 60 kg/mm^2 , de limite d'élasticité R_e autour de 55 kg/mm^2 et donc un rapport

R_e / R_m autour de 0,9 et davantage.

A l'opposé, les valeurs maximales du jeu ($J=5\%$ et plus et de dépouille ($C=12'$ / côté et plus) seront adoptées lorsqu'on prévoit l'utilisation des tôles avec des valeurs d'allongement $A\%$ autour de 30% et plus, des valeurs de rupture R_m autour de 45 Kg/mm^2 et moins, de limite d'élasticité R_e autour de 35 Kg/mm^2 et moins et des valeurs de rapport R_e / R_m comprise entre 0,5 et 0.8.[16]

III-2 La géométrie de l'outil :

Les rayons du poinçon et de la matrice sont choisis de façon identique, en aciers à haute performance CPM (Figure III-6) qui possèdent une des meilleures propriétés telles que ; la dureté, la résistance à l'usure, la ténacité. [18]

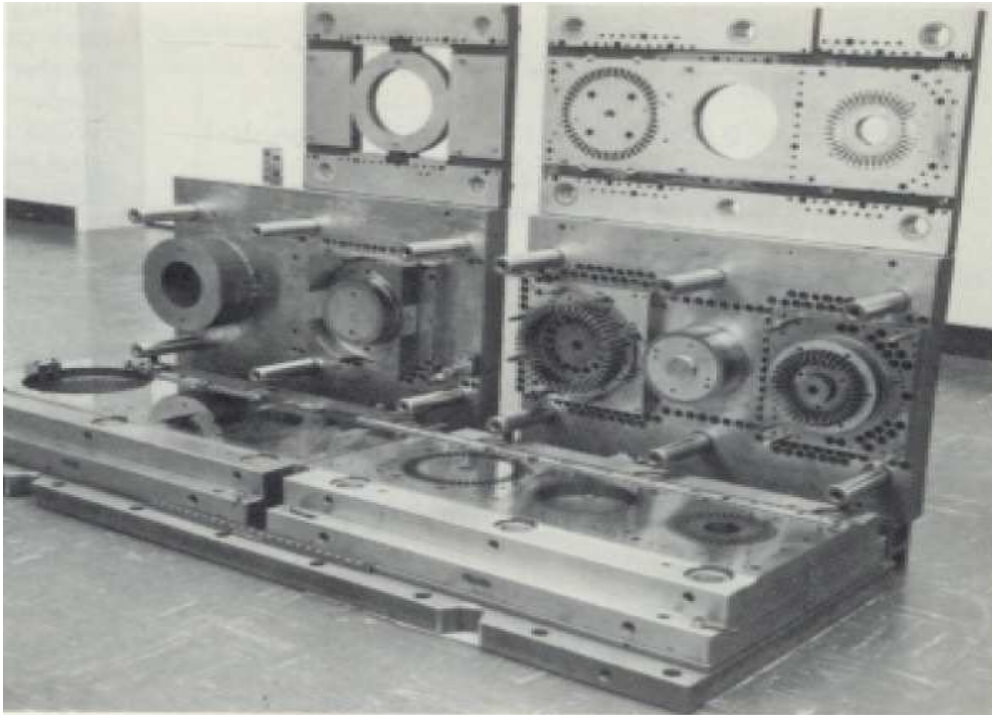


Figure III-6 : Matrices et poinçons. [24]

Plusieurs études ont été effectuées pour déterminer l'impact de ces paramètres sur l'opération de découpe des tôles minces. Une étude expérimentale examinant l'influence de la géométrie de l'outillage sur la qualité géométrique du bord découpé, ont pu mettre en évidence la dépendance entre le faciès de rupture et de la géométrie du bord tranchant de l'outillage.

En se basant sur une étude micrographique des pièces découpées, ils ont montré que les phénomènes liés à la naissance et à la propagation des fissures, et par conséquent l'aspect du bord découpé dépendent entre autre de la géométrie du bord Tranchant du poinçon. [15]

III-3 Coefficient de frottement :

Maiti a montré lors de ses études sur le poinçonnage des tôles minces que l'accroissement du coefficient de frottement se traduit par une augmentation de l'effort exercé par le poinçon sur la tôle. [15]

III-4 Epaisseur de la tôle :

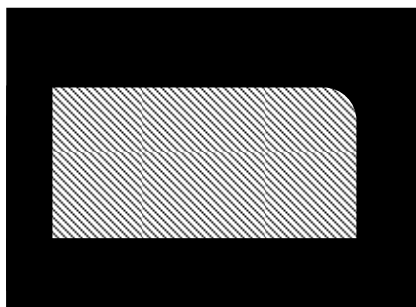
L'épaisseur de la tôle est l'un des facteurs les plus importants conditionnant la géométrie du bord. Pour des conditions opératoires données et pour une nuance de matériau donnée, le bord découpé change de profil en fonction de l'épaisseur de la tôle. [17]

III-5 Vitesses de découpe : [18]

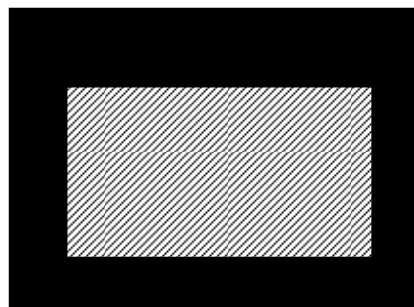
Les théories sur la physique des matériaux, étayées par l'expérience, confirment que la déformation plastique est éliminée pour des vitesses supérieures à certaines valeurs limitées liées à la structure atomique de chaque matériau, les vitesses de cisaillement intéressantes sont de l'ordre de 10-12 m/s, ce qui est considérablement supérieur aux vitesses traditionnelles de fabrication de l'ordre de 0,3 m/s dans les presses ordinaires.

La très haute vitesse de découpage conduit aux avantages suivants :

- ❖ Les bords arrondis sont minimisés ;
- ❖ La formation de bavures est limitée ou éliminée ;
- ❖ Topographie uniforme du profil de rupture ;
- ❖ Les bords découpés sont perpendiculaires au plan de la pièce travaillée ;
- ❖ Régularité des bords cisailés dans les matériaux non homogènes.



a) Vitesse de découpe
Traditionnelle 0,04m/s



b) Grande vitesse de découpe
12 m/s

Figure III-7 : Tôle découpée avec une vitesse traditionnelle et avec une grande vitesse. [18]

- ❖ Vitesses lentes engendrent une augmentation de la limite d'écoulement et l'augmentation de la charge à la rupture, l'allongement à la rupture peut augmenter aussi, ce qui donne un comportement élasto-plastique avec un écrouissage non linéaire du matériau.
- ❖ Vitesse seuil (de transition) est atteinte, donc la limite d'écoulement et la charge à la rupture sont identiques, le comportement est élasto-plastique parfaitement plastique donc l'écrouissage est nul.
- ❖ Aux vitesses supérieures, la limite d'écoulement est supérieure à la charge à la rupture donc la contrainte diminue avec la déformation et l'écrouissage est négatif. [15]

III-6 Température de découpe :

En général, la température joue un rôle inverse à la vitesse de déformation :

Une augmentation de la température engendre une réduction de la contrainte d'écoulement.

IV- La force de découpe :

Pour l'opération de découpage, la force F nécessaire au découpage d'une pièce se calcule de la façon suivante :

$$F = P \cdot e \cdot R_c \dots \dots \dots \text{II-2}$$

Avec :

F : C'est la force nécessaire au découpage, (en, N) ;

P : Périmètre des arêtes de coupe du poinçon, (en, mm) ;

e : épaisseur du matériau à découpé, (en, mm) ;

R_c : Résistance au cisaillement ($1\text{N/mm}^2 = 1\text{MPa}$), (en, N/mm^2).

Comme, il est plus facile de déterminer la résistance à la traction R_m que la résistance au cisaillement R_c , on utilise la formule suivante :

$$F = p \cdot e \cdot 0,9 R_m \dots \dots \dots \text{II-3}$$

On prend une sécurité de 10 à 15% de la force de découpe pour compenser l'effort d'extraction des pièces et des déchets. [19]

V- La force de jonc annulaire : [19]

La force de jonc annulaire pour retenir la matière pendant le découpage ne peut être calculé avec précision. Elle correspond à des valeurs comprises entre 30 et 50% de la force de découpe, pour des aciers doux et mi-durs. Elle augmente proportionnellement avec la valeur de la résistance à la traction. Toutefois, on peut utiliser la formule suivante, qui donne une bonne approximation :

$$F_a = L_a \cdot h_a \cdot R_m \cdot k_a \dots \dots \dots \text{II-4}$$

Avec:

F_a : force du jonc, (en, N) ;

h_a : hauteur du jonc, (en, mm) ;

R_m : résistance à la traction, (en, N/mm²) ;

k_a : facteur approximativement égal à 4.

VI- Force contre-poinçon :

Destinée à maintenir la pièce pendant l'opération de découpe, elle est comprise entre 5 et 15% de la force de découpe. Elle est réglée avec précision pendant les essais de la pièce à découper, de même que la force du jonc. Le réglage est fonction des tolérances demandées en planéité et en conicité. [19]

VII- Profil du bord de découpe : [18]

Le procédé de découpage comprend toute une série de processus de déformation élastique – plastique, ce sont les suivantes :

- ❖ Les bords de découpe créent par leur mouvement des entailles dans le matériau travaillé, élastique et plastique ;
- ❖ La compression associée aux entailles, entraîne une déformation plastique de la zone située entre les bords de découpe et qui correspond au jeu ;
- ❖ La déformation dans la zone cisailée (correspondant au jeu) signifie que la compression est perpendiculaire au sens du mouvement des bords de coupe ;
- ❖ Le matériau situé dans la zone cisailée s'allonge sous l'effet de la traction causée par les surfaces de contact de l'outil ;

- ❖ L'action de pliage dans la zone cisailée entraîne une déformation des zones de rupture et du matériau adjacent, ce qui produit des surfaces de séparation en forme S ;
- ❖ La topographie des bords cisailés est aplanie par les surfaces de contact de l'outil lors du mouvement de retour, ce qui entraîne une déformation plastique, un durcissement du travail, des ruptures et des contraintes résiduelles.

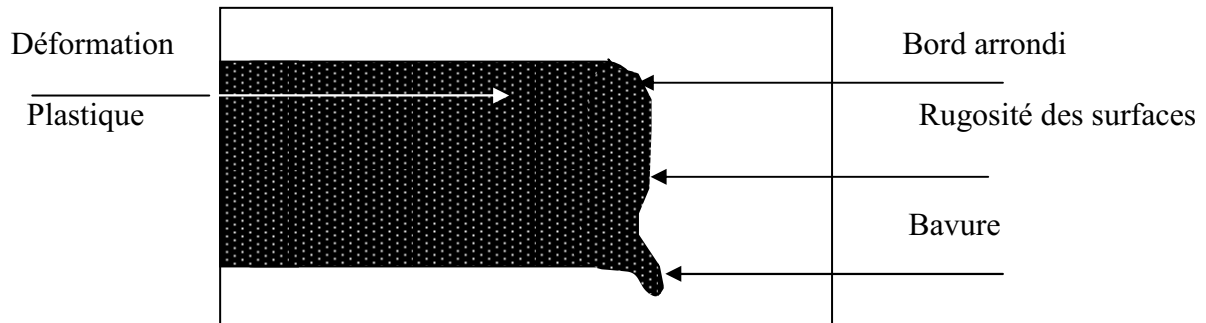


Figure III-8 : Profil de découpe lors du poinçonnage. [18].

Les mécanismes de découpage dans des conditions de travail traditionnelles entraînent les déformations suivantes par rapport aux conditions géométriques idéales des bords découpés (Figure II-8).

- ❖ Formation de bavures ;
- ❖ Bords arrondis ;
- ❖ Surfaces cisailées obliquement par rapport aux plans du matériau ;
- ❖ Profils cisailés en forme de S ;
- ❖ Sections cisailées légèrement inclinées par rapport aux surfaces du matériau ;
- ❖ Couches superficielles présentant une déformation plastique dans les zones cisailées.
- ❖ Topographie des surfaces cisailées présentant un caractère comprimé ;
- ❖ Irrégularité des flans.

Conclusion :

A partir de cette bibliographie, on peut tirer comme conclusion que la forme finale est l'état du matériau au voisinage de découpe, dépend essentiellement des paramètres suivants :

- Jeu de coupe ;
- La géométrie de l'outil ;
- Coefficient de frottement ;
- Epaisseur de la tôle ;
- Vitesse de découpe ;
- Température de découpe ;
- La lubrification en découpage.

Chapitre - IV

**Essais mécaniques, magnétiques
et microstructures**

Introduction

Après avoir vu la bibliographie des tôles magnétiques et le procédé de découpage, on passe dans ce chapitre à l'étude bibliographique des essais mécaniques, magnétiques et microstructures, car pour quantifier la dégradation de l'état magnétique, on doit connaître d'abord la dégradation mécanique du matériau lié au procédé de découpage.

I- Essais mécaniques :

Pour une précision exacte et un fonctionnement efficace d'une pièce seule ou dans un assemblage, exposé à des différentes sollicitations, température et pressions, Un mécanicien a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures, ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires, elles sont indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme.

I-1 La traction :

L'essai de traction est parmi les essais donnant les lois de comportement c'est-à-dire les relations entre les contraintes et les déformations, il est régie par la norme **NF 10002-1** pour les métaux [12], il est effectué sur des éprouvettes normalisées, tout en les soumettant à deux effort axiaux de sens opposés, d'une manière à les étirer; et par mesure instantanée des effort appliqués F en (KN) et le déformation absolue ΔL (en mm) qui est la variation absolu en longueur.

Nous obtenons une courbe dite, courbe brut de traction (Figure IV-1)

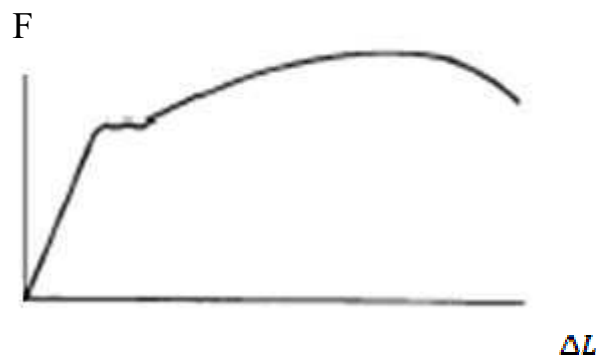


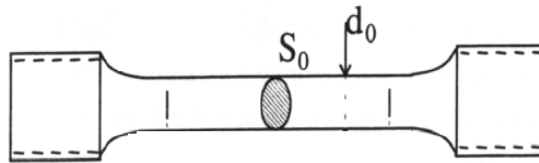
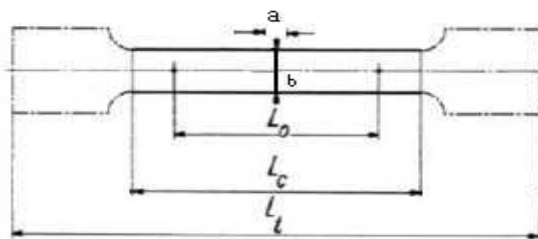
Figure IV-1 : Courbe brute de traction. [12]

I-1-1 Principe de l'essai :

L'essai de traction est réalisé sur différentes machines de traction, elles comportent un dispositif permettant d'appliquer un effort sur l'éprouvette et des systèmes de mesures pour déterminer d'une part la charge et d'autre part l'allongement. Quel que soit le dispositif de chargement, il doit assurer un effort de traction pure donc un alignement rigoureux des axes d'amarrage de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

I-1-2 L'éprouvette de traction :**❖ Forme de l'éprouvette :**

L'éprouvette présente en règle générale, des têtes d'amarrage plus larges que la partie calibrée, la longueur calibrée L_c doit être raccordées à ces têtes par un congé de rayon au moins égal à 12 mm. La largeur de ces têtes doit être de 20 mm au moins et de 40 mm au plus, (Figure IV-2). [12]

**a) Eprouvette ronde.****b) Eprouvette plate.****Figure IV-2 : Formes générale des éprouvettes de traction. [13]**

d_0 : diamètre de la partie calibrée, (en, mm) ;

S_0 : surface de la partie calibrée, (en, mm²) ;

a : épaisseur de l'éprouvette plate, (en, mm) ;

b : largeur de l'éprouvette plate, (en, mm) ;

L_0 : Longueur initiale entre deux repères, (en, mm) ;

L_c : longueur de la partie calibrée, (en, mm) ;

L_t : longueur totale de l'éprouvette, (en, mm) ;

❖ Dimensions de l'éprouvette :

• Epreuve non proportionnelle :

La longueur de la partie calibrée doit être au moins égale à $L_0 + b/2$. Dans le cas des éprouvettes constituées par des bandes à côtés parallèles de largeur inférieure à 20 mm, et si cela n'est pas spécifié dans la norme du produit, la longueur initiale entre repères L_0 doit être égale à 50 mm. Pour ce type d'éprouvette, la longueur libre entre les mâchoires est égale à $L_0 + 3b$.

Il existe deux types d'éprouvettes non proportionnelles dont les dimensions sont données dans le tableau IV-1. [12]

Tableau IV-1 : Dimensions des éprouvettes. [12]

Epreuve type	Largeur b (mm)	Longueur initiale entre repères L_0 (mm)	Longueur calibrée L_c (mm)	Longueur nominale libre entre mâchoires pour les bandes à côtés parallèles en (mm)
1	12.5 ± 1	50	75	87.5
2	20 ± 1	80	120	140

• Epreuve proportionnelle :

Une éprouvette est dite proportionnelle quand on prend la longueur initiale entre repère (L_0) proportionnelle à l'aire de la section initiale(S_0) selon l'une des deux relations :

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0} \text{ ou } L_0 = 11.3\sqrt{S_0}. [12]$$

I-1-3 La machine de traction :

La machine comporte un dispositif permettant d'appliquer un effort sur l'éprouvette, et des systèmes de mesure pour déterminer d'une part la charge et d'autre part l'allongement. Quel que soit le dispositif de chargement, il doit assurer un effort de traction pure, donc un alignement rigoureux des axes d'amarrage de l'éprouvette, parmi les différents types de machines de traction, on peut citer :

- Machine de traction hydraulique ;
- Machine de traction à vis ;
- Machine de traction hydraulique asservie.

I-1-4 Les conditions d'essai de traction : [7]**❖ Influence de la température sur les résultats de l'essai :**

Lorsque la température d'essai varie, ces caractéristiques évoluent, cette évolution se fait d'une manière continue de part et d'autre de la température ambiante, en général R_e et R_m diminuent quand la température s'élève.

❖ Influence de la vitesse de l'essai :

La vitesse de l'essai joue un rôle non négligeable sur les résultats, aussi la norme imposée exige le respect des conditions imposées.

I-1-5 Grandeurs mesurées : [13]

L'essai fournit un diagramme donnant la force appliquée à l'éprouvette en fonction de son allongement (Figure IV-3) et celle que l'on obtient d'habitude pour une vitesse de traverse constante. Dans le cas général, on observe :

❖ Une partie rectiligne correspondant au domaine d'élasticité,

L'équation de la droite peut s'écrire :

$$\tan \alpha = (F/S_0) / (\Delta L / L_0) \dots \dots \dots \text{IV-1}$$

$$\Rightarrow (F/S_0) = E \cdot (\Delta L / L_0) \dots \dots \dots \text{IV-2}$$

E : est le coefficient de proportionnalité, qui est appelé module d'élasticité longitudinal ou module de Young (daN/mm^2).

F/S_0 : est la contrainte σ appliquée au matériau;

$(\Delta L / L_0)$: est la déformation ϵ unitaire du matériau ;

Donc IV-3 sera égale à :

$$\sigma = E \epsilon \dots \dots \dots \text{IV-3}$$

Cette loi de proportionnalité entre la déformation et la contrainte est appelée loi de Hooke ; elle caractérise la rigidité des matériaux.

- ❖ Le domaine de déformation plastique uniforme;
- ❖ Un maximum correspondant à la charge maximale supportée par l'éprouvette, appelée couramment charge de rupture;
- ❖ Le domaine de striction dans lequel les déformations se localisent dans une zone limitée dont la section diminue rapidement qui s'explique de la manière suivante : à partir du point R_m correspondant à la charge maximale, l'effort décroît qui est dû à la diminution de la section par étranglement, l'étranglement s'accroît, puis l'éprouvette se rompt à l'endroit de l'étranglement qui s'appelle aussi la striction.
- ❖ Finalement la rupture de l'éprouvette.

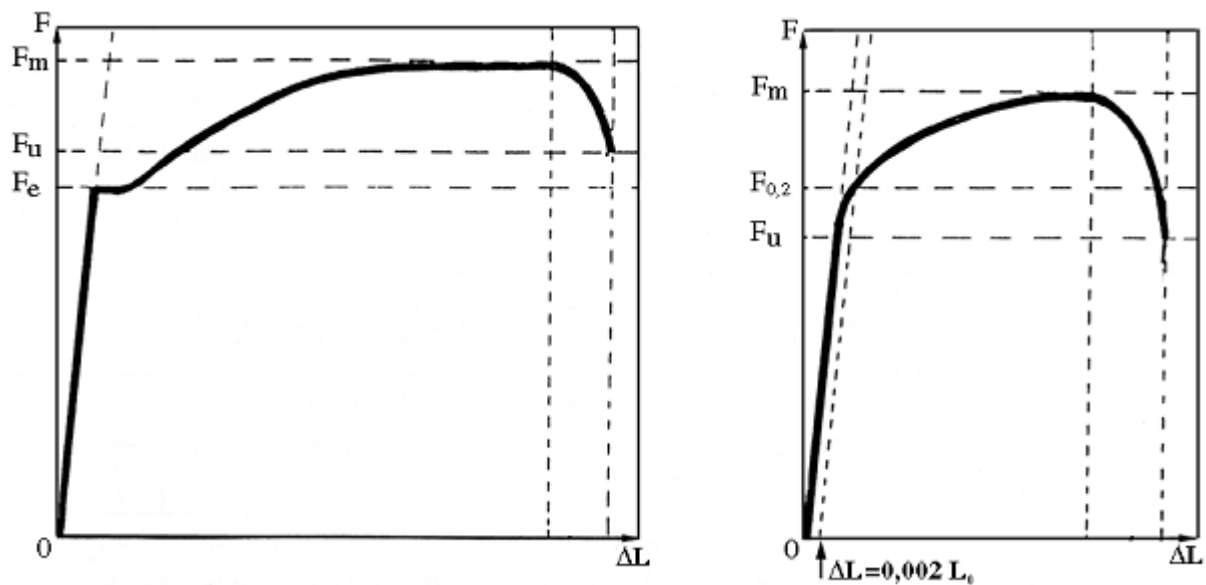


Figure IV-3 : Courbes de traction force-allongement. [13]

I-1-6 Détermination des caractéristiques mécaniques :

- ❖ Limite d'élasticité :

$$R_e = F_e / S_0 \text{ en (daN/mm}^2\text{)IV-4}$$

- ❖ Limite conventionnelle d'élasticité :

$$R_{p0,2} = F_{0,2} / S_0 \text{ en (daN/mm}^2\text{)IV-5}$$

- ❖ Résistance à la traction:

$$R_m = F_m / S_0 \text{ en (daN/mm}^2\text{)IV-6}$$

- ❖ Résistance à la rupture:

$$R_u = F_u / S_0 \text{ en (daN/mm}^2\text{)IV-7}$$

- ❖ Allongement à la rupture: L'allongement après rupture représente la différence de la longueur L_u de l'éprouvette reconstituée après rupture et la longueur initiale L_0 rapportée à la longueur initiale.

$$A = (L_u - L_0 / L_0) \times 100 \text{IV-8}$$

- ❖ Coefficient de striction :

$$Z_u = (S_0 - S_u / S_u) \times 100 \text{IV-9}$$

I-2 La dureté :

Peut être mesurée suivant les normes NF A 03-152, NF A 03-170 qui se définit comme étant la résistance d'un matériau à la pénétration, elle nous permet de caractériser un matériau, on peut distinguer plusieurs méthodes pour la mesure de la dureté selon la nature de notre matériau (Tableau IV-2)

Tableau IV-2 : Différentes méthodes de mesure de la dureté.

Méthodes	Pénétrateur	Charge	Dureté	Illustration
Rockwell C	Cône en diamant 120°	150 Kg F	HRC = f(z)	
Rockwell B	Bille en acier dur ($\varnothing = 1.59 \text{ mm}$)	100 Kg F	HRB = f(z)	
Brinell	Acier dur ou carbure $\varnothing = 10 \text{ mm}$	500 ou 3000 Kg F	$HB = \frac{2F}{\pi D \sqrt{D - \sqrt{D^2 - d^2}}}$	
Vickers	Diamant pyramidal 136°	5 à 100 Kg F	$HV = \frac{1.854 F}{d^2}$	
Microdureté Vickers	Diamant pyramidal	5 à 500 g F	$HV = \frac{1.854 F}{d^2}$	

I-2-1 Principe de l'essai de la dureté :

Un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on déduit la dureté, plus l'objet pénétrant s'efforce, plus la surface (S) s'agrandit. [7]

I-2-2 Les conditions d'essai de la dureté : [7]

- ❖ l'essai est normalement conduit à température ambiante ;
- ❖ la charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibration, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes ;
- ❖ on prépare la surface pour éviter toute altération ;
- ❖ l'épaisseur minimale de l'éprouvette est fonction du diamètre de l'empreinte ;
- ❖ la pièce doit reposer sur un support rigide.

I-2-3 Essais de Microdureté :

Ils correspondent à des charges inférieures à 49,03 N

(Charge réduite NF EN ISO 6507-1) ou inférieures à 1,96 N (Microdureté). Le pénétrateur est en général de type Vickers, la mesure de la dimension de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope (x100 ou x400). [7]

Ils sont particulièrement adéquats pour :

- Examiner les différentes phases dans les alliages hétérogènes ;
- Vérifier l'augmentation de la dureté au fur et à mesure que la concentration d'un élément d'alliage dans un cristal augmente ;
- Faire le test de dureté sur des pellicules minces.....etc.

II- l'analyse chimique : [25]

L'analyse chimique qui a pour but de donner des résultats généralement quantitatifs (concentration), car la composition chimique d'un matériau influe sur la microstructure, la cinétique des transformations de phases et les propriétés mécaniques de ce matériau,

L'analyse chimique s'effectue avec plusieurs méthodes :

- Les méthodes classiques : c'est la mise en jeu des réactions chimiques avec des réactifs, sont des méthodes laborieuses, qui nécessitent des échantillons importants ;
- Un grand nombre d'analyses s'effectuent par l'intermédiaire d'instruments et de machines variés qui sont installés dans des laboratoires d'analyse.

Par exemple :

- Le l'absorption atomique ;
- L'analyse avec la diffraction des rayons X ;
- La CS800 pour la détection du carbone et soufre.

- Comme il y'a aussi d'autres méthodes modernes plus sophistiquées par exemple :
 - Méthodes de dosage par marquage ;
 - Spectromètre de masse.....etc.

III- La micrographie :

L'examen métallographique a pour but principal, la mise en évidence de la structure de l'échantillon ; l'évolution de la forme, la distribution, la quantité et l'identité des constituants. Il existe deux méthodes d'examens métallographiques, la microscopie optique et la microscopie électronique.

III-1 Examen par microscopie optique : (MO)

Le microscope optique a un pouvoir de résolution de l'ordre de 0,2 micromètre, il permet d'obtenir des grossissements allant jusqu'à 1000 fois.

Il est constitué des parties principales suivantes : une source lumineuse qui émis des rayons grâce au condenseur et à la lentille de l'objectif qui éclaire l'échantillon observé par un faisceau de lumière parallèle, les rayons réfléchis par l'échantillon sont repris par la lentille de l'objectif, qui en donne la première image intermédiaire grâce à un miroir semi réfléchissant, l'observateur peut obtenir une image finale et agrandie de l'échantillon à travers la lentille oculaire et à travers de son œil, on peut aussi obtenir une image réelle qui sera projeter sur un écran ou sur une plaque photographique. [3] (voir la Figure IV-4)



Figure IV-4 : Microscope optique. [3]

Pour effectuer l'examen métallographique avec le microscope optique, cela nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement à effectuer sur le produit, à l'attaque chimique.

❖ Prélèvement de l'échantillon et préparation de la surface d'examen :

L'échantillon est découpé de façon à obtenir une surface d'examen, généralement comprise entre 1 et 10 cm² avec un état de surface usuel ; brut de tronçonnage ; ayant subi une passe sur bande abrasive.

❖ Le polissage mécanique :

Il se fait par le frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine, on prend en considération, l'arrosage lors du polissage. [7]

❖ Le polissage de finition :

Le polissage mécanique est suivi d'un polissage de finition qui est destiné à améliorer l'état de la surface à analyser.

❖ Attaque chimique :

Après le polissage de finition, l'échantillon est lavé puis séché, puis il est soumis ensuite à une attaque chimique, pendant quelques secondes pour faire disparaître l'éclat miroir mais sans trop noircir la surface à observer. Dans le tableau ci-dessous, on présente quelques réactifs d'attaque chimique :

Tableau IV-3 : Réactifs d'attaque chimique. [7]

Désignation	composition	Domaine d'application	Durée d'attaque
Solution alcoolique nitrique (Nital)	▪ 2 à 5 ml d'acide nitrique ▪ 100 ml d'éthanol pur	Examen des structures : ▪ Aciers au carbone faiblement alliés ▪ Aciers alliés	5s à 1,5 min à température ambiante
Réactifs au ferricyanure de potassium alcalin (Murakami)	▪ 10g de ferricyanure de potassium ▪ 10g d'hydroxyde de sodium ▪ 100 d'eau	Mise en évidence des carbures, de la phase sigma de la ferrite des : ▪ Aciers inoxydables ▪ Aciers au chrome	30s à 5min à température ambiante

Réactif au chlorure ferrique et à l'acide chlorhydrique en solution aqueuse (Curran)	▪ 10g chlorure ferrique ▪ 30 ml d'acide chlorhydrique ▪ 120 ml d'eau	Examen des structures : ▪ Aciers inoxydable austénitique ▪ Alliages et aciers réfractaire	30s à température ambiante
Solution aqueuse saturée d'acide picrique	▪ Solution saturée d'acide picrique ▪ 0,5 à 5% d'alkylsulfonate de sodium	Mise en évidence ▪ Du grain austénitique ▪ De la cémentite dans le cas des aciers extra-doux	30s à 2min à température ambiante

III-2 Examen par microscopie électronique à balayage (MEB) :

Il est constitué d'un canon à électrons primaire , reproduisant une énergie constante généralement comprise entre 1 et 35 Kev, un système de lentilles condensatrices permettant de réduire la taille du faisceau d'électrons primaires de la lentille de l'objectif dont le rôle est de réduire de nouveau la taille de faisceau d'électrons primaire et de le focaliser sur un échantillon massif grâce au module de balayage ,ce faisceau d'électrons primaire balaye une région de largeur (l) de l'échantillon. Un des signaux produit par le bombardement de l'échantillon par les électrons primaires est capté par un détecteur approprié et amplifié, ce signal amplifié le module de la brillance d'un écran cathodique de largeur (L) et dont la fréquence de balayage est identique à celle utilisé pour le balayage de faisceau d'électrons primaires sur l'échantillon , ce qui veut dire qu' à tout point de coordonnées (x , y) de la zone balayée de l'échantillon correspond à un point homologue de coordonnées (x , y) sur l'écran cathodique et le grossissement obtenu est égale au rapport L/l .[3]

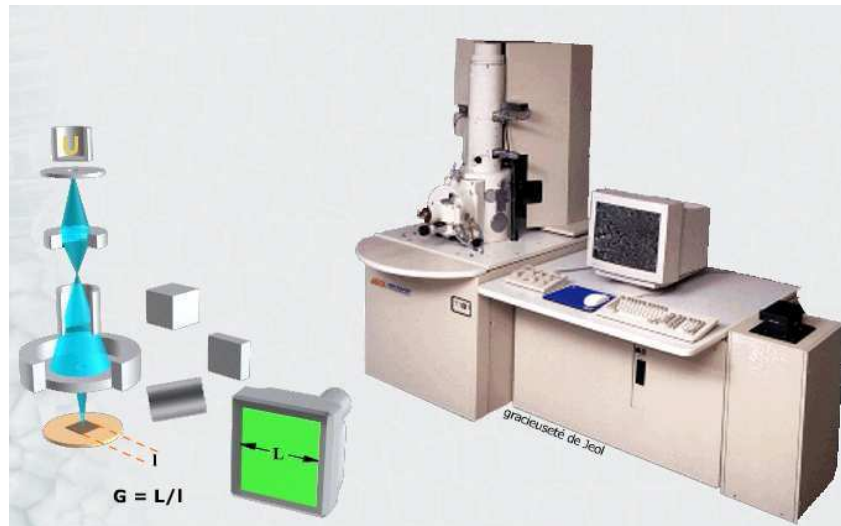


Figure IV-5 : microscope électronique à balayage. [3]

III-3 Examen par microscopie électronique à transmission (MET) :

Il est constitué d'un canon à électrons ayant une énergie constante généralement comprise entre 800 à 3000Kev, un ensemble de lentilles condensatrices permettent d'obtenir un faisceau d'électrons, qui tombent sur l'échantillon du matériau étudié appelé lame mince, la lentille objective et le système de lentilles projectives, permettent d'obtenir une image de la zone observée de la lame mince sur un écran fluorissant, le grossissement obtenu varie de dix mille jusqu'à trois cent mille fois la limite de résolution spatiale atteinte dans certains microscopes électroniques à transmissions, l'observation des rangées d'atomes dans un échantillon cristallin.[3]

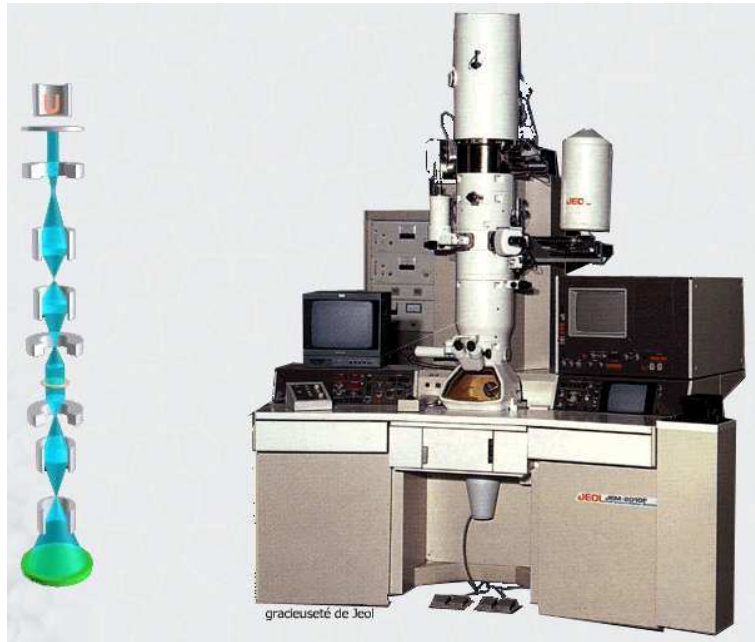


Figure IV-6 : microscope électronique à transmission. [3]

III-4 Paramètres microstructuraux :

❖ Grains et joints de grains :

Un cristal est formé d'un grand nombre de petits volumes distincts au microscope optique de forme polyédrique, appelé grains. Les régions où les grains se touchent sont appelées joints de grains, chaque grain représente un monocristal, la structure du joint dépend de l'orientation des faces des polyèdres les uns par rapport aux autres. Les joints de grains des matériaux métalliques sont plus facilement attaqués par des acides que le cristal, ce qui les rend visible au microscope optique.

Dans un examen métallographique, les grains qui ont des volumes apparaissent sous forme de plans et les joints qui sont des surfaces sous forme de lignes.

Il existe trois types principaux de joints de grains :

- **Joint cohérent** : lorsque chaque cristallite reste parfaite jusqu'à l'interface ;
- **Joint semi-cohérent** : lorsqu'il existe entre deux empilements parfaits, une zone de transition bien ordonnée ;
- **Joint désordonné** : lorsqu'il existe entre deux empilements parfaits, une zone neutre non ordonnée.

❖ Phase :

Une phase est une partie homogène d'un système dont les caractéristiques physiques et chimiques sont uniformes. [27]

Elle est caractérisée par :

- La composition chimique, le type de réseau cristallin et les propriétés résultantes ;
- La présence d'une surface de séparation avec les autres parties du système appelée « interface » ;
- Un changement brusque de composition et propriétés lors de passage à travers cette interface.

❖ Pores :

Dans des blocs de métal brut de coulée, on peut mettre en évidence trois types de cavités :

- Les retassures provoquées par la forte diminution de volume que subit le métal lors de son passage de l'état liquide à l'état solide ;
- Les inclusions d'air, qui n'ont pas pu s'échapper avant la solidification lors de la pénétration d'air dans le métal à l'issue de la coulée.
- Les pores d'hydrogène qui apparaissent dans la structure de la coulée sous forme de cavités.

III-5 Importance de la métallographie :

L'étude de la métallographie est un moyen de contrôler l'essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques. Toute étude des matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographique car ce sont eux qui donnent aux métaux leurs caractéristiques mécaniques.

IV- Différents types de critères qui influent sur les propriétés mécaniques : [17]**IV-1 Critères métallographiques :**

Deux critères contrôlent l'aptitude au formage à froid :

- ❖ Le taux et la morphologie de la perlite et de la ferrite ;
- ❖ La propreté inclusionnaire : proportion et répartition des différents types d'inclusions ;

IV-2 Critères fondés sur les efforts de formage :

- ❖ La dureté ;
- ❖ La limite d'élasticité ou la résistance en traction à la température ambiante.

IV-3 Critères de la ductilité :

La déformation à froid peut être limitée par l'apparition de défauts internes ou superficiels, déchirures ou rupture liées à l'intensité locale des contraintes et la sévérité des déformations imposées. La capacité de déformation est alors appréciée par des critères de ductilités :

- ❖ Allongement et striction en traction uniaxiale ;
- ❖ Coefficient d'écrouissage n ($\sigma = K \epsilon^n$) ou allongement réparti en traction ;
- ❖ Nombre de tours à rupture en traction à froid ;
- ❖ Striction à rupture d'éprouvettes de traction entaillées.

IV-4 Influence de la microstructure sur les critères :

Pour chaque paramètre métallurgique, nous examinerons l'influence sur la résistance à la déformation d'une part et la ductilité d'autre part.

IV-4-1 La teneur en carbone :

Dans les structures ferrite-perlite, la résistance à l'état recuit augmente à peu près linéairement avec la teneur en carbone, l'augmentation est plus rapide dans les structures à perlite que dans les structures ferritiques ou le pourcentage de carbone est faible, alors la présence de la perlite entraîne une diminution rapide de la ductilité.

IV-4-2 Composition de différents types de microstructure :

Les états perlitiques sont avantageux en formage à froid, la déformation n'est pas intense (effort élevé, ductilité modérée). Les états ferritiques sont à la fois plus doux et plus ductiles, donc moins favorables pour l'usinabilité.

IV-4-3 Rôles des éléments d'additions :

Les éléments qui entrent dans la composition des aciers sont soit des additions volontaires (durcissement, trempabilité, aptitude aux traitements superficiels), soit des impuretés provenant de l'élaboration. Des éléments comme Mn, Mo, Cr et V se partagent entre les carbures et la ferrite dans des proportions qui dépendent de l'élément, de sa teneur et aussi de la teneur en C. alors que Cr, Mo et Ti se retrouvent essentiellement dans les carbures, le

coefficient de partage du Mn entre le carbure et la ferrite augmente à peu près linéairement avec la teneur en carbone.

IV-4-4 Autres paramètres :

Le métal qui est mis en forme peut être pré-écroui par l'opération (découpage, pliage, tréfilage.....). L'écrouissage augmente la résistance à la déformation et réduit sa ductilité.

V- Essai magnétique :

Un matériau magnétique idéal est celui qui peut acquérir une polarisation magnétique de très grand module, disons plusieurs Tesla, dans un champs d'excitation très réduit, il possède donc une très grande perméabilité magnétique et aucune perte en fonction dynamique , mais l'idéal n'est pas atteint car les matériaux magnétique présentent toujours certaines pertes et ils sont commercialisés avec des spécifications garanties.

III-1 Mesure des pertes magnétiques :

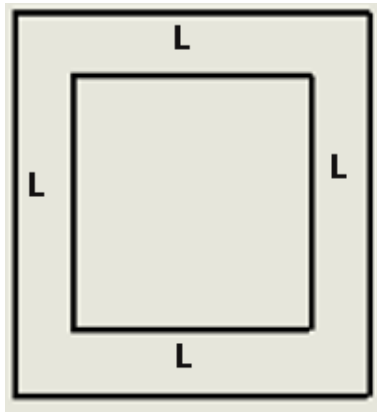
III-1-1 Le cadre Epstein :

C'est un circuit fermé démontable, de forme carrée, utilisé pour caractériser les tôles magnétique. Sa construction a été soigneusement codifiée par de nombreux organismes de normalisation (CEI, AFNOR, etc.....).

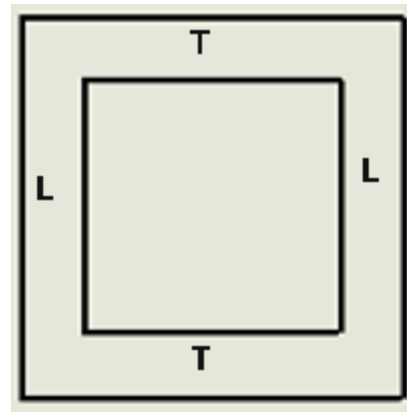
Le noyau magnétique est constitué de N bandes rectangulaires (N étant multiple de 4 et au moins égale à 16). Les dimensions recommandées pour chaque bande étant 280 x 30 mm², on utilise environ 0,5 Kg de matière par noyau magnétique.

Les N bandes sont assemblés en un circuit carré, avec des joints à recouvrement, de telle sorte que le périmètre moyen vaut exactement 1m. Les bandes sont découpées aux côtes précises et sans bavures dans la tôle qu'il s'agit d'évaluer, soit parallèle à la direction du laminage s'il s'agit d'une tôle à grains orientés, soit pour moitié seulement dans la direction du laminage et pour moitié dans la direction de travers s'il s'agit d'une tôle ordinaire.

Les N bandes sont ensuite assemblées avec des joints à recouvrement selon la disposition indiquée sur la figure IV-7, en glissant dans des fourreaux qui supportent les bobinages fixes d'excitation et de mesure. [8]



a) Les mesures s'effectuent
Parallèlement, sens longitudinal
(direction de laminage).



b) les mesures s'effectuent
suivant la direction de laminage
(sens L) pour une bande et
suivant le sens travers T pour
l'autre bande.

Figure IV-7 : Mode d'assemblage de N bandes unitaire en circuit Epstein.

III-1-2 Grandeurs mesurées :

❖ la polarisation magnétique :

$$\mathbf{J} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H} \dots \dots \dots \text{IV-10}$$

J : Polarisation magnétique ;

B : Induction magnétique ;

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ H. m}^{-1}$$

Avec :

. μ_0 : La constante magnétique ;

Les mesures sont effectuées à température ambiante ($23 \pm ^\circ\text{C}$).

❖ La masse active m_a :

$$m_a = (L_m / 4L) \times m_p \text{ en (Kg)} \dots \dots \dots \text{IV-11}$$

m_p : la masse des éprouvettes qui construit le circuit magnétique, en (Kg) ;

L_m : la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique ; $L_m=0,94\text{mm}$;

L : la longueur d'une bande d'éprouvettes, (en mm).

❖ Section utile A :

$$A = m_p / 4L \rho \text{ en (m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{IV-12}$$

ρ : masse volumique de la tôle, (en Kg/dm^3);

m_p : la masse des éprouvettes qui construit le circuit magnétique, en (Kg) ;

L : la longueur d'une bande d'éprouvettes (mm).

❖ Le champ magnétique :

$$H = (N_1/L_m) \times I_1 \text{ en (A/m)} \dots\dots\dots \text{IV-13}$$

N_1 : nombre de spires au primaire ;

L_m : la longueur effective conventionnelle du circuit magnétique avec $L_m=0,94\text{mm}$;

I_1 : courant de crête au primaire (A) ;

❖ Induction magnétique :

$$B = (1/N_2 A) \int U_2 dt \text{ en (T)} \dots\dots\dots \text{IV-14}$$

N_2 : nombre de spires au secondaire;

A : section active, en (m^2) ;

U_2 : tension induite au secondaire du transformateur, en (v).

❖ Pertes totale spécifiques :

$$P_S = P_w N_1 / m_a N_2 \text{ en (W/Kg)} \dots\dots\dots \text{IV-15}$$

P_w : puissance active absorbée (w) ;

N_1 : nombre de spires au primaire ;

m_a : masse active, en (Kg).

- ❖ La perméabilité magnétique relative du matériau par rapport au vide :

$$\mu_r = B_{\max} / H_{\max} \text{ en } (\text{H} \cdot \text{m}^{-1}) \dots \text{IV-16}$$

- ❖ Les pertes par hystérésis :

Ce type de pertes est lié au cycle d'hystérésis du matériau. Le parcours du cycle B(H) fait apparaître une perte d'énergie qui correspond alors à un échauffement de la matière. Elles sont donc proportionnelles à la fréquence et sont liées à la structure du matériau [26].

$$P_H = C_H (f/f_0) (B/B_0)^2 m \text{ en } (\text{W/Kg}) \dots \text{IV-17}$$

C_H : coefficient de pertes par courant de Foucault ;

f_0 : fréquence de référence (50 Hz en général) ;

B_0 : induction de référence (1 ou 1,5 T) ;

m : masse de fer, (en Kg).

- ❖ Les pertes par courant de Foucault :

Les variations du champ magnétique dans la matière génèrent par induction des courants induits qui se rebouclent sur eux-mêmes. Il y a donc échauffement par effet joule. Cette fois-ci, ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence. Afin de les limiter, on cherche à réduire le parcours des courants induits, c'est pour cette raison que l'on utilise des circuits magnétiques feuilletés isolés [26].

$$P_F = C_F (f/f_0)^2 (B/B_0)^2 (e/e_0)^2 m \text{ en } (\text{W/Kg}) \dots \text{IV-18}$$

C_F : coefficient de pertes par courant de Foucault ;

f_0 : fréquence de référence (50 Hz en général) ;

B_0 : induction de référence (1 ou 1,5 T) ;

e_0 : épaisseur de référence (0,5 mm en général) ;

m : masse du fer, (en Kg).

- ❖ Le coefficient d'anisotropie des pertes spécifique totale P_s à 1,5 Tesla :

$$[P_{1,5(L)} - P_{1,5(T)} / P_{1,5(L)} + P_{1,5(T)}] * 100 \dots \text{IV-19}$$

$P_{1,5}(L)$: pertes spécifiques à 1,5 Tesla dans le circuit magnétique formé avec des éprouvettes prise en sens L du laminage ;

$P_{1,5}(T)$: pertes spécifiques à 1,5 Tesla dans le circuit magnétique formé avec des éprouvettes prises en sens T du laminage.

Conclusion :

Les essais étudiés dans ce chapitre, nous permettrons de relier la dégradation des caractéristiques magnétiques du matériau à sa microstructure qui est reliée à son tour aux déformations plastiques imposées lors du découpage.

La deuxième partie

**Techniques expérimentales,
Résultats et discussions**

Chapitre - V

Techniques expérimentales

Les appareils électromécaniques que ce soit les transformateurs, ou les moteurs électriques, sont constitués de tôles minces empilées les unes sur les autres dans le but de réaliser des circuits magnétiques performants, cette performance est caractérisée par les valeurs des pertes du fer dans les machines électriques, ces pertes sont locales et dépendent de l'état microstructural du matériau.

Notre objectif dans ce chapitre est de prédéterminer à partir des caractéristiques magnétiques, les pertes du fer et à partir des essais mécaniques, la dégradation des propriétés mécaniques des tôles dues au procédé de découpage, les mesures ainsi réalisées auront pour but de cerner, d'une part le comportement purement mécanique de la tôle, d'autre part de relier l'évolution de ces caractéristiques magnétiques aux modifications de sa microstructure engendré par l'opération de découpage.

I- Présentation de la tôle à étudier :

I-1 Tôles magnétiques livrées à l'état semi-fini :

C'est une tôle magnétique en acier (M800-65D) non allié laminées à froid, livrées à l'état semi-fini, sous forme de tôle mince d'épaisseur de 0,65mm, la prescription de qualité, dimensions, tolérances et essais spécifiques sont régies par la norme européenne AFNOR, le recuit final de ces tôles sont effectués par les soins de l'acheteur (l'entreprise), les caractéristiques magnétique (Annexe A) obtenues grâce à un traitement thermique adéquat, qui s'effectue à $790^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ sous atmosphère décarburante et doivent être maintenues pendant une durée de 2heures (2H) à cette température. La vitesse de chauffage ne doit dépasser 200°C/h . La vitesse de refroidissement de 790°C à 550°C ne doit pas excéder 120°C/h . Le gaz nécessaire à la décarburation doit se composer de 20% en volume de H_2 , 80% en volume de N_2 avec de la vapeur d'eau.

L'établissement d'une atmosphère décarburante, exige l'évacuation de l'air du four de recuit avant la mise en température. Cette évacuation se fait par insufflation en continu dans le four d'un gaz de protection inflammable. Le débit du gaz de protection ainsi que la pression doivent être réglés de façon à assurer une bonne décarburation en tout point de l'éprouvette et un renouvellement complet de l'atmosphère du four plusieurs fois pendant le recuit.

I-2 Tôles magnétiques à grains non orientés livrées à l'état fini :

C'est une tôle magnétique à grains non orientés (M800-65A) laminées à froid et livrées à l'état fini, sous forme de tôle mince d'épaisseur de 0,65mm, ce qui veut dire qu'elle est livrée

après un recuit final. La prescription de qualité, dimensions, tolérances et essais spécifiques sont régies par la norme européenne AFNOR, les caractéristiques magnétique (Annexe A).

La (M800-65A) sont des tôles revêtues sur les deux faces de laques ou de peinture, ces dernières peuvent être isolantes ou ne pas l'être, elles peuvent être à base de résines organiques, inorganiques ou mixtes.

Il a été constaté que certains de ces revêtements possèdent également une action lubrifiante lors du découpage.

Les tôles finies et semi- finies sont livrées sous forme de bobines.

II- La composition chimique :

Dans le but de déterminer les compositions chimiques des tôles, on prélève des échantillons à partir des bobines à l'état de livraison et on les met sous forme de poudres métalliques.

Les tableaux ci-dessous, nous donnent la composition chimique des tôles étudiées :

Tableau V-1 : Composition chimique de la Tôle (M800-65D) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI.

Eléments chimiques	C	S	Mn	Si
Analyse de référence %	0,03415	0,01242	0,70	0,23

Tableau V-2 : Composition chimique du la Tôle (M800-65A) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI.

Eléments chimiques	C	S	Mn	Si
Analyse de référence %	0,00638	0,008009	0,37	0,99

III- Essai de traction :

En respectant la norme **NF 10002-1** de l'essai de traction (chapitre précédent), lors du prélèvement des éprouvettes, des précautions devront être prise pour éviter toute modification de la structure du métal, résultant soit à un échauffement, soit d'une déformation du métal qui va entraîner à son tour l'écrouissage de notre matériau et en tenant compte du sens du prélèvement pour vérifier l'anisotropie du matériau.

Après avoir découpé et usiné soixante (60) éprouvettes de traction normalisées non proportionnelles de la tôle semi-finie (M800-65D) et de la tôle finie

(M800-65A) de longueur 200mm, de largeur 30mm et d'épaisseur 0,65mm

(Figure V-1), trente(30) éprouvettes de chaque tôle, dix(10) éprouvettes dans le sens du laminage (sens longitudinale (L)), dix(10) éprouvettes dans le sens transversal (T), dix(10) éprouvettes dans le sens 45° de la direction du laminage, la déformation a été mesurée à l'aide d'un extensomètre. Ces opérations ont été effectuées à l'EI sur une fraiseuse à commande numérique.

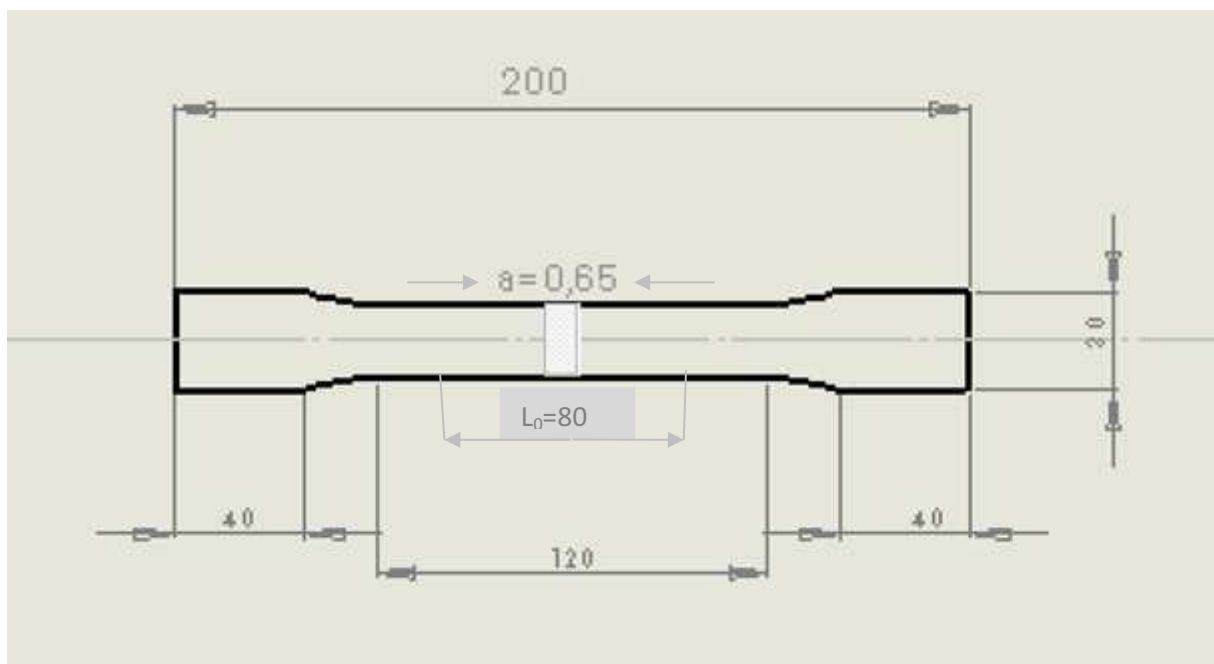


Figure V-1 : Eprouvette de traction normalisée non proportionnelle.

❖ Machine de traction :

Nous avons effectué l'essai de traction au niveau du laboratoire de physique de l'EI sur une machine de traction Schenk-Trebel (Annexe B), (Figure V-2)



Figure V-2 : Machine de traction.

IV-Essai de dureté :

En respectant la norme de l'essai de dureté (chapitre précédent), lors de prélèvement des éprouvettes, des précautions devront être prises pour éviter toute modification de la structure du métal, résultant soit à un échauffement, soit d'une déformation du métal qui va entraîner à son tour, l'écrouissage de notre matériau, ce qui donnera des résultats erronés de la dureté.

Après avoir préparé cinq (5) éprouvettes de dureté pour la tôle semi-finie

(M800-65D), cinq (5) éprouvettes de la tôle finie (M800-65A) et cinq (5) autres éprouvettes de la tôle semi-finie (M800-65D) après recuit.

On prépare la surface de nos échantillons (polissage), et on passe à l'essai de dureté qui est effectué sur un duromètre de l'EI (voir Annexe B), (Figure-3).



Figure V-3 : Duromètre.

On choisit la charge selon l'épaisseur de la tôle (voir Annexe C), on place notre échantillon sur l'appareil et on règle la charge qui est de $F=10\text{Kgf}$ et on maintient pendant dix secondes (10s), les essais ont été effectués à l'aide d'un pénétrateur Vickers qui est un diamant taillé en forme de pyramide, la dureté Vickers est liée à la longueur de la diagonale de l'empreinte (d) et à la charge appliquée (F) par la relation :

$$HV = \frac{1.854 F}{d^2} \dots\dots\dots V-1$$

F : charge du test, en (Kgf)

d : longueur des diagonales (en, mm)

V- Examens micrographiques :

Pour effectuer les examens micrographiques, il faut préparer avec un plus grand soin la surface de l'échantillon en suivant les étapes ci-dessous :

❖ Prélèvement :

Le prélèvement de notre échantillon doit être fait dans la Zone 1 de la planche N° II qui se fait avec un sécateur, le mode de prélèvement ne doit pas provoquer une surchauffe afin d'éviter la modification de la structure de l'échantillon.

❖ Enrobage :

L'enrobage est une opération qui consiste à emprisonner l'échantillon dans de la résine pour faciliter sa manipulation lors du polissage.

L'échantillon est placé dans une cellule cylindrique en acier inox, puis recouvert de poudre de la bakélite ou de la matière plastique, l'ensemble est comprimé puis chauffé jusqu'à 180° C à l'aide d'une résistance.

La pression est maintenue jusqu'à la température de ramollissement de la matière d'enrobage, ensuite, on refroidit l'ensemble par un circuit d'eau et l'échantillon est chassé de la cellule par action de piston.

❖ Polissage mécanique :

Cette opération est réalisée au moyen d'une polisseuse mécanique de type KNUTH-ROTOR alimentée sous une tension de 220V, elle est munie d'un dispositif d'arrosage avec un disque de type Struers DAP-6 alimentée sous une tension de 220V, la vitesse de rotation est comprise entre 150 trs/ min et 300 trs/min (Figure V-3). Elle consiste à rendre la surface à analyser plane et brillante et dénuée de toute rayure. Pour cela, on frotte l'échantillon sur des papiers abrasifs en carbure de silicium(SiC), de granulométries décroissantes (240, 600, 1000, 1200, 2400 et le 4000), collés sur les disques de la polisseuse, on polit l'échantillon dans un sens et dans un autre sens perpendiculaire au premier sens, sous l'arrosage d'eau pour éviter l'échauffement et évacué les particules arrachées au cours de l'abrasion, cette opération dure environ trois(3)minutes par granulométrie, le passage par tous ces papiers, doit assurer un polissage miroir de la surface à analyser qui ne doit présenter aucune rayure discernable à l'œil nu.

❖ Le polissage de finition :

Il consiste à frotter la surface polie sur un feutre collé sur un disque tournant sur lequel on a versé un abrasif d'alumine en suspension, préparée à l'aide de 100g de poudre très fines d'alumine dans deux litres (2L) d'eau distillée dans un flacon, la surface obtenue présente les caractéristique d'un miroir.

Pour les échantillons destinés à l'examen au microscope électronique à balayage, la finition doit être faite avec de l'alumine et puis avec de la silice colloïdale.

❖ Attaque chimique :

L'attaque a pour but de relever les joints des cristaux et de différencier les constituants de l'acier, après le polissage de finition. On rince notre échantillon et on le sèche puis ensuite on le soumet à une attaque chimique qui consiste à tremper la face à attaquer dans un réactif qui est le Nital (tableau IV-3) pendant un temps convenable à la température ambiante, puis on lave l'échantillon sous un jet d'eau et on sèche à l'aide d'un séchoir.

❖ Techniques de caractérisation :**▪ La microscopie optique(MO) :**

Les micrographies sont réalisées au la microscopie optique(MO), pour mettre en évidence la structure du matériau, on a utilisé un microscope métallographique de type HUND muni d'une caméra vidéo de type Eyes Cora permettant l'acquisition des micrographies sur l'ordinateur, qui permet d'observer des surfaces planes par réflexion de la lumière.

▪ La microscopie électronique à balayage :

Afin d'observer les échantillons à plus fort grossissement et de connaître qualitativement leurs composition chimiques, un microscope électronique à balayage de marque ESEM Philips XL 30 à filament en tungstène (W) est utilisé.

Le microscope de l'UMMTO est muni d'un système d'analyse X à dispersion d'énergie EDS-X (Energy Dispersive Spectrometry of X-Ray). Les photos tirées de ces observations ainsi que les profils d'analyse sont recueillis par ordinateur.

La surface des échantillons est balayée par un faisceau d'électrons accélérés à une tension de 20 KV, obtenu par chauffage d'un filament de tungstène, l'interaction entre le faisceau électronique et l'échantillon se traduit par l'émission d'électrons secondaires SE et rétrodiffusés BSE (Backscattered Electrons), la détection de ces électrons est mise à profit pour obtenir des images réalisées à partir d'un balayage de la surface.

VI- Essai de microdureté :

La microdureté des feuilles statorique (Planche III, Zone 1) a été réalisée sur les tôles livrées à l'état fini (M800-65A) et (M800-50A) sur leurs deux faces (face arrachée et face coupée),

Les mesures sont faites avec un microduromètre de la BCR de type V-Testor 2 sous une charge de 50g pendant 20secondes avec un indenteur Vickers qui est un diamant taillé en forme de pyramide dont la base est carrée.

Pour obtenir la meilleure précision lors de la mesure de dureté, les empreintes ont été observées au microscope optique pour un grossissement de Gx200 (Figure V-4).



Figure V-4 : Microduromètre.

VII- Essai de découpage :

L'essai de découpage est effectué sur la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) au niveau de l'atelier de l'EI, l'opération de découpage se fait sur une presse SHULER (Figure V-5) à haut rendement, principe poinçon-matrice donc sur outils à élément en acier à outil travaillant à froid, pour la découpe des feuilles rotorique.



Figure V-5 : Presse Schuler.

Notre matériau étudié se présente sous forme de bande de 0,65 mm d'épaisseur enroulée sur une bobine, afin de pouvoir amener la matière sous l'outil de découpe, elle est posée sur un dévidoir.

A partir de l'appareillage de commande, on fait varier la vitesse de découpe, avec un jeu de découpe égale à 3,5% et une dépouille de 9', l'effort de poinçonnage est de l'ordre de 3150 KN ;

- La feuille rotorique est découpée avec la vitesse adoptée (V_0) de sorte que $V_0 = 100$ coups/minute ;
- La feuille rotorique est découpée avec $V_1 = 2V_0 = 200$ coups/min ;
- La feuille rotorique est découpée avec $V_1 = 2,5V_0 = 250$ coups/min.

VIII- Essai magnétique :

On a réalisé l'essai magnétique au laboratoire de physique de l'EI, après avoir préparé trente-deux (32) éprouvettes de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), et seize (16) éprouvettes dans la direction transversale du laminage et « seize(16) éprouvettes dans la direction longitudinale du laminage », trente-deux (32) éprouvettes de la tôle livrée à l'état semi- fini (M800-65D) non recuites « seize (16) éprouvettes dans la direction transversale du laminage et seize (16) éprouvettes dans la direction longitudinale du laminage » et trente-deux (32) éprouvettes de la tôle livrée à l'état semi- fini (M800-65D) recuites« seize (16) éprouvettes dans la direction transversale du laminage et seize (16) éprouvettes dans la direction longitudinale du laminage », dans le but de vérifier l'anisotropie des pertes magnétiques. On construit alors les circuits magnétiques avec ces différentes tôles, le cadre utilisé est un cadre Epstein de 25cm, la longueur moyenne du circuit magnétique est de 0,94 cm, les dimensions

des lames sont de $280 \times 30 \text{ mm}^2$ et leur nombre doit être un multiple de 4, cela est imposé par la manière par laquelle le circuit est construit, le nombre idéal pour le cadre est dicté par le poids qui est environ de 1kg, les enroulements primaire et secondaire ont 700 spires chacune (Figure V-6).



Figure V-6 : Cadre Epstein.

Le cadre Epstein est relié à un analyseur via une liaison série RS232, cette liaison permet à l'analyseur d'acquérir les données de mesures et d'imposer les grandeurs de commande de l'essai voulu en terme de fréquence, d'induction maximale...etc.

Le cadre est piloté par un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'un logiciel élaboré par le constructeur, ce logiciel permet d'avoir la courbe d'aimantation, les pertes spécifiques par cycle, la puissance apparente consommée par cycle et la perméabilité magnétique au bord de chaque cycle, les données à introduire sont :

L'induction maximale, la fréquence, la masse active, la surface active, le nombre de spires, la température.

PARAMETRES

ECHANTILLON *.mat

Masse active Kg

Section utile cm²

Température °C

Observation

ESSAI

*.tst

Formes d'onde
☒ sinus ☐ Carré ☐ Triangle ☐ Impulsion

Consignes
 F (Hz) ☐ U (Volts) Max.
 Points ☒ B (Tesla) Max.

Tension Cadre
☒ Normale ☐ Reduite

Type
☐ Mono test ☐ Croissant/Décroissant
☒ Croissant ☐ Démagnétisation

N1 N2 Lm m

EPSTEIN - MESURES MAGNETIQUES

Vettiner

n°	B (Tesla)	H (A/m)	Ps (w/Kg)	Ss (VA/Kg)	μa
50	1,775	3,195 e+2	1,579 e+0	5,659 e+0	4,421 e+3
49	1,739	1,964 e+2	1,448 e+0	3,659 e+0	7,046 e+3
48	1,702	1,279 e+2	1,334 e+0	2,602 e+0	1,059 e+4
47	1,666	9,020 e+1	1,240 e+0	2,033 e+0	1,470 e+4
46	1,629	6,860 e+1	1,157 e+0	1,686 e+0	1,890 e+4
45	1,592	5,460 e+1	1,087 e+0	1,465 e+0	2,320 e+4
44	1,556	4,570 e+1	1,026 e+0	1,310 e+0	2,709 e+4
43	1,520	3,930 e+1	9,678 e-1	1,188 e+0	3,078 e+4
42	1,484	3,480 e+1	9,143 e-1	1,091 e+0	3,393 e+4
41	1,448	3,190 e+1	8,655 e-1	1,014 e+0	3,612 e+4
40	1,411	2,910 e+1	8,170 e-1	9,422 e-1	3,859 e+4
39	1,375	2,720 e+1	7,741 e-1	8,951 e-1	4,011 e+4

CYCLE EN ATTENTE

Figure V- 7: Interface du logiciel permettant de commander le cadre Epstein.

Chapitre - VI

Résultats et interprétations

I- La composition chimique :

Les résultats de la composition chimique de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) et la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau VI-1 : Composition chimique du la Tôle (M800-65D) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI.

Eléments chimiques	C	S	Mn	Si
Analyse de référence %	0,03415	0,01242	0,70	0,23

Tableau VI-2 : Composition chimique du la Tôle (M800-65A) selon l'analyse effective de la SNVI et de l'EI.

Eléments chimiques	C	S	Mn	Si
Analyse de référence %	0,00638	0,008009	0,37	0,99

En comparant, la composition chimique des deux tôles, on remarque une grande différence entre la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) :

- ❖ Le pourcentage de carbone, de soufre et de manganèse de la (M800-65D) est plus élevé que celui de la (M800-65A).
- ❖ Le pourcentage de silicium de la (M800-65A) est plus élevé que celui de la (M800-65D)

Le carbone et le soufre améliore les caractéristiques mécaniques, on peut dire que l'aptitude à la découpe de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) est meilleure que celle de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).

Le silicium joue un rôle dans le durcissement de la tôle et un autre rôle très important dans l'amélioration de caractéristiques magnétiques.

I- Essai de traction :

Après l'usinage des soixante(60) éprouvettes de traction non proportionnelles au niveau de l'atelier de l'EI, on a réalisé les essais de traction au niveau du laboratoire de physique de l'EI, La première éprouvette de la tôle livrée à l'état semi fin (M800-65D) est destinée pour l'étalonnage de la machine.

$$S_0 = 20.3 \times 0.65 \text{ mm}^2, \quad L_0 = 80 \text{ mm}.$$

Tableau VI-3 : Caractéristiques mécanique de la tôle livrée à l'état semi fini (M800-65D) obtenu par l'essai de traction dans les différentes directions de laminage.

Sens des éprouvettes											
Sens L						Sens T					
N°	F _m (KN)	R _m (N/mm ²)	F _{eh} (KN)	R _e (N/mm ²)	A%	N°	F _m (KN)	R _m (N/mm ²)	F _{eh} (KN)	R _e (N/mm ²)	A%
1						1	7.59	575.21	6.80	515.34	13.75
2	7.48	566.88	6.84	518.37	13.75	2	7.56	572.94	6.76	512.30	15.62
3	7.47	566.12	6.80	515.35	12.50	3	7.73	595.80	6.96	527.40	13.75
4	6.66	504.73	5.80	439.56	21.25	4	7.73	585.82	7.00	530.50	13.75
5	7.58	574.46	6.92	524.40	12.50	5	7.75	587.34	6.96	530.50	15.00
6	6.68	506.60	5.80	439.56	18.75	6	7.73	585.82	6.96	527.47	13.75
7	7.44	563.80	6.76	512.31	13.75	7	7.74	586.50	7.00	530.50	15.00
8	7.51	569.15	6.76	512.31	13.12	8	7.75	587.30	7.00	530.50	14.37
9	7.54	571.14	6.89	522.16	12.50	9	7.14	586.58	7.04	533.50	12.50
10	7.46	565.30	6.82	516.80	13.75	10	7.72	585.07	6.96	527.40	12.50

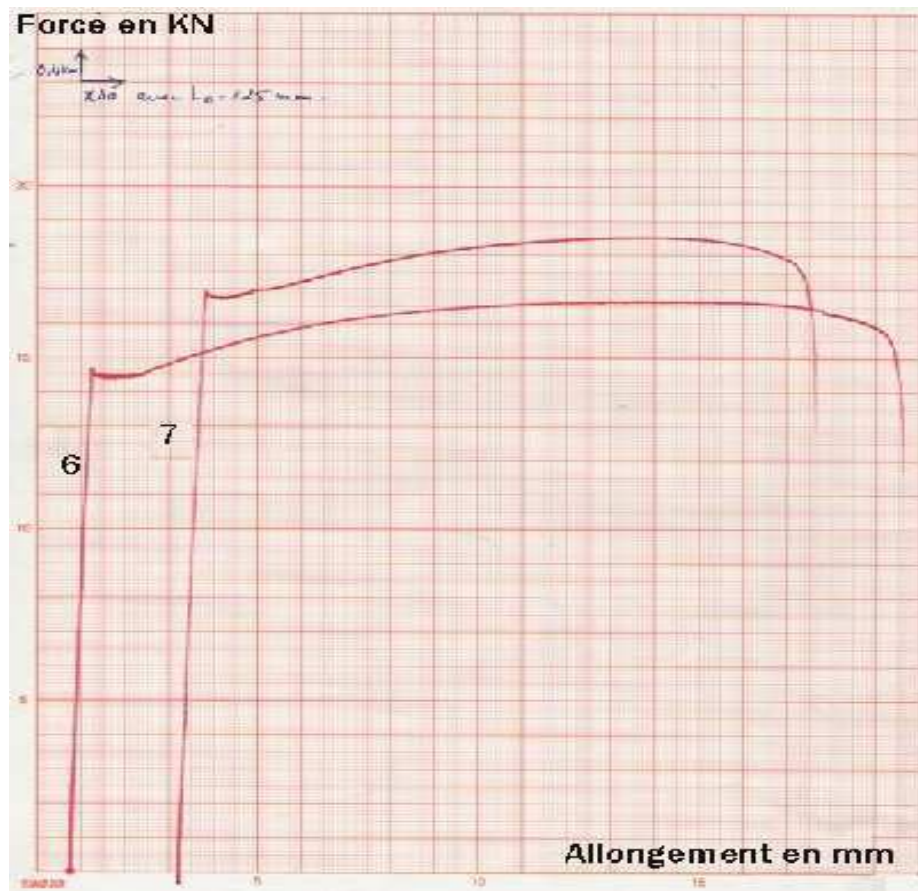
Sens 45°					
N°	F _m (KN)	R _m (N/mm ²)	F _{eh} (KN)	R _e (N/mm ²)	A%
1	7.54	582.30	6.76	520.00	13.75
2	7.53	579.23	6.69	513.84	13.75
3	7.49	578.75	6.72	519.25	13.75
4	7.52	580.40	6.68	515.66	12.50
5	7.54	582.03	6.68	515.65	13.75
6	7.51	580.49	6.69	516.42	13.75
7	7.52	579.72	6.69	516.42	12.50
8	7.52	580.49	6.66	514.10	15
9	7.52	580.49	6.66	514.10	15
10	7.52	580.20	6.66	513.84	13.75

On définit R_e/R_m comme critère d'acceptation des tôles au niveau de l'Electro-Industrie (cahier de charge de l'entreprise), tans que R_e/R_m se rapproche de 1 la limite d'élasticité ce rapproche de la résistance à la traction donc le palier plastique se réduit et l'aptitude à la découpe sera meilleure.

Tableau VI-4: Le rapport R_e/R_m des éprouvettes dans les différentes directions de laminage.

N°	Sens L	Sens T	Sens 45°
01	0,91	0,90	0,89
02	0,91	0,89	0,89
03	0,87	0,89	0,90
04	0,91	0,91	0,89
05	0,87	0,90	0,89
06	0,91	0,90	0,89
07	0,90	0,90	0,89
08	0,91	0,90	0,89
09	0,91	0,91	0,88
10	0,90	0,90	0,89

Quelques courbes de traction de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) sens L :



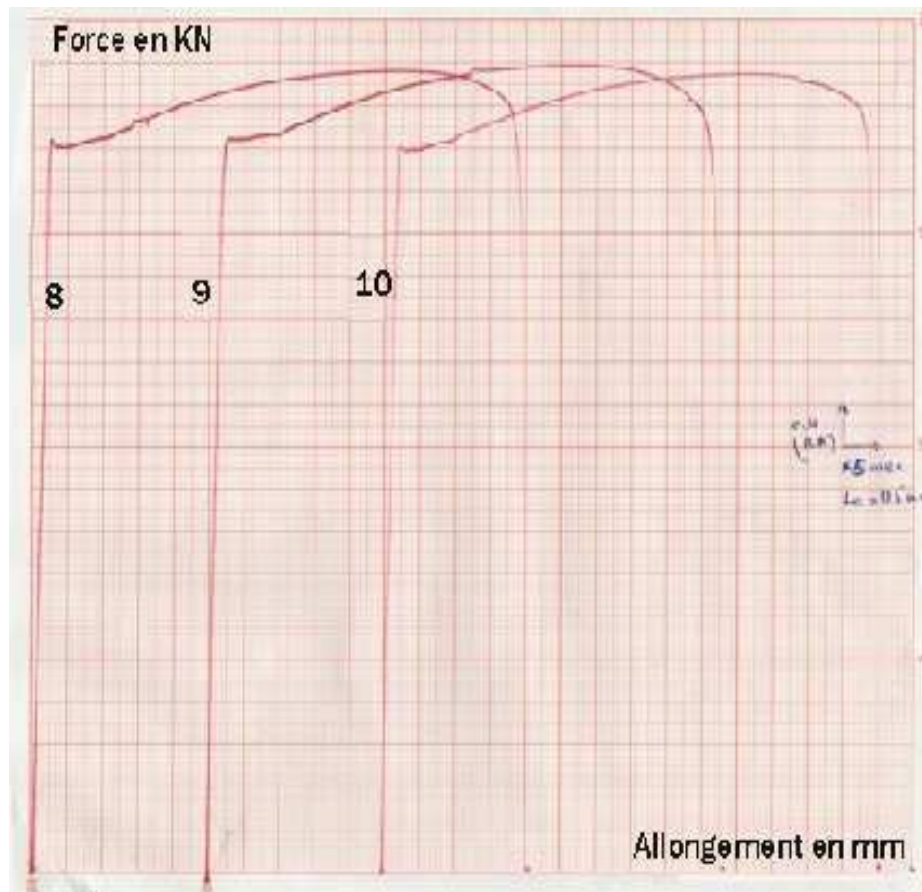


Figure VI-2 : Courbes de traction des éprouvettes N° 8, 9 et 10 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens L de laminage.

Quelques courbes de traction de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) sens T :



Figure VI-3 : Courbes de traction des éprouvettes N° 6,7 et 8 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens T de laminage.

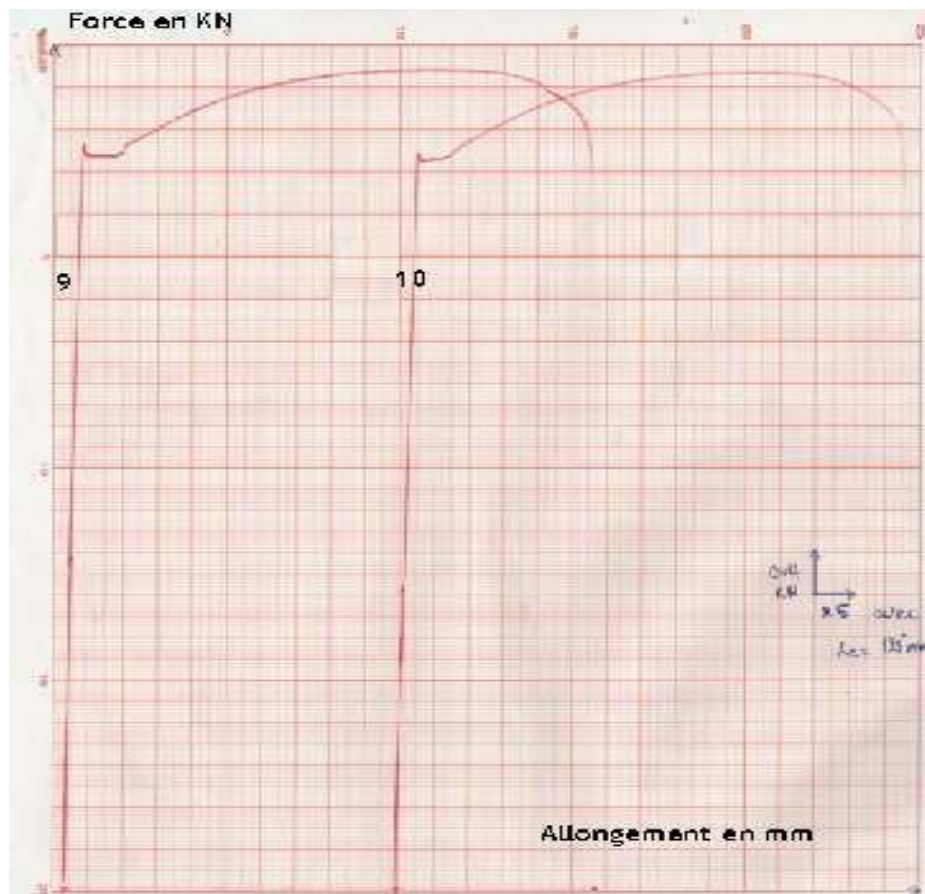


Figure VI-4 : Courbes de traction des éprouvettes N° 9 et 10 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens T de laminage.

Quelques courbes de traction de la tôle livrée à l'état semi-fini (feuillards) sens 45° :

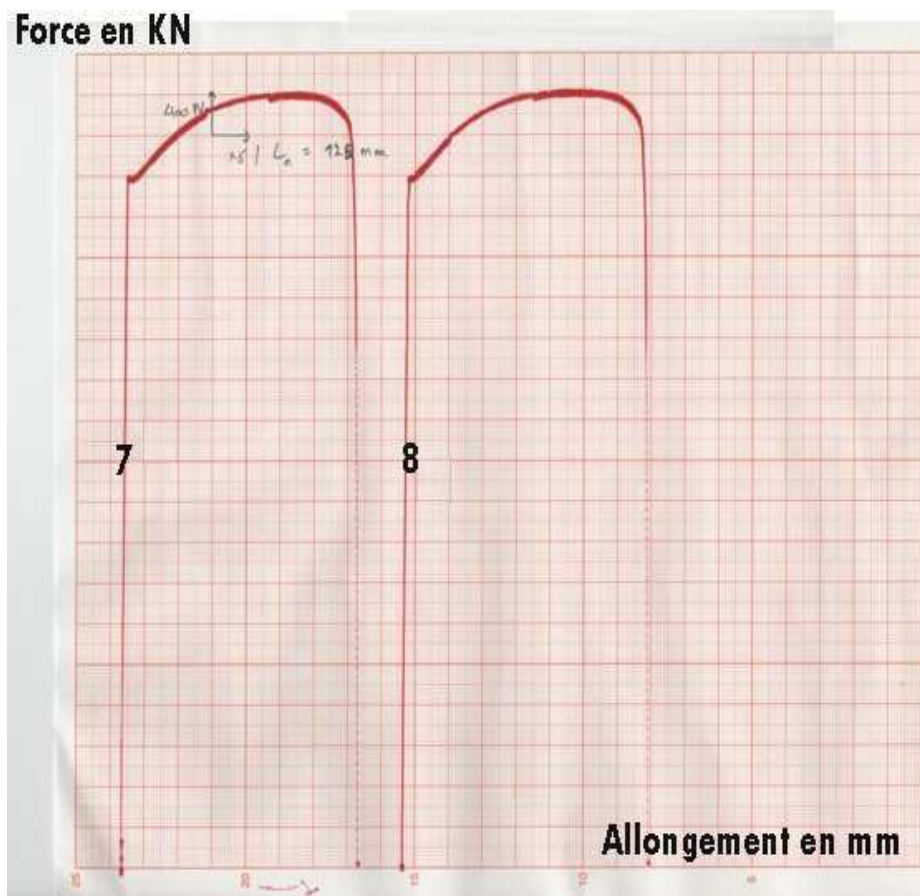


Figure VI- 5: Courbes de traction des éprouvettes N° 7 et 8 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens 45° de laminage.

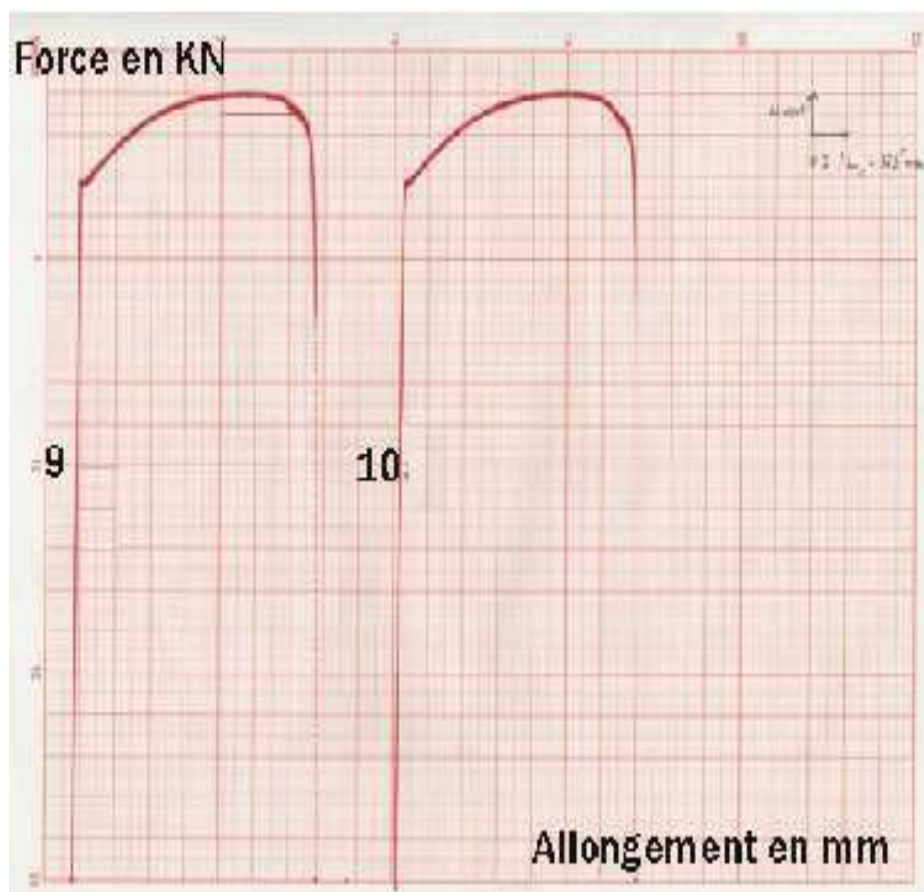


Figure VI-6 : Courbes de traction des éprouvettes N° 9 et 10 de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D), dans le sens 45° de laminage.

Tableau VI-5 : Caractéristiques mécanique de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) obtenu par l'essai de traction dans les différentes directions de laminage.

Sens des éprouvettes											
Sens L						Sens T					
N°	F _m (KN)	R _m (N/mm ²)	F _{eh} (KN)	R _e (N/mm ²)	A%	N°	F _m (KN)	R _m (N/mm ²)	F _{eh} (KN)	R _e (N/mm ²)	A%
1	5.62	430.15	4.14	316.87	36.25	1	5.76	440.80	4.53	346.72	38.12
2	5.65	432.45	4.40	336.77	38.75	2	5.74	439.34	4.00	306.16	35.00
3	5.63	430.92	4.20	321.46	38.75	3	5.73	438.57	4.37	334.48	35.00
4	5.61	429.30	4.37	334.48	38.75	4	5.76	440.87	4.19	320.70	33.75
5	5.58	427.09	4.06	310.75	35.00	5	5.75	440.10	4.09	313.05	37.50
6	5.56	327.50	4.28	425.55	38.75	6	5.85	447.76	4.53	346.72	37.50
7	5.57	426.32	4.09	313.05	35.00	7	5.87	447.76	4.52	345.96	37.50
8	5.63	430.92	4.24	326.82	41.25	8	5.88	450.05	4.52	345.96	35.00
9	5.51	421.73	4.21	332.23	37.50	9	5.87	449.29	4.58	350.55	35.00
10	5.66	433.21	4.19	320.70	36.26	10	5.80	443.93	4.54	347.49	35.00

Sens 45°					
N°	F _m (KN)	R _m (N/mm ²)	F _{eh} (KN)	R _e (N/mm ²)	A%
1	5.89	433.30	4.40	323.69	32.50
2	5.86	433.13	4.26	341.33	33.75
3	5.90	433.17	4.16	305.42	31.25
4	5.87	434.40	4.27	316.02	30.00
5	5.89	435.92	4.19	310.10	30.00
6	5.89	428.52	4.24	308.48	32.25
7	5.87	433.13	4.16	306.95	30.00
8	5.85	437.66	4.11	307.48	32.50
9	5.85	431.65	4.12	404.05	33.70
10	5.80	426.64	4.16	305.88	32.50

Tableau VI-6: Le rapport R_e/R_m des éprouvettes dans les différentes directions de laminage.

N°	Sens L	Sens T	Sens 45°
01	0,74	0,79	0,75
02	0,78	0,70	1,00
03	0,75	0,76	0,71
04	0,78	0,73	0,73
05	0,73	0,71	0,71
06	1,30	0,77	0,72
07	0,73	0,77	0,71
08	0,76	0,77	0,70
09	0,79	0,78	0,94
10	0,74	0,78	0,72

Quelques courbes de traction de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) sens L :



Figure VI-7: Courbes de traction des éprouvettes N° 2 et 3 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens L de laminage.

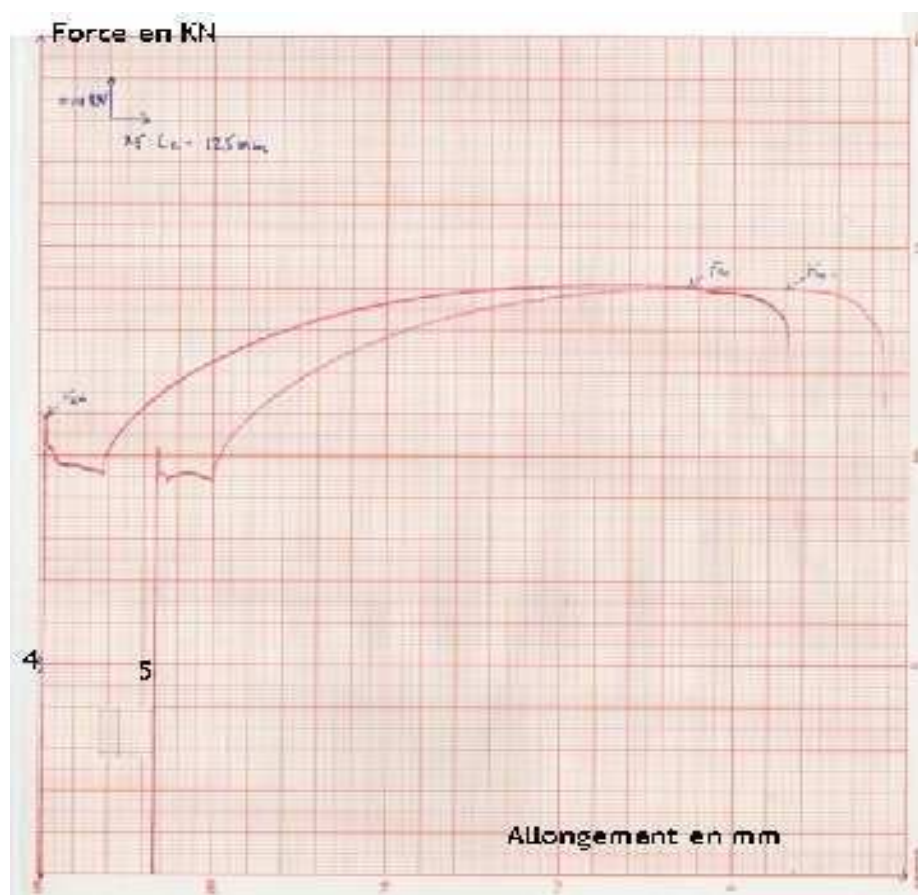


Figure VI-8 : Courbes de traction des éprouvettes N° 4 et 5 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens L de laminage.

Quelques courbes de traction de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) le sens T :

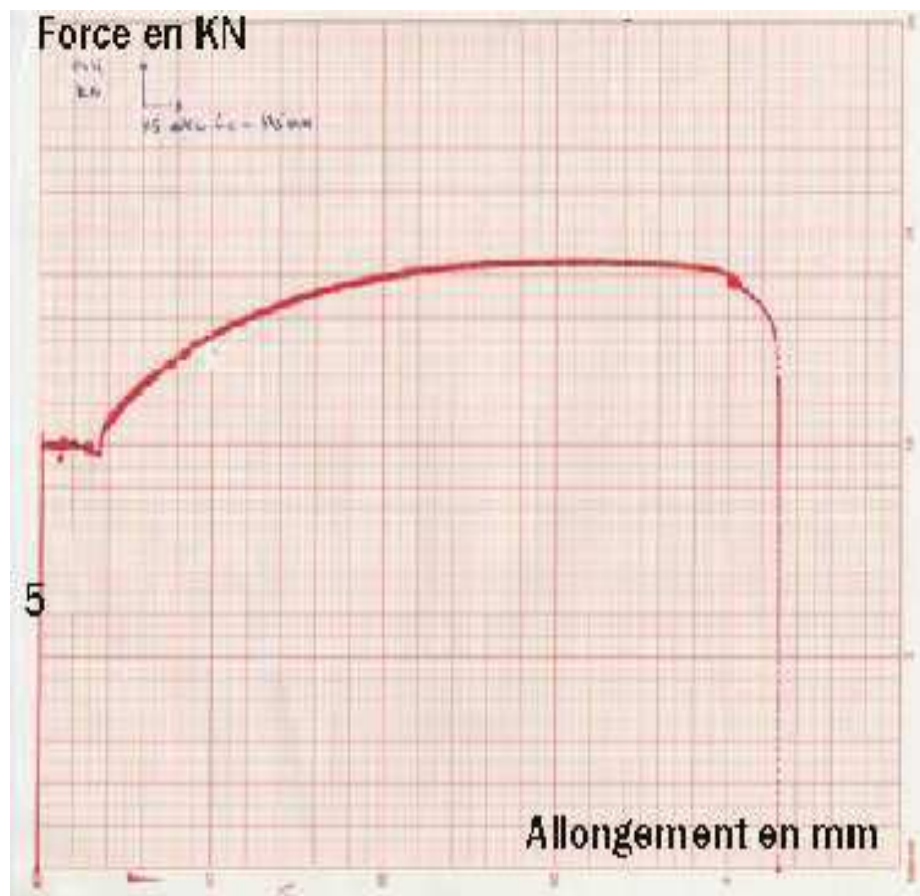


Figure VI-9 : Courbe de traction de l'éprouvette N° 5 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens T de laminage.

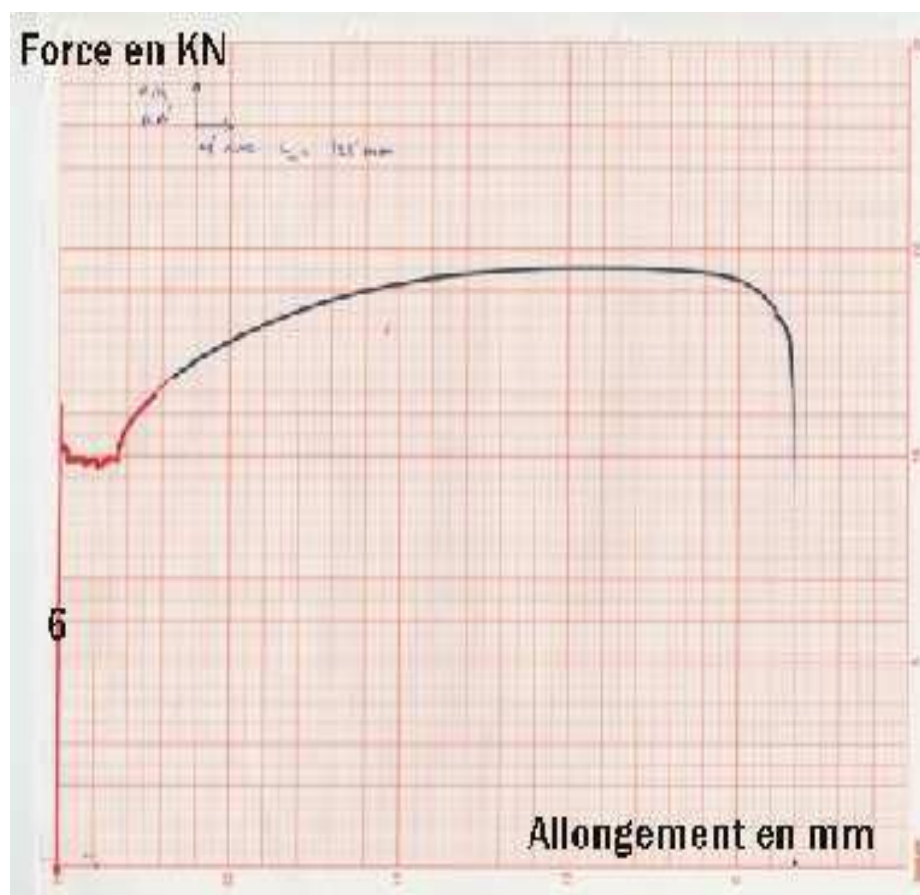


Figure VI-10: Courbe de traction de l'éprouvette N° 6 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens T de laminage.

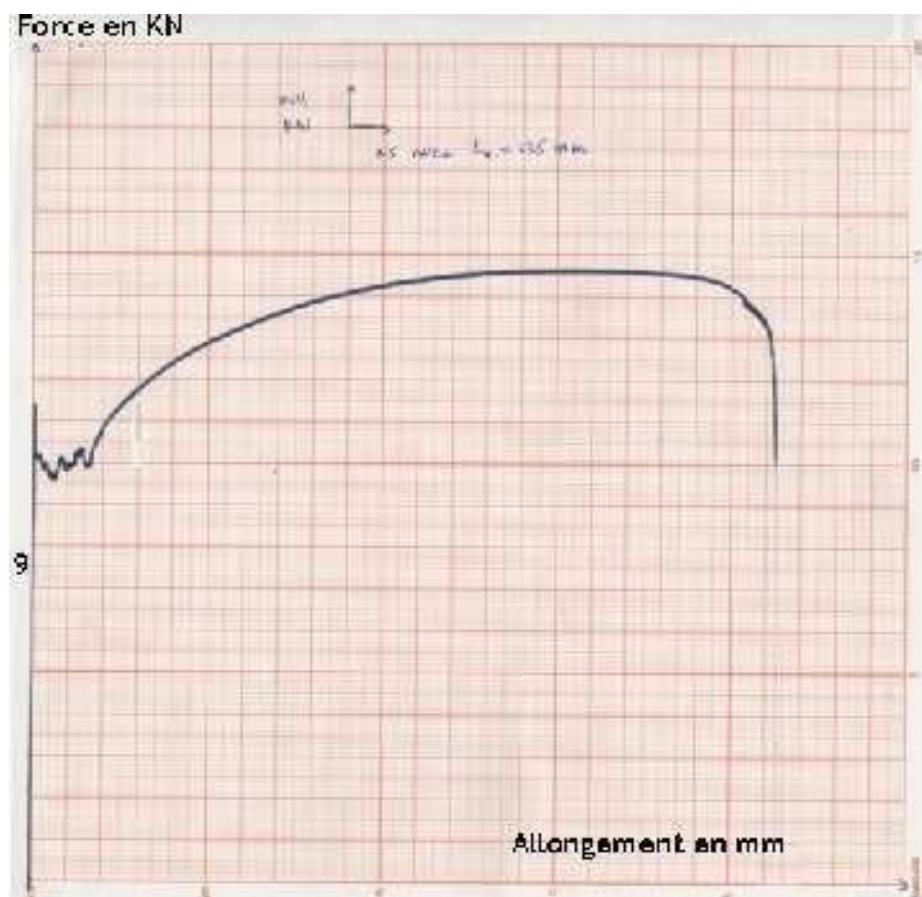


Figure VI-11 : Courbe de traction de l'éprouvette N° 9 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens T de laminage.

Quelques courbes de traction de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) sens 45° :

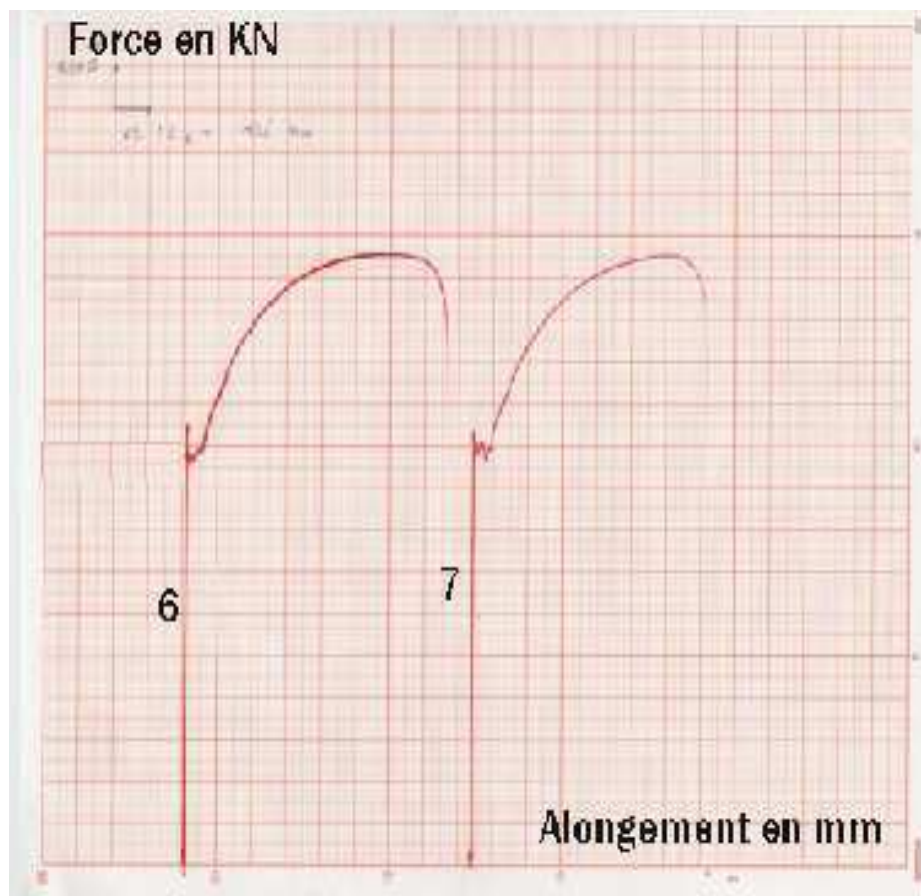


Figure VI-12 : Courbes de traction des éprouvettes N° 6 et 7 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens 45° de laminage.

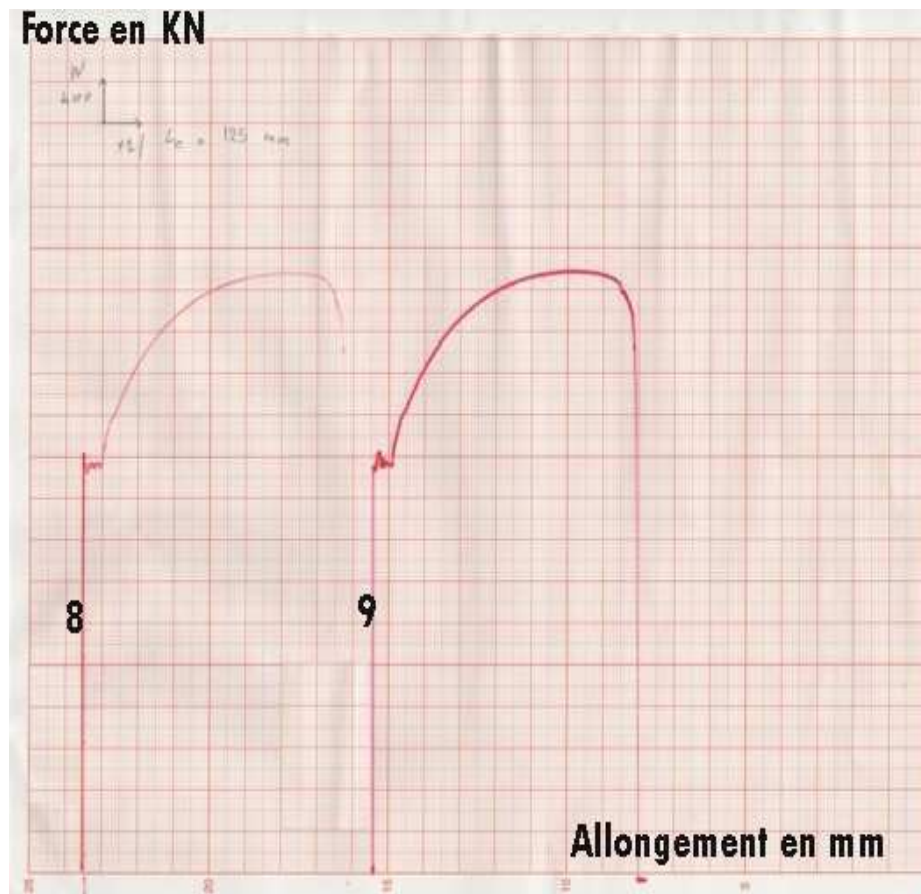


Figure VI-13 : Courbes de traction des éprouvettes N° 8 et 9 de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), dans le sens 45° de laminage.

Tableau VI-7: Récapitulatif des résultats de l'essai de traction :

	F_m (KN)	R_m (N/mm ²)	F_{eh} (KN)	R_e (N/mm ²)	$A\%$	E (N/mm ²)	R_e/R_m
Tôle (M800-65D) Non recuite	7,49	575,38	6,73	514,61	14,03	$262 \cdot 10^3$	0,9
Tôle (M800-65A)	5,78	431,84	4,26	330,8	35,13	$237 \cdot 10^3$	0,7

Les résultats présentés dans les tableaux précédents (tableau VI-3,4,5,6) des différentes caractéristiques mécaniques obtenus par les essais de traction sur des éprouvettes usinées dans le sens transversale, longitudinale et le sens 45° de laminage de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la tôle livrée à l'état semi-fini(M800-65D), on remarque que le comportement mécanique en traction sur l'ensemble des directions de la tôle ne change pas, donc la direction

suivant la quelle nous appliquons la charge affecte peu le comportement du matériau, alors les deux types de tôle sont relativement isotrope dans le plan.

Les résultats présentés dans le tableau VI-7 nous montre bien que les deux types de tôles répondent à toutes les exigences imposées par la norme EN 10027-1

D'après les courbes de traction des tôles (M800-65A) et (M800-65D) on remarque que :

- Le domaine élastique où la déformation est réversible une fois la charge est supprimée de la tôle (M800-65D), $R_e=514,61(\text{N/mm}^2)$, $E=262 \cdot 10^3(\text{N/mm}^2)$, est plus large que celui de la (M800-65A) $R_e=330,8(\text{N/mm}^2)$, $E=237 \cdot 10^3 (\text{N/mm}^2)$, ce qui s'explique par l'accumulation des dislocations dans la tôle (M800-65D) qui a subi un durcissement par écrouissage à la sollicitation, on ajoute à ça l'effet des contraintes résiduelles. Contrairement à la tôle (M800-65A) qui est livrée à l'état fini donc qui a subi un recuit de recristallisation de la structure, donc les contraintes résiduelles sont éliminées et il y'a adoucissement de la structure.
- Le domaine de la déformation permanente ou plastique de la tôle (M800-65A), $A=35,13\%$ est plus large que celui de la (M800-65D), $A=14,03\%$, ce qui s'explique par la libération plus souple des dislocations dans les grains de la tôle (M800-65A) donc la force nécessaire à leurs déplacement diminue et l'allongement augmente.
- La résistance à la rupture de la tôle (M800-65D), $R_m=575,38 (\text{N/mm}^2)$ est plus grande que celle de la tôle (M800-65A), $R_m= 431,84 (\text{N/mm}^2)$, alors la tôle (M800-65D) est moins ductile que la tôle (M800-65A).

On reliant la composition chimique des tôles étudiées, on remarque que la tôle

(M800-65D), qui possède un pourcentage plus élevé en carbone est moins ductile que la tôle (M800-65A), qui possède un pourcentage faible et puisque cette dernière a subi un recuit donc elle va avoir une structure ferritique qui est une structure douce par rapport la perlite qui devra exister dans la structure de la tôle (M800-65D).

Et si, on relit ces résultat à la théorie présentée dans (le chapitre IV), on remarque que l'aptitude à la découpe d'une tôle est d'autant plus meilleure que sa valeur d'allongement $A\%$ est moindre, que ces valeurs limite d'élasticité R_e et de rupture R_m sont plus élevées et que le rapport de R_e/R_m se rapproche de 1.

II- Essai de dureté :

Après avoir préparé les échantillons on a effectué l'essai de dureté au laboratoire de l'EI, et on a obtenu les résultats suivant :

Tableau VI-8 : Résultats de l'essai de dureté Vickers sur la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).

N° d'éprouvette	Nombre d'essais	Dureté (HV)	La moyenne
01	01	128.4	129.10
	02	128.4	
	03	131.9	
	04	128.4	
	05	128.4	
02	01	131.9	129.80
	02	131.9	
	03	128.4	
	04	128.4	
	05	128.4	
03	01	135.5	128.52
	02	121.9	
	03	128.4	
	04	128.4	
	05	128.4	
04	01	131.9	127.82
	02	125.1	
	03	125.1	
	04	125.1	
	05	131.9	
05	01	135.5	135.53
	02	139.2	
	03	131.9	

Tableau VI-9 : Résultats de l'essai de dureté Vickers sur la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) non recuite.

N° d'éprouvette	Nombre d'essais	Dureté (HV)	La moyenne
01	01	221	225.40
	02	213	
	03	206	
	04	274	
	05	213	
02	01	213	213.00
	02	213	
	03	213	
	04	213	
	05	213	
03	01	213	211.60
	02	213	
	03	213	
	04	213	
	05	206	
04	01	213	213.80
	02	221	
	03	213	
	04	206	
	05	213	
05	01	206	206.00
	02	213	
	03	199	
	04	213	
	05	199	

Tableau VI-10 : Résultats de l'essai de dureté Vickers sur la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) recuite.

N° d'éprouvette	Nombre d'essais	Dureté (HV)	La moyenne
01	01	78.8	79.62
	02	71.3	
	03	84.0	
	04	84.0	
	05	80.0	
02	01	82.2	81.24
	02	80.5	
	03	80.5	
	04	77.2	
	05	85.8	
03	01	87.6	75.42
	02	71.3	
	03	71.3	
	04	72.7	
	05	74.2	
04	01	84.0	84.88
	02	84.0	
	03	91.6	
	04	87.6	
	05	77.2	
05	01	78.6	82.4
	02	77.2	
	03	78.8	
	04	85.8	
	05	91.6	

Tableau VI-11: Récapitulatif des résultats de l'essai de dureté.

	Dureté Vickers(HV)
Tôle (M800-65D) Non recuite	213.96
Tôle (M800-65D) recuite	80,71
Tôle (M800-65A)	130.15

D'après les résultats obtenus par l'essai de dureté, on constate que nos tôles étudiées répondent à l'exigence de la norme EN 10027-1, on remarque que la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) non recuite possède une dureté élevée par rapport à la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), après recuit de la tôle livrée à l'état semi-fini(M800-65D), sa dureté va chutée et elle sera inférieure à celle de la tôle livrée à l'état fini(M800-65A).

Mais le relevé de la dureté de la tôle est superficielle n'est généralement pas significatif car il peut arriver que la tôle présente une dureté élevée en surface mais possède un cœur doux donc l'aptitude à la découpe est modestes.

III- Examens micrographiques :

III-1 La microstructure de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) :

Les observations des microstructures des dents de la feuille rotorique découpée de la tôle livrée à l'état fini et de la tôle livrée à l'état semi-fini au microscope optique, après polissage et attaque chimique, (Figure VI-14,15,16) à différents grossissements permettent de mettre en évidence l'influence de l'outil de découpe sur les microstructures et entre les deux types de tôle et la différence qui existe entre leurs microstructures.

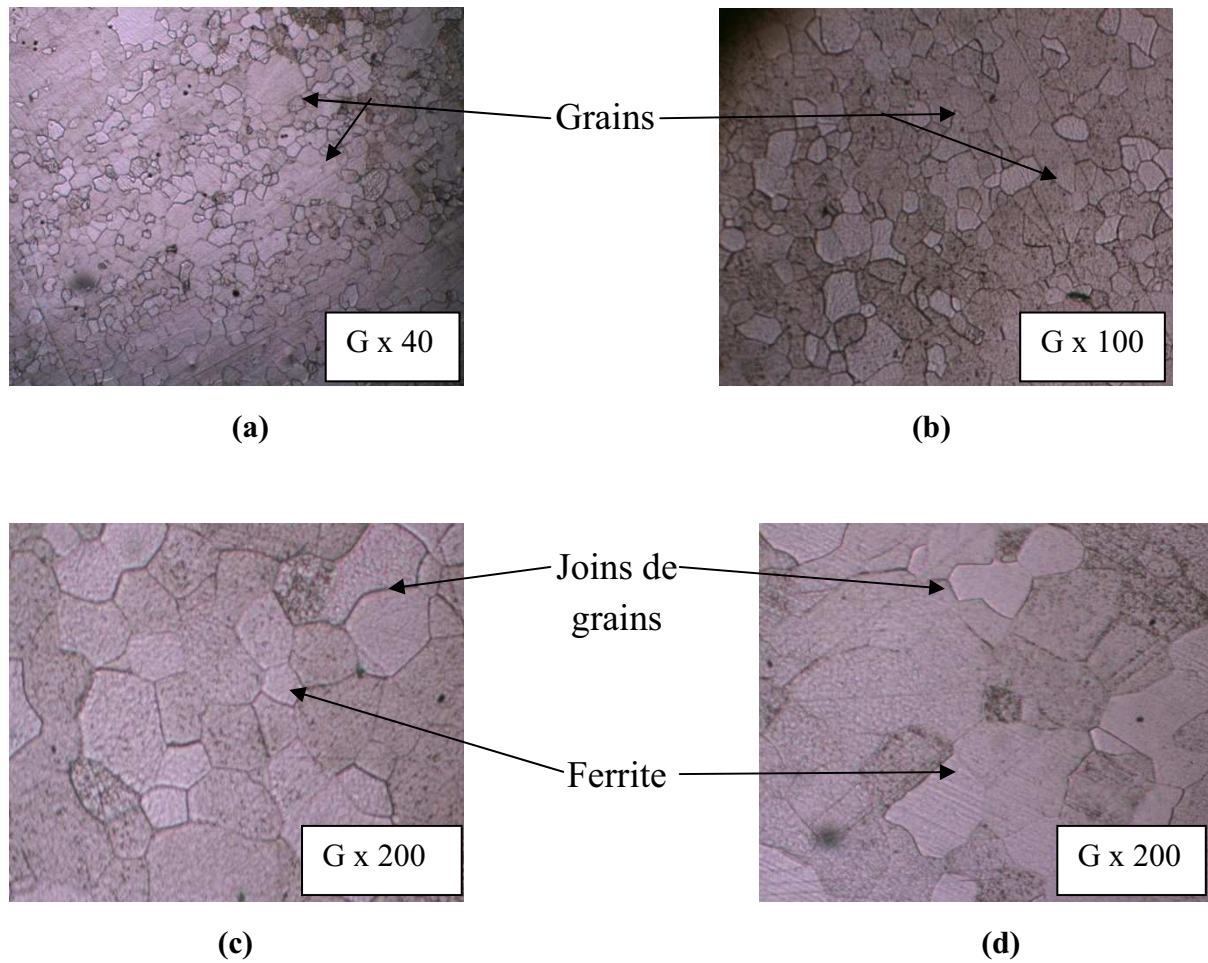


Figure VI-14 :Microstructures de la tôle livrée à l'état fini(M800-65A).

- (a) La microstructure au milieu de la dent ;
- (b), (c) La microstructure de l'arête de la dent ;
- (d) La microstructure en s'approchant du milieu de la dent.

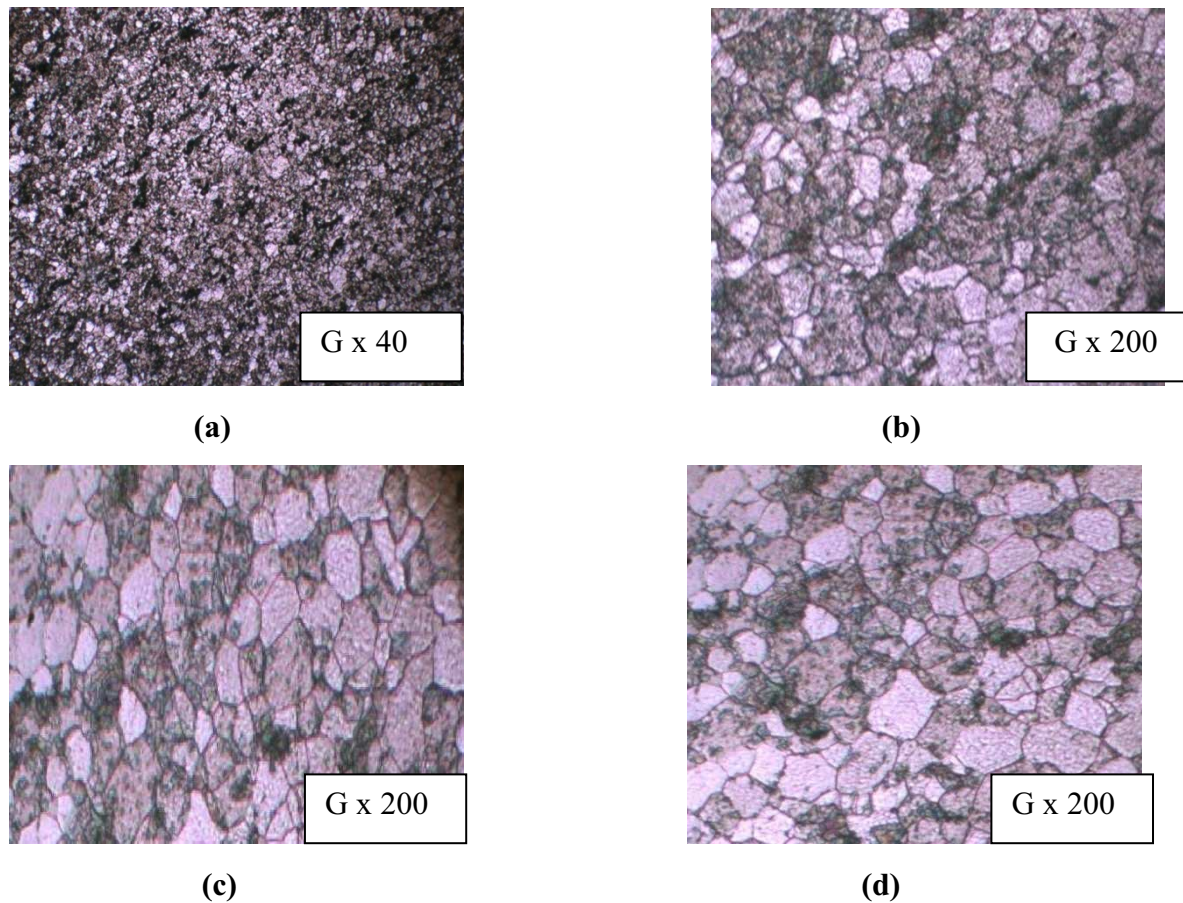


Figure VI-15 :Microstructures de la tôle livrée à l'état semi-fini(M800-65D) non recuit.

- (a) La microstructure au milieu de la dent ;
- (b), (c) La microstructure de l'arête de la dent ;
- (d) La microstructure en s'approchant du milieu de la dent.

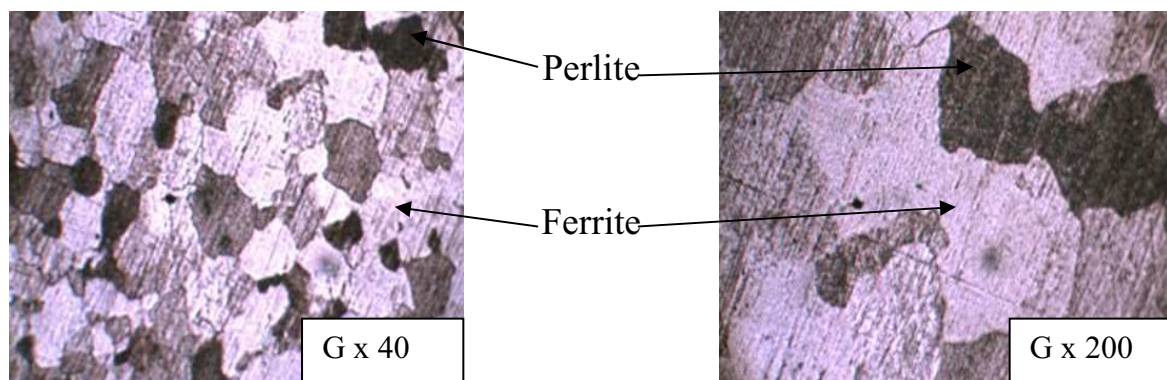


Figure VI- 16: Microstructures de la tôle livrée à l'état semi-fini(M800-65D) après recuit.

Les différentes l'observation microscopique réalisées nous ont permis de constater que : La microstructure de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) est ferritique et celle de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) est ferrito-perlitiques donc la première est monophasée et l'autre est biphasée, comme on remarque aussi que la taille des grains de la tôle livrée à l'état fini de l'arête de la dent sont petits par rapport à ceux du centre de la dent, ce qui s'explique par l'écroutissage de la tôle lors du découpage, par contre la taille des grains dans la tôle semi-finie est identique que ce soit au centre ,soit sur l'arête de la dent, donc l'aptitude à la découpe de la tôle livrée à l'état semi-fini est meilleure que celle de la tôle livrée à l'état fini.

En ce qui concerne les caractéristiques magnétiques, l'orientation des moments magnétiques dans la ferrite sera plus favorable que dans la structure ferrito-perlitiques car les atomes interstitiels du Carbone que la ferrite contient, sont responsable du freinage des moments magnétiques dans les domaines de Weiss.

Les impuretés qui donnent naissance à des précipités dans la compositions chimique (le carbone, le soufre) donnent naissance à des carbures, sulfures, qu'on considère comme des impuretés non magnétiques qui influs sur la continuité de l'alimentation.

Si, on va assimiler l'écroutissage des arêtes de la dent de la tôle finie à une contrainte dans ce cas, il y'aurait une modification de la microstructure magnétique engendrée par la désorientation des moments magnétiques qui est due à la déformation des parois de Bloch, donc la disparition du domaine de Weiss (Figure VI-17).

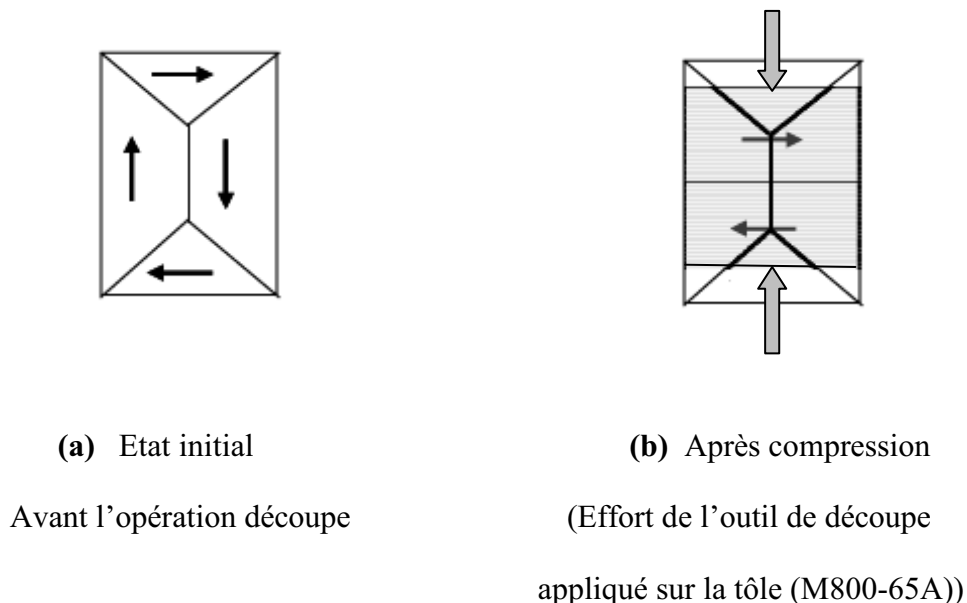


Figure VI-17 : Evolution de la microstructure magnétique sous contrainte.

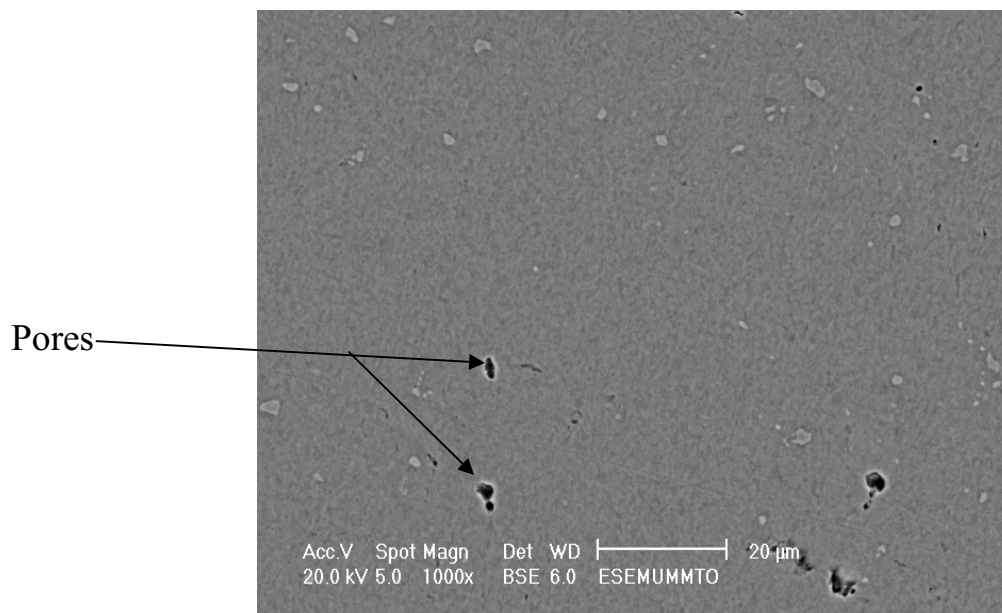


Figure VI-18 : Image obtenue par analyse au MEB de la dent d'une feuille statorique de la tôle (M800-65D).

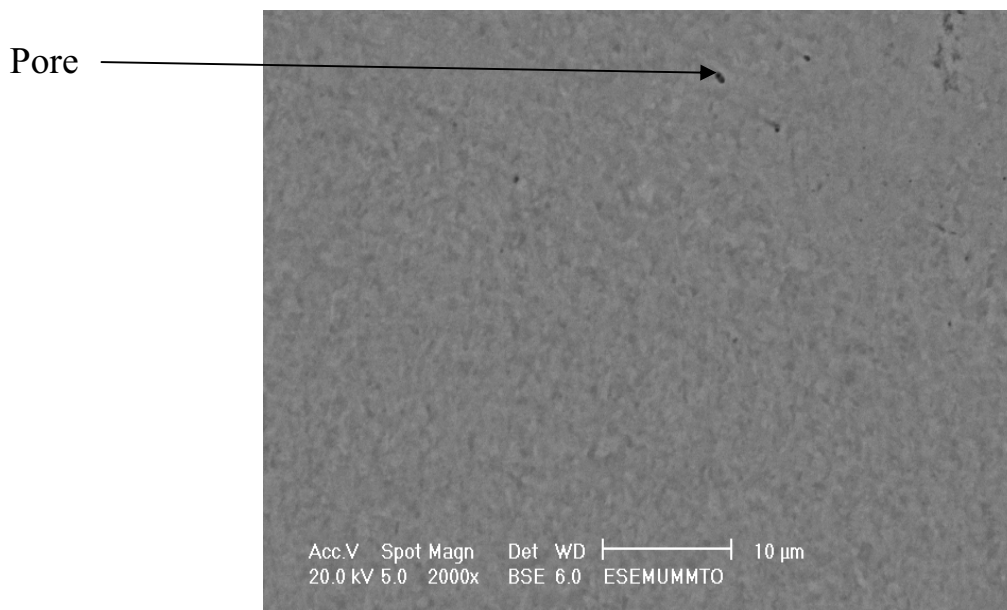


Figure VI-19 : Image obtenue par analyse au MEB de la dent d'une feuille statorique de la tôle (M800-65A).

Les images obtenues par l'analyse au MEB nous montrent que la tôle (M800-65D) qui n'a pas subi de recuit a une plus grande concentration de pores donc la fragilité sera l'une des caractéristiques de cette tôle, par contre la tôle (M800-65A) qui a subi un recuit de recristallisation, le nombre de pores est minimisé, donc elle sera plus ductile que la (M800-65D). Ces pores vont influencer sur la continuité de l'aimantation, mauvaise caractéristiques magnétiques. Par le contre la tôle (M800-65A) a subi un recuit de recristallisation donc les pores son réduits, cette tôle sera plus ductile que la (M800-65D).

Les examens micrographiques au MO (microscopie optique) et au MEB (microscopie électronique à balayage) nous montrent que, la composition chimique joue un rôle important dans la microstructure (Phases, morphologie des grains et dureté), sa sollicitation à un effort extérieur va engendrer un changement de cette microstructure, ce qui influe sur les caractéristiques magnétiques.

III-2 Analyse du profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) :

Une analyse du profil de rupture nous permet une meilleure compréhension de l'aptitude à la découpe de notre tôle la figure VI-20 nous montre le faciès de rupture qui se compose de trois zones :

- ➔ Une Zone pliée ;
- ➔ Une zone de rupture en cisaillement (coupée) ;
- ➔ Une Zone de rupture ductile (arrachée).

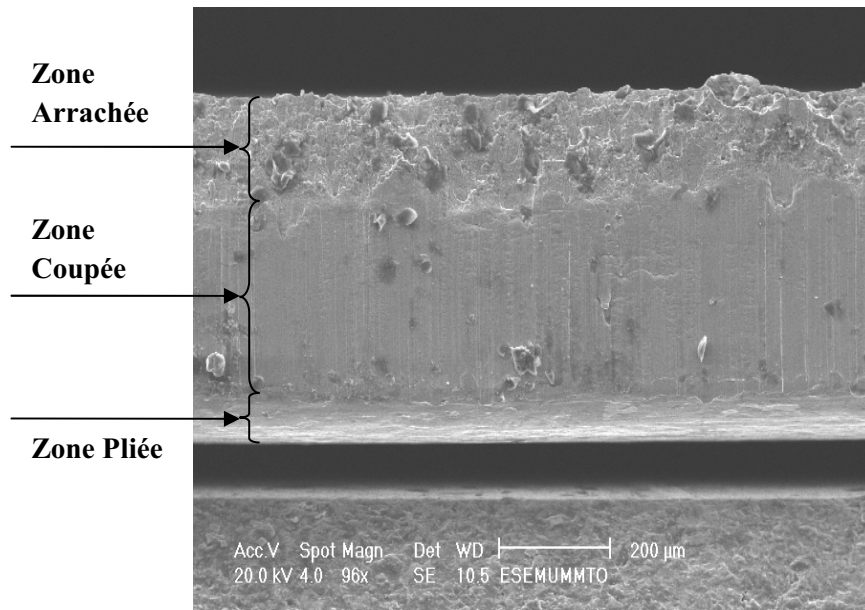


Figure VI-20 : Image obtenue par analyse au MEB de Faciès de rupture de la feuille statorique de la tôle (M800-65A).

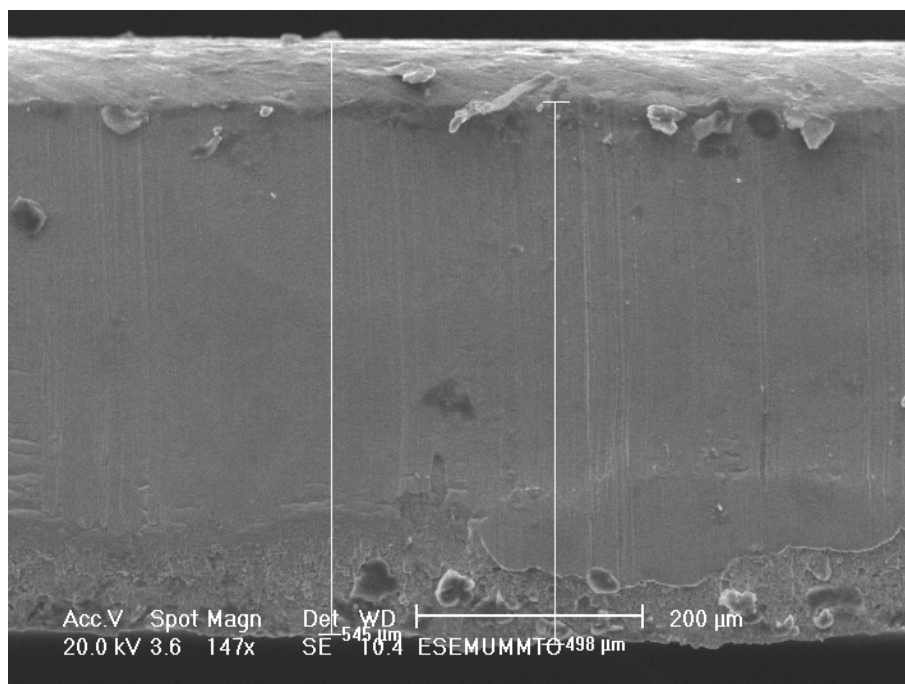


Figure VI-21 : Image obtenue par analyse au MEB d'épaisseur de Faciès de rupture la de la feuille statorique de la tôle (M800-65A).

En analysant ce profil de rupture, on remarque que l'épaisseur totale de la tôle après découpage est égale à 545 μm , en sachant que l'épaisseur initiale conforme a une valeur de 650 μm , donc l'épaisseur après découpe est réduite de 105 μm , ce qui explique le non planéité

du produit fini due à la déformation plastique du bord de découpe engendré par l'outil de découpe.

❖ **Influence de la vitesse de découpage sur le profil de découpe :**

Après le découpage des feuilles statorique à différentes vitesses sur une presse Schuler, on découpe une dent de chaque feuille statorique pour l'analyse de profil de découpe au MEB (Figure VI-22-23-24).

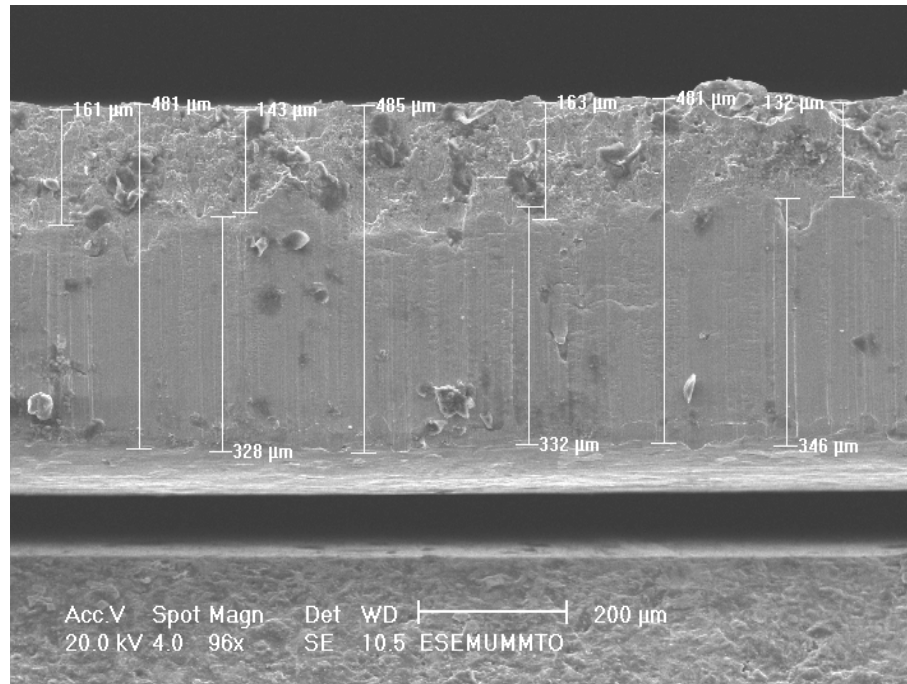


Figure VI-22 : Profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) coupée à une vitesse $V_1=100$ coups/min.

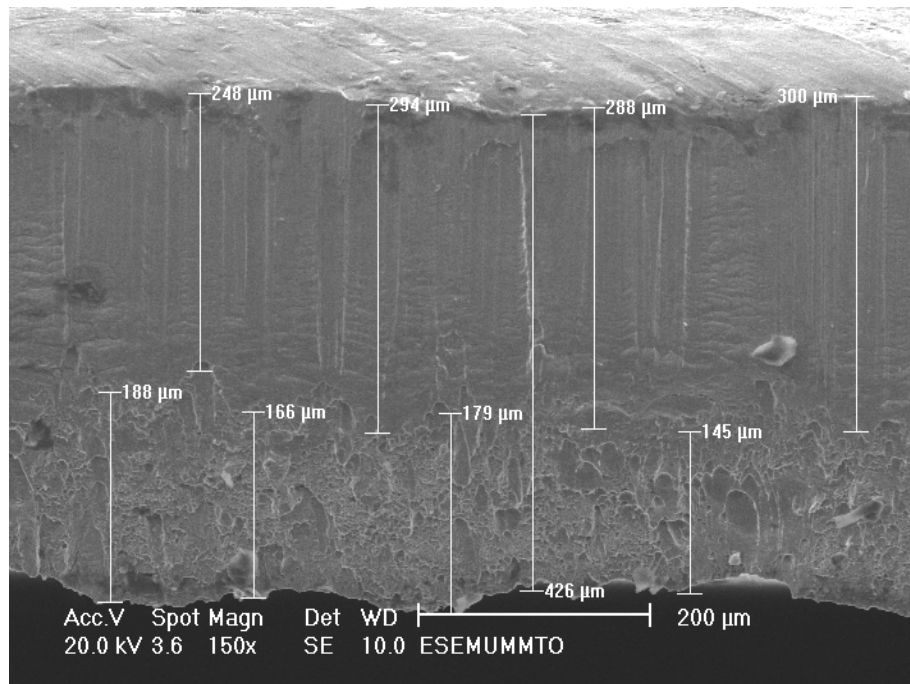


Figure VI-23 : Profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) coupée à une vitesse $V_2 = 200$ coups/min.

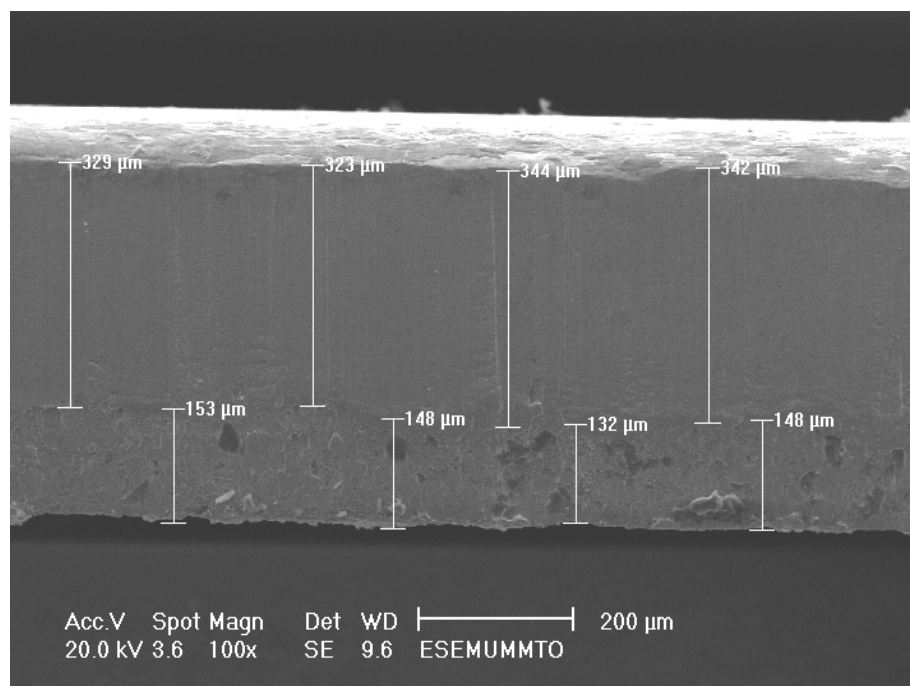


Figure VI-24 : Profil de découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) coupée à une vitesse $V_3 = 250$ coups/min.

Tableau VI-12 : Valeurs de la variation de l'épaisseur des zones arrachée et coupée en fonction de la vitesse.

	V ₁	V ₂	V ₃
Epaisseur de la partie arrachée en μm	150,6	163,2	142,2
Epaisseur de la partie coupée en μm	332,2	284,2	337,2

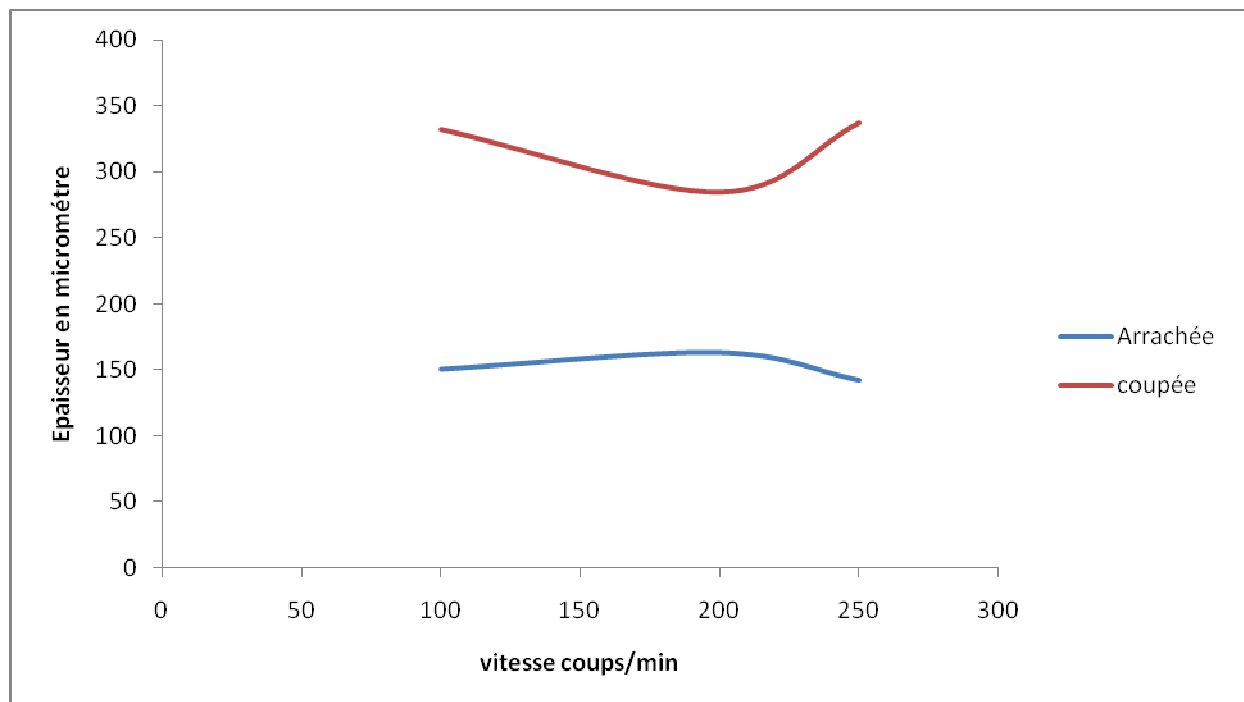


Figure VI-25 : Courbe de la variation de l'épaisseur des zones arrachée et coupée tôle livrée à l'état fini (M800-65A) en fonction de la vitesse de découpe.

D'après l'analyse du profil de découpe à différente vitesse on peut dire que la vitesse influe l'égerment sur l'aptitude à la découpe de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) car l'écart de la répartition des différentes zones (pliée, coupée et arraché) n'est pas immense,

Les courbes précédentes nous montrent que la zone coupée avec V₃ est élevée par rapport à celle coupée avec V₁ et V₂, la Zone arrachée avec V₃ est faible par rapport à celle coupée avec V₁ et V₂.

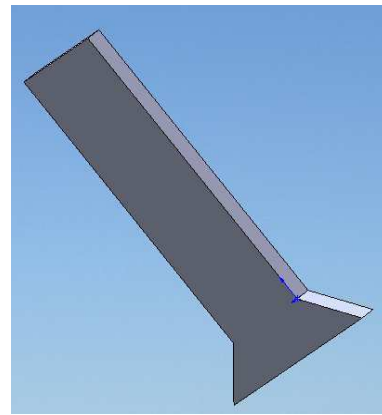
Pour avoir un très bon résultat il faut augmenter la vitesse au delà de $2,5V_0$ coups /min

IV-La microdureté :

Après avoir préparé la surface des échantillons, prélevés des dents des feuilles destinées aux circuits magnétiques des tôles livrées à l'état fini (M800-65A) et (M800-50A) donc épaisseurs différents 0,5mm et 0,65mm, on prend les mesures de la microdureté au voisinage des bords découpés, (Figure VI-26) pour les faces arrachées et les faces coupées.



(a) Face de la partie arrachée ;



(b) Face de la Partie coupée.

Figure VI-26 : Dent prélevée de la feuille statorique.

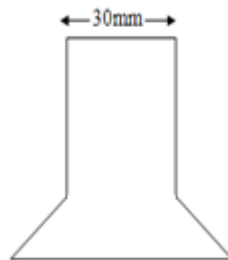
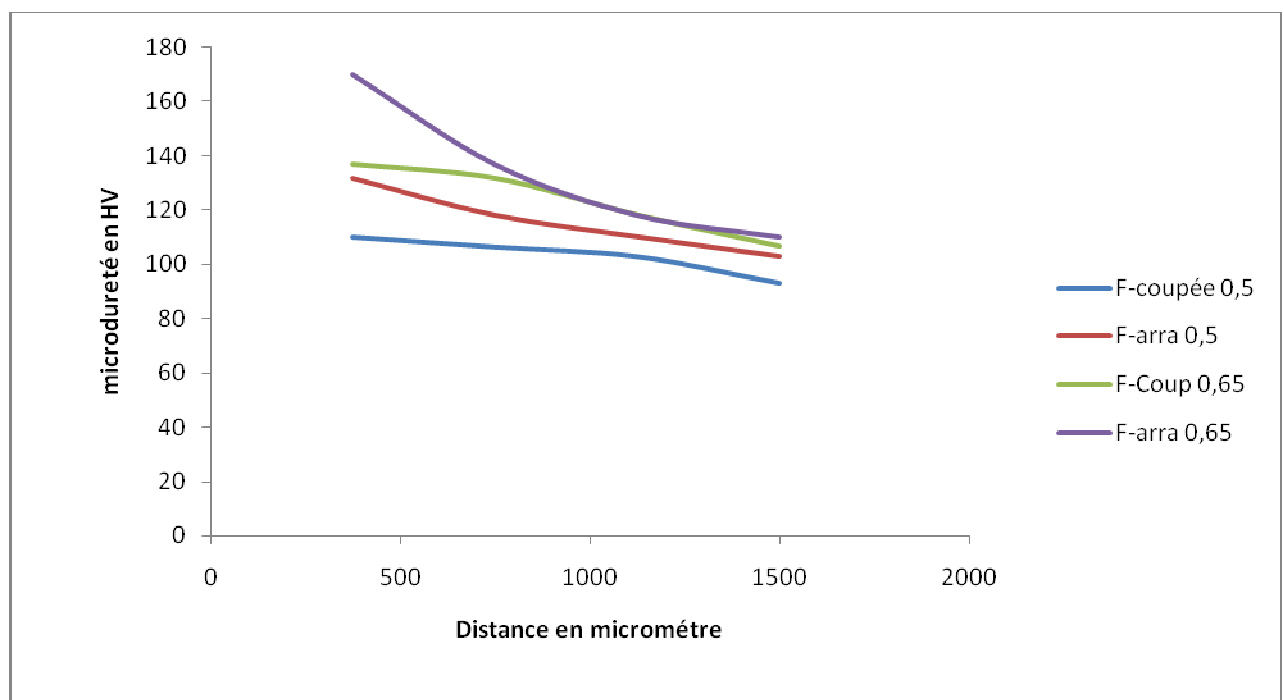


Figure VI-27: Dimension de la dent de la feuille statorique.

Les dimensions des dents des tôles livrées à l'état fini (M800-65A) et la (M800-50A) sont de 30mm qui est égale à 3000 μm , dans le but de mesurer la microdureté au centre, on divise par 2 et on aura 1500 μm avec un pas de 375 μm et on obtient les résultats présentés dans le tableau ci- dessous.

Tableau VI-13 : Résultats obtenus de la microdureté.

Distance En μm	Face coupée 0,5mm	Face arrachée 0,5mm	Face Coupée 0,65mm	Face arrachée 0,65mm
375	110,3	132	137,2	170
750	106,6	118,3	132	137
1125	103	110,3	118,3	118,3
1500	93	103	106,6	110,3

**Figure VI-28 :** Courbe de la microdureté des dents des feuilles statorique de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la (M800-50A).

En analysant les résultats obtenus, on distingue que la microdureté de la dent d'épaisseur de 0,5mm et de 0,65mm dans la zone arrachée est plus élevée que celle de la zone coupée qu'on peut expliquer par le phénomène d'écrouissage dû à l'outil de découpe, mais la microdureté des deux zones de la dent d'épaisseur 0,5 mm, est faible par rapport à celle de l'épaisseur 0,65mm, donc l'épaisseur joue un rôle important sur l'aptitude à la découpe de la tôle livrée à l'état fini.

V- Essai magnétique :

La réalisation de cadre Epstein avec des éprouvettes de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et avec des éprouvettes de la tôle livrée à l'état semi fini (feuillard) (M800-65D) nous donne les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous, et les résultats de l'Annexe D.

Tableau VI-14 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant la direction longitudinal (direction de laminage) pour une band et suivant le sens transversal pour une autre bande.

	ρ (kg /dm ³)	M _p (g)	M _A (kg)	A (cm ²)	P _{1,5}	B ₂₅₀₀ (T)	B ₅₀₀₀ (T)	B ₁₀₀₀₀ (T)
Tôle finie (M800-65A)	7,80	1211 ,9	1,0172	1,3872	6,68	1,604	1,696	1,81
Tôle semi-finie (M800-65D) recuite	7,85	1159,2	0,9729	1,3180	6,30	1,63	1,71	1,82
Tôle semi-finie (M800-65D) non recuit	7,85	1163,48	0,9765	1,3233	20,8	1,46	1,68	1,82

On remarque que les caractéristiques magnétiques (l'induction magnétique) de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) recuite sont plus élevées que celles de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A), Les pertes magnétiques de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) non recuite sont élevées par rapport aux deux autres tôles, (Figure VI-29-30-31-32).

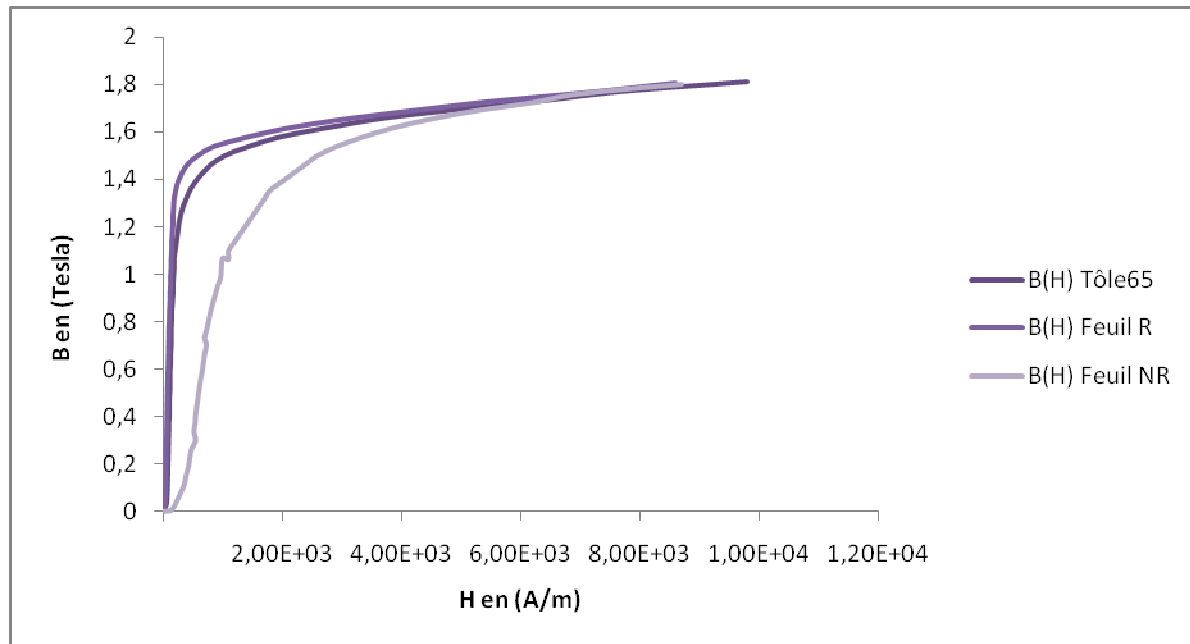


Figure VI-29 : Courbe de l'induction magnétique de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de champ magnétique (Annexe D).

Cette figure nous montre que l'induction magnétique en fonction du champ magnétique de la tôle livrée à l'état semi-fini recuite est plus importante que celle de la tôle livrée à l'état fini, l'induction de la tôle livrée à l'état semi-fini non recuite est faible.

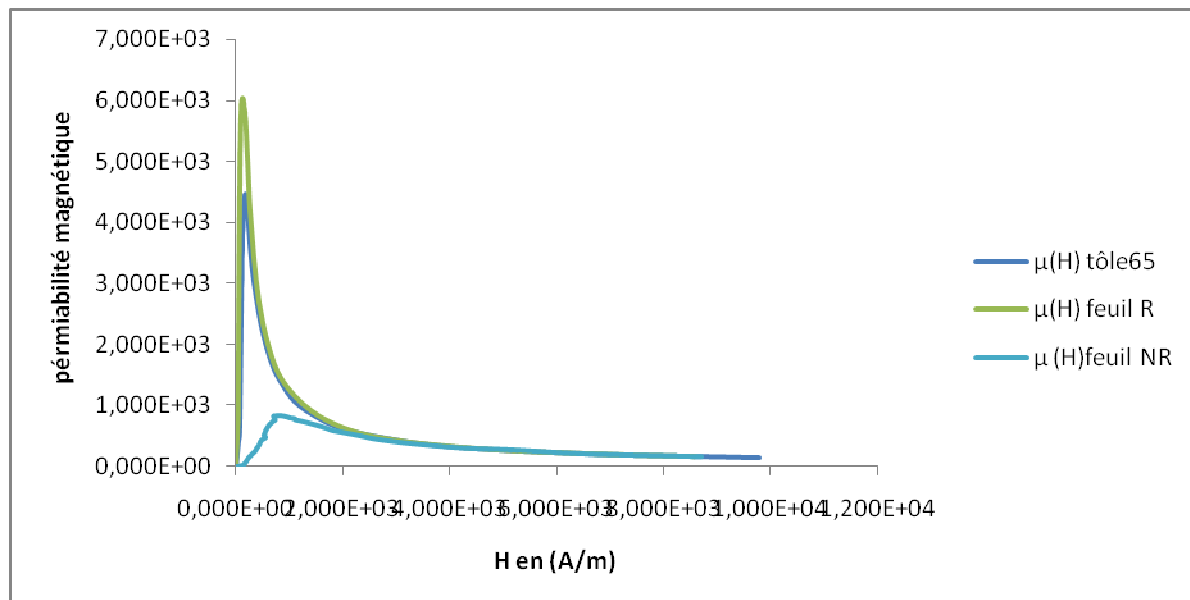


Figure VI-30 : Courbe de la perméabilité magnétique de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de champ magnétique (Annexe D).

Ces courbes nous montrent l'évolution de la perméabilité magnétique en fonction du champ magnétique, on remarque la perméabilité magnétique de la tôle livrée à l'état semi-fini recuite est élevée par rapport à celle de la tôle livrée à l'état fini, la perméabilité de la tôle livrée à l'état semi-fini non recuite est médiocre.

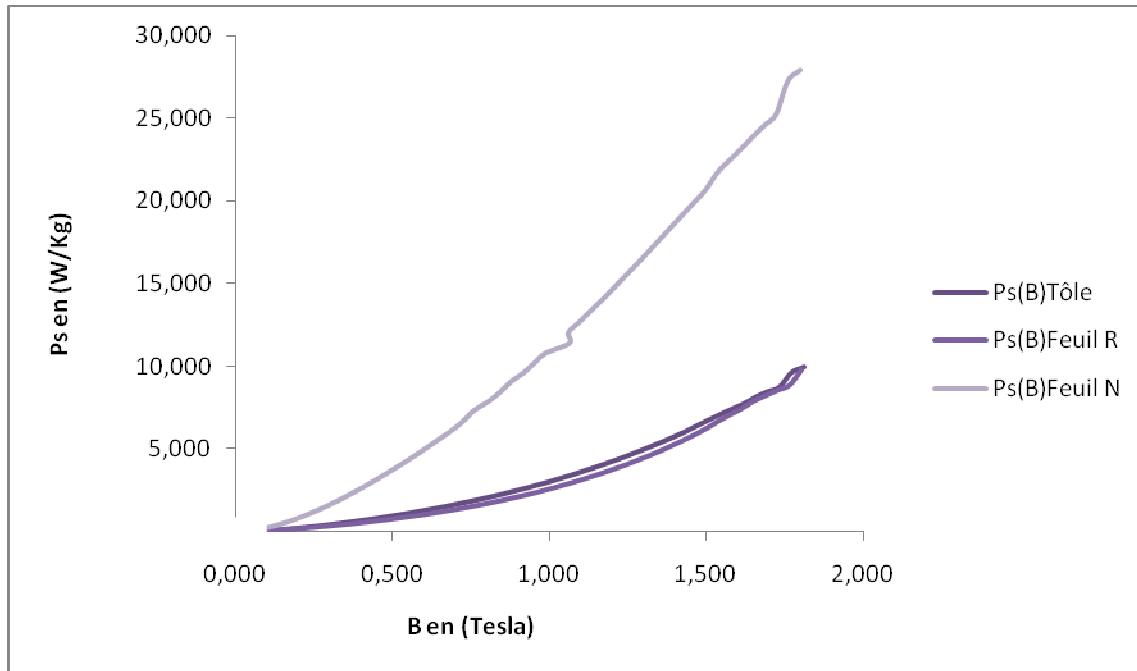


Figure VI-31 : Courbe des pertes totales spécifiques magnétiques de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de l'induction magnétique (Annexe D).

D'après cette figure on remarque que les pertes totales spécifiques de la tôle livrée à l'état semi-fini non recuite sont très élevées par rapport aux pertes de la tôle livrée à l'état semi-fini recuite et la tôle livrée à l'état fini qui se rapprochent légèrement car on distingue bien que la tôle livrée à l'état semi-fini recuite a moins de pertes que celle de la tôle livrée à l'état fini.

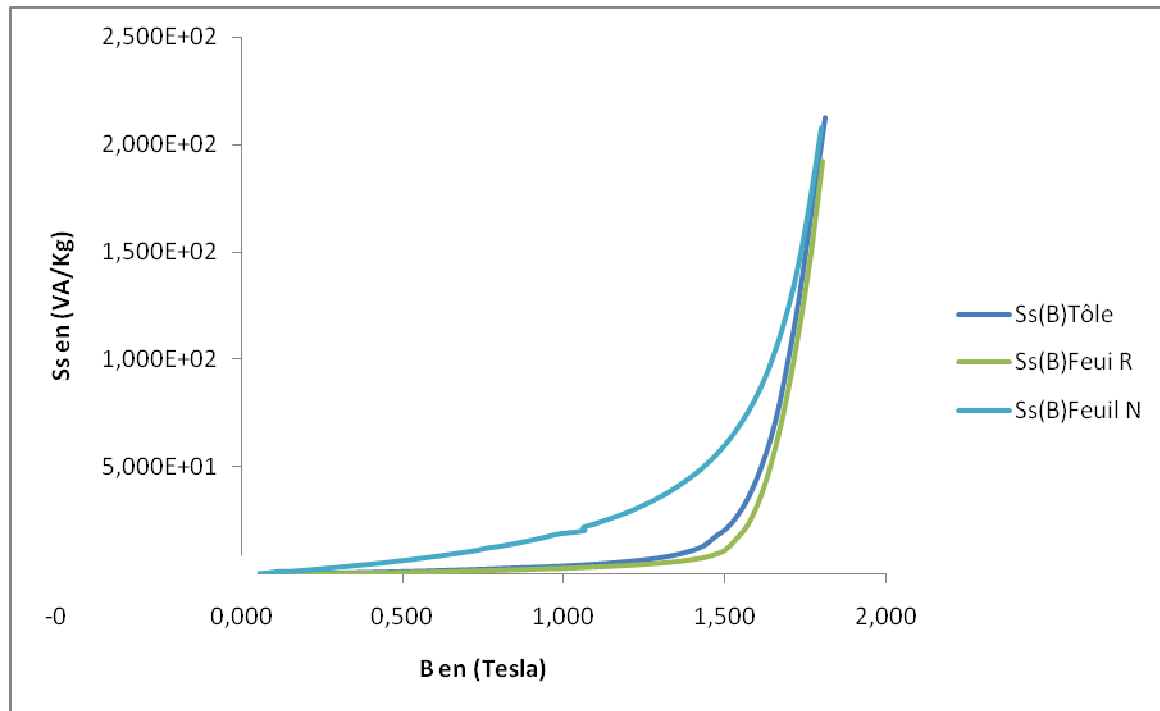


Figure VI-32 : Courbe des puissances apparentes spécifiques de la tôle (M800-65A) et (M800-65D) recuite et (M800-65D) non recuite en fonction de l'induction magnétique (Annexe D).

Les courbes des puissances apparentes spécifiques en fonction de l'induction magnétique nous montrent que la puissance apparente spécifique de la tôle livrée à l'état semi-fini recuite est plus faible que celle de la tôle livrée à l'état fini et celle de la tôle livrée à l'état semi-fini non recuite est élevée.

❖ **Le coefficient d'anisotropie des pertes spécifique totale P_s à 1,5 Tesla :****Tableau VI-15 :** Résultats des mesures qui s'effectuent suivant une seule direction pour les deux bandes pour la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).

Tôle fini	ρ (kg /dm ³)	M_p (g)	M_A (kg)	A (cm ²)	$P_{1,5}$
Sens L	7,80	689,6	0,5787	0,7893	6,510
Sens T	7,80	696,0	0,5841	0,7967	6,752

Coefficient d'anisotropie (r) =

$$r = [P_{1,5}(L) - P_{1,5}(T) / P_{1,5}(L) + P_{1,5}(T)] * 100$$

Application Numérique : $r = [6,51 - 6,75 / 6,51 + 6,75] * 100$

$$r = 1,82\%$$

Les résultats présentés dans le tableau précédent nous montrent que la tôle

(M800-65A) réponds aux normes qui caractérise le magnétisme (Annexe A), $r = \pm 10\%$

.

Tableau VI-16 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant une seule direction pour les deux bandes pour la tôle livrée à l'état semi- fini (M800-65D) recuite.

Tôle semi-finie recuite	ρ (kg /dm ³)	M_p (g)	M_A (kg)	A (cm ²)	$P_{1,5}$
Sens L	7,85	672,7	0,5470	0,7413	6,045
Sens T	7,85	651,8	0,5645	0,7651	6,605

Coefficient d'anisotropie (r) :

$$r = [P_{1,5}(L) - P_{1,5}(T) / P_{1,5}(L) + P_{1,5}(T)] * 100$$

Application Numérique : $r = [6,045 - 6,605 / 6,045 + 6,605] * 100$

$$r = 4,42\%$$

Tableau VI-17 : Résultats des mesures qui s'effectuent suivant une seule direction pour les deux bandes pour la tôle livrée à l'état semi- fini

(M800-65D) non recuite.

Tôle semi-finie non recuite	ρ (kg /dm ³)	M _p (g)	M _A (kg)	A (cm ²)	P _{1,5}
Sens L	7,85	667,7	0,5603	0,7594	21,470
Sens T	7,85	662,9	0,5563	0,7539	20,180

Coefficient d'anisotropie (r) =

$$r = [P_{1,5}(L) - P_{1,5}(T) / P_{1,5}(L) + P_{1,5}(T)] * 100$$

Application Numérique : $r = [21,470 - 20,180 / 21,470 + 20,180] * 100$

$$r = 3,09\%$$

Les résultats des tableaux VI-16 et VI-17 nous montre que la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) est anisotrope par rapport à la tôle livrée à l'état semi-finie (M800-65D) recuite, (l'anisotropie des pertes magnétiques de la tôle livrée à l'état semi-finie

(M800-65D) n'est pas donnée par le fournisseur)

Tableau VI- 18 : Récapitulatif de l'anisotropie magnétique de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) et la tôle livrée à l'état semi-finie (M800-65D) recuite et non recuite.

La Tôle	Coefficient d'anisotropie %
Tôle fini	1,82
Tôle semi-finie recuite	4,42
Tôle semi-finie non recuite	3,09

L'essai magnétique, nous montre bien une chute des caractéristiques magnétiques de la tôle livrée à l'état fini par rapport à la tôle livrée à l'état semi-fini recuite qui s'explique par la déformation plastique de la tôle livrée à l'état fini au bord de la pièce après découpage (résultats de la microdureté, analyse du profil de découpe, et les résultats de l'observation microstructurale), car l'opération de découpage pour la tôle livrée à l'état semi-fini se fait avant l'opération de recuit (bonne caractéristiques mécanique) et après le recuit, on va avoir de bonnes caractéristiques magnétiques, par contre la tôle livrée à l'état fini (recuite) ayant des caractéristiques magnétiques bien définies (Annexe A) va subir un opération de découpage avec l'outil de découpe de la tôle livrée à l'état semi-fini qui va engendré la détérioration de ses caractéristiques magnétiques due à une mauvaise découpe.

Conclusion générale

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire est l'étude de l'aptitude à la découpe de la tôle magnétique à grains non orientés livrée à l'état fini (M800-65A), dans cet objectif on a procédé à une comparaison entre les caractéristiques mécaniques et magnétiques de la tôle magnétique à grains non orientés livrée à l'état fini (M800-65A) et celles de la tôle magnétique livrée à l'état semi-fini (M800-65D), qui suit un même procédé de découpage avec un même outil de découpe, ces tôles constitue la base des matériaux magnétiques utilisés en génie électrique car elles permettent de véhiculer des flux magnétiques importants.

La différence de process entre ces deux tôles c'est que la (M800-65A) est livrée à l'état fini avec recuit donc après découpage se mit directement sous forme de circuit magnétique dans les machines électrique, par contre la (M800-65D) après découpage se procède aux traitements thermiques de décarburation et de recristallisation.

On remarque alors que notre outil de découpe se trouve devant deux structures différente l'une est dure et l'autre est douce.

Les résultats que nous avons obtenus au cours des essais mécaniques et magnétiques effectué dans ce projet nous montrent que :

- ➔ le comportement, la microstructure, la dureté de la tôle livrée à l'état fini (M800-65A) sont différents de ceux de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D) ;
- ➔ déformation et changement de la microstructure de la (M800-65A) après découpage avec l'outil qui avait été conçus pour la (M800-65D) ;
- ➔ dégradation des propriétés magnétiques la (M800-65A) après découpage ;
- ➔ Meilleures caractéristiques mécanique et magnétique de la (M800-65D) qui subit un recuit de décarburation et de recristallisation après découpage.

Les caractéristiques magnétiques de la tôle ont une importance fondamentale pour l'utilisateur car elles déterminent la qualité électrique plus ou moins grande du produit final, qu'il s'agisse d'un moteur, ou d'un transformateur, ces caractéristiques magnétiques dépendent des caractéristiques mécaniques de la tôle.

L'utilisateur devrait cependant réfléchir sur le fait qu'avant d'être assemblées dans ces moteurs ou transformateurs, les tôles électriques doivent gardées leurs caractéristiques magnétique initiales (réduire les contraintes de mise en œuvre).

Les outils en carbure réussissent à obtenir des résultats excellents pour un grand nombre d'utilisation (durée de vie de l'outil).

Analysons les facteurs permettant d'obtenir ces résultats positifs :

- Un outil en carbure d'excellente qualité (le découpage se fait sur un outil à élément en carbure de tungstène) ;
- Une utilisation correcte de l'outil, notamment en ce qui concerne la presse et le lubrifiant de la tôle ;
- Un entretien correct de l'outil ;
- L'utilisation de tôle ayant des caractéristiques mécaniques adaptées.

Et parmi les paramètres qui peuvent mener à bien cette étude surtout en ce qui concerne la diminution des bavures sur la pièce finie et l'amélioration de la qualité de la zone coupée, c'est l'essai de poinçonnage qui nous permettra d'étudier correctement le découpage, l'effort appliqué par le poinçon lors du découpage, le jeu de découpe et la vitesse,...etc.

Dans ce travail, on n'a pas pu aller au-delà d'une vitesse supérieure à $2,5V_0$, réglé le jeu de découpe et l'effort de poinçon à cause des précautions suivies par l'entreprise (l'outil disponible n'aurait pas pu supporter les vitesses supérieures à $2,5V_0$).

En perspective, on propose aux étudiants des promotions à venir qui veulent continuer ce travail d'étudier les paramètres optimaux de l'outillage (rayon de poinçon, jeu de poinçon-matrice,...etc.) qui permettront de satisfaire deux objectifs principaux :

- ➔ La réduction de la pression de contact (usure de l'outil) ;
- ➔ La garantie d'une bonne qualité de découpe (hauteur des bavures minimale).

De ce fait une modélisation appropriée du comportement du matériau est nécessaire pour déterminer dans quelle mesure tel paramètre du matériau va induire tel changement sur le procédé et le produit final, une solution numérique au problème de découpage sera de mettre en place un nouvel outil possédant des propriétés adéquates pour une découpe parfaite des tôles magnétiques à grains non orientés livrées à l'état fini (M800-65A).

Annexes

Annexe A

I-1 Tôles magnétiques livrée à l'état semi-fini (M800-65D) :

I-1-1 Désignation :

La désignation symbolique des nuances d'acier de la présente norme européenne est conforme à l'EN 10126 :1995,

La désignation comprend dans l'ordre :

- 1) La lettre M pour acier magnétique ;
- 2) Le centuple de la valeur spécifique des pertes totales spécifiques maximales, en watts par kilogramme correspondant à l'épaisseur nominale du produit, à une fréquence de 50 Hz et pour une induction de 1,5 T ;
- 3) Le centuple de l'épaisseur nominale du produit en millimètres ;
- 4) La lettre caractéristique D pour les tôles magnétique en acier non allié livrées à l'état semi-fini.

Tableau 1 : Caractéristiques magnétiques (données de fournisseur) de la tôle livrée à l'état semi-fini (M800-65D).

Désignation conformément à EN 10027-1	Epaisseur nominale (mm)	P _s (W/Kg)	J T			ρ (kg/dm ³)
			2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m	
M800-65D	0,65	8,00	1,62	1,70	1,79	7,85

P_s : Pertes totales spécifiques maximales (W/Kg) à 50 Hz pour 1,5 T.

J : La polarisation magnétique minimale(T) dans un champ magnétique. alternatif pour une intensité de champs magnétique.

ρ : Masse volumique conventionnelle (kg/dm³).

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques (données de fournisseur) de la tôle livrée à l'état semi fini (M800-65D).

Désignation conformément à EN 10027-1	Module de Young N/mm ²	R _e (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	La dureté HV
M800-65D	250.10 ³	450	530	210

I-2 Tôles magnétiques à grains non orientés livrées à l'état fini

(M800-65A) :

I-2-1 Désignation :

La désignation symbolique des nuances d'acier de la présente norme européenne est conforme à l'EN 10106 :1995,

La désignation comprend dans l'ordre :

- 1) La lettre M pour acier magnétique ;
- 2) Le centuple de la valeur spécifique des pertes totales spécifiques maximales, en watts par kilogramme correspondant à l'épaisseur nominal du produit, à une fréquence de 50 Hz et pour une induction de 1,5 T ;
- 3) Le centuple de l'épaisseur nominale du produit en millimètres ;
- 4) La lettre caractéristique A pour les tôles magnétiques à grains non orientées livrées à l'état fini.

Tableau 3 : Caractéristiques magnétiques (données de fournisseur) de la tôle livrée à l'état fini

(M800-65A).

Désignation conformément à EN 10027-1	Epaisseur nominale (mm)	Anisotropie Maximale Des pertes %	P _s (W/Kg)	J (A/m)			ρ (kg/dm ³)
				2500	5000	10000	
M800-65A	0,65	±10	8,00	1,62	1,70	1,79	7,8

P_s : Pertes totales spécifiques maximales (W/Kg) à 50 Hz pour 1,5 T.

J : La polarisation magnétique minimale(T) dans un champ magnétique alternatif pour une intensité de champs magnétique.

ρ : Masse volumique conventionnelle (kg/dm³).

Tableau 4 : Caractéristiques mécanique (données de fournisseur) de la tôle livrée à l'état fini (M800-65D).

Désignation conformément à EN 10027-1	Module de Young N/mm ²	R _e (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	La dureté HV
M800-65A	210.10 ³	300	405	130

Annexe B

Fiches technique des équipements :

LA FICHE TECHNIQUE DE LA MACHINE DE TRACTION

Machine d'essai électromécanique RM 100

N° d'identité : 610 023 007

N° interne : 650/31

Fabrication ou fournisseur : Schenk-Trebel

KLD : Fe

Date de mise en marche : 1985

Température de fonctionnement : 18 à 35°C

Plage de mesure : Cellule 1 : 0 à ± 100 KN

Cellule 2 : 0 à ± 10 KN

Cellule 3 : 0 à ± 0.1 KN

Précision : ± 0.05

Course de traverse : 1000 mm

LA FICHE TECHNIQUE DE LA MACHINE (DUROMETRE)

Machine d'essai électromécanique RM 100

N° d'identité	: 620 304 001
N° interne	: 650/9
Fabrication ou fournisseur	: LABOTEC (Wolpert)
Précision	: 1%
KLD	: 14
Date de mise en marche	: 1986
Nombre de charge	: 17
Charges Brinell	: 5 ; 10 ; 625 ; 30 ; 31.25 ; 62.5 ; 125 ; 187.5 ; 250
Charges Vickers	: 1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 1 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 125
Charges Rockwell avec 98.1 N (10 Kp) de préchage : HRA (60) ; HRB (100) ; HRB (150)	
Hauteur de la machine	: 800 mm
Hauteur d'essai	: 0 à 300 mm
Poids Net/Brut	: 200/ 300 Kg
Objectif grossissement	: 70 et 140 x
La durée d'essai (levier)	: 6 à 10s pour les charges au dessus de 1 à 5 (3Kp) ; Pour l'aluminium, les antifrictions et les alliages de plombe 30s

FICHE TECHNIQUE DE LA MACHINE POUR LA MICRODURETE

Machine D'essai de dureté Dia-Testor 2Rc

N° identification	: 620 304 001
N° interne	: 650/9
KLD	: 14
Fournisseur ou Fabricant	: LABOTEC (Wolpert)
Précision	: 1%
Date de mise en marche	: 1986
Température de fonctionnement	: 18 à 35 °c
Nombres de charges	: 17
Charges Brinell	: 5 ; 10 ; 15.625 ; 30 ; 31.25 ; 62.5 ; 125 ; 187.5 ; 250
Charges Vickers	: 1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 1 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 125
Charges Rockwell	
avec 98.1N (10kp) de précharge	: HRA (60) ; HRB (100) ; HRB (150).
Hauteur de la machine	: 800 mm
Hauteur d'essai	: 0 à 300mm
Poids Net/Brut	: 200/300Kg
Objectif grossissement	: 70 et 140 x

FICHE TECHNIQUE DE CADRE EPSTIEN

Appareil Cadre Epstein

N° identification : 620 322 040

N° interne : 650/33

KLD : 24

Fournisseur ou Fabricant : VETTINER

Précision : 0.5%

Date de mise en marche : 1999

Température de fonctionnement : 18 à 35 °c

Mesure du champ : H100 =KA/m

Gamme de courant : 1, 4, 10, 40, 100 A

Mesure d'induction (B) : 2.5 Tesla maxi

Fréquence : 20 Hz jusqu'à 2000 Hz

Mesure de perte : 0,2 jusqu'à 200 W

Précision de mesure : 0,5%

Puissance : 2kVA

Tension de sortie : 0-50V

Courant maxi : 40 A

Fréquence de sortie : 20-200 / 100-1000Hz

Longueur : 300mm

Poids des tôles laminées : 1 kg

Ligne moyenne : 250 x 250 mm

Longueur du circuit : 940 mm

Courant maxi prim. : 10A ou 50A (rms)

Enroulement primaire principal 700 spire (4x175) bornes A et B

Enroulement Secondaire principal 700 spire (4x175) bornes C et D

Enroulement Primaire additionnel + 400 spires (4x100) bornes A et E

Enroulement Secondaire additionnel + 800 spires (4x200) bornes K et L

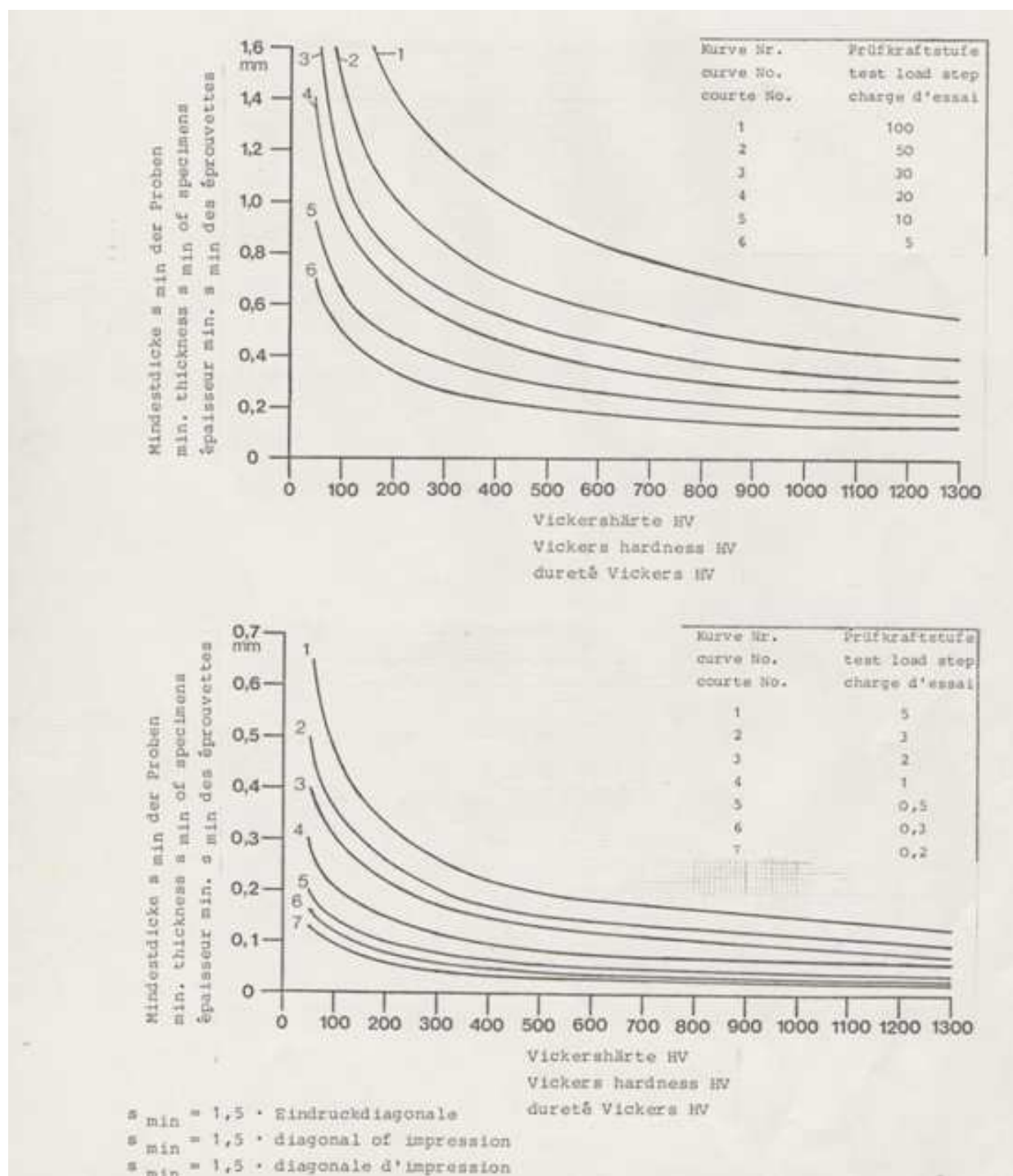
Amplificateur de puissance AC et/ou DC

Tension et fréquence programmable

Pilotage manuel ou par ordinateur

Annexe C

Variation de la charge pour la dureté Vickers selon l'épaisseur de la tôle :



Annexe D

Tableau 1 : Résultats des mesures avec le cadre Epstein qui s'effectuent suivant la direction longitudinal (direction de laminage) et suivant le sens transversal pour une autre bande pour la tôle livrée à l'état fini (M800-65A).

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (W/Kg)	μ_a
1,812	9,80E+03	9,931	2,125E+02	1,474E+02
1,771	7,70E+03	9,587	1,703E+02	1,837E+02
1,733	6,40E+03	8,711	1,303E+02	2,164E+02
1,694	4,90E+03	8,436	9,714E+01	2,743E+02
1,658	3,70E+03	8,131	7,147E+01	3,526E+02
1,62	2,80E+03	7,725	5,255E+01	4,654E+02
1,581	2,00E+03	7,397	3,813E+01	6,198E+02
1,544	1,50E+03	7,070	2,830E+01	8,191E+02
1,507	1,10E+03	6,737	2,156E+01	1,069E+03
1,471	8,50E+02	6,407	1,762E+01	1,374E+03
1,436	7,00E+02	6,067	1,344E+01	1,624E+03
1,399	5,70E+02	5,747	1,118E+01	1,970E+03
1,362	4,70E+02	5,444	9,610E+00	2,326E+03
1,324	4,00E+02	5,152	8,446E+00	2,667E+03
1,288	3,40E+02	4,874	7,557E+00	3,001E+03
1,252	3,00E+02	4,615	6,884E+00	3,289E+03
1,216	2,70E+02	4,362	6,294E+00	3,569E+03
1,179	2,50E+02	4,117	5,790E+00	3,811E+03
1,143	2,30E+02	3,882	5,342E+00	4,034E+03
1,106	2,10E+02	3,649	4,937E+00	4,237E+03
1,07	1,90E+02	3,426	4,575E+00	4,376E+03
1,032	1,90E+02	3,210	4,249E+00	4,437E+03
0,996	1,80E+02	3,007	3,958E+00	4,463E+03
0,959	1,70E+02	2,816	3,689E+00	4,463E+03

0,922	1,70E+02	2,631	3,439E+00	4,439E+03
0,886	1,60E+02	2,454	3,204E+00	4,415E+03
0,85	1,50E+02	2,283	3,052E+00	4,367E+03
0,812	1,50E+02	2,119	2,829E+00	4,316E+03
0,776	1,40E+02	1,965	2,623E+00	4,265E+03
0,739	1,40E+02	1,816	2,427E+00	4,189E+03
0,702	1,40E+02	1,670	2,240E+00	4,111E+03
0,666	1,30E+02	1,533	2,063E+00	4,024E+03
0,629	1,30E+02	1,402	1,897E+00	3,920E+03
0,593	1,20E+02	1,276	1,737E+00	3,818E+03
0,556	1,20E+02	1,154	1,584E+00	3,699E+03
0,519	1,20E+02	1,038	1,438E+00	3,567E+03
0,483	1,10E+02	0,927	1,326E+00	3,429E+03
0,446	1,10E+02	0,821	1,188E+00	3,268E+03
0,409	1,10E+02	0,720	1,057E+00	3,097E+03
0,373	1,00E+02	0,626	9,370E-01	2,913E+03
0,336	9,90E+01	0,535	8,207E-01	2,715E+03
0,3	9,50E+01	0,450	7,115E-01	2,508E+03
0,263	9,20E+01	0,369	6,067E-01	2,277E+03
0,226	8,90E+01	0,294	5,089E-01	2,032E+03
0,189	8,50E+01	0,226	4,292E-01	1,763E+03
0,152	8,20E+01	0,163	3,361E-01	1,477E+03
0,115	7,80E+01	0,108	2,408E-01	1,175E+03
0,079	7,30E+01	0,063	1,733E-01	8,659E+02
0,041	6,40E+01	0,028	1,000E-01	5,122E+02
0,024	4,60E+01	0,007	3,603E-02	4,152E+02
0	0,00E+00	0,000	1,300E-05	0,000E+00

Tableau 2 : Résultats des mesures avec le cadre Epstein qui s'effectuent suivant la direction longitudinal (direction de laminage) et suivant le sens transversal pour une autre bande pour la tôle livrée à l'état semi- fini (M800-65D) recuit.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (W/Kg)	μ_a
1,804	8,60E+03	9,830	1,921E+02	1,669E+02
1,766	7,20E+03	8,890	1,470E+02	1,962E+02
1,726	5,50E+03	8,570	1,092E+02	2,475E+02
1,688	4,20E+03	8,250	7,879E+01	3,188E+02
1,65	3,00E+03	7,910	5,468E+01	4,322E+02
1,614	2,10E+03	7,478	3,710E+01	6,061E+02
1,575	1,40E+03	7,092	2,388E+01	9,209E+02
1,538	8,70E+02	6,698	1,687E+01	1,408E+03
1,502	6,10E+02	6,286	1,146E+01	1,964E+03
1,466	4,30E+02	5,918	9,139E+00	2,689E+03
1,43	3,30E+02	5,574	7,721E+00	3,459E+03
1,393	2,60E+02	5,246	6,804E+00	4,218E+03
1,357	2,20E+02	4,938	6,102E+00	4,958E+03
1,32	1,90E+02	4,641	5,565E+00	5,508E+03
1,283	1,80E+02	4,361	5,109E+00	5,675E+03
1,247	1,70E+02	4,094	4,729E+00	5,733E+03
1,209	1,70E+02	3,838	4,370E+00	5,782E+03
1,174	1,60E+02	3,601	4,075E+00	5,839E+03
1,137	1,50E+02	3,368	3,788E+00	5,883E+03
1,101	1,50E+02	3,155	3,539E+00	5,928E+03
1,065	1,40E+02	2,947	3,297E+00	5,964E+03
1,029	1,40E+02	2,754	3,078E+00	5,995E+03
0,992	1,30E+02	2,566	2,853E+00	6,012E+03
0,956	1,30E+02	2,388	2,732E+00	6,023E+03
0,919	1,20E+02	2,220	2,528E+00	6,029E+03
0,882	1,20E+02	2,061	2,350E+00	6,009E+03
0,846	1,10E+02	1,910	2,175E+00	5,995E+03

0,81	1,10E+02	1,765	2,013E+00	5,968E+03
0,773	1,00E+02	1,629	1,857E+00	5,926E+03
0,736	1,00E+02	1,496	1,711E+00	5,857E+03
0,7	9,60E+01	1,373	1,575E+00	5,778E+03
0,663	9,30E+01	1,253	1,440E+00	5,704E+03
0,627	8,90E+01	1,141	1,316E+00	5,619E+03
0,59	8,60E+01	1,035	1,201E+00	5,478E+03
0,553	8,30E+01	0,935	1,121E+00	5,315E+03
0,517	7,90E+01	0,839	1,006E+00	5,195E+03
0,48	7,60E+01	0,748	9,041E-01	5,006E+03
0,444	7,30E+01	0,663	8,055E-01	4,820E+03
0,407	7,10E+01	0,583	7,142E-01	4,588E+03
0,371	6,80E+01	0,507	6,275E-01	4,367E+03
0,334	6,50E+01	0,436	5,473E-01	4,083E+03
0,298	6,20E+01	0,370	4,710E-01	3,806E+03
0,261	6,00E+01	0,309	4,019E-01	3,485E+03
0,225	5,70E+01	0,252	3,358E-01	3,130E+03
0,188	5,40E+01	0,199	2,806E-01	2,765E+03
0,151	5,10E+01	0,150	2,179E-01	2,347E+03
0,114	4,80E+01	0,106	1,610E-01	1,898E+03
0,077	4,40E+01	0,067	1,086E-01	1,402E+03
0,04	3,90E+01	0,035	6,372E-02	8,204E+02
0,025	3,10E+01	0,011	2,428E-02	6,480E+02
0	0,00E+00	0,000	8,000E-06	0,000E+00

Tableau 3 : Résultats des mesures avec le cadre Epstein qui s’effectuent suivant la direction longitudinal (direction de laminage) et suivant le sens transversal pour une autre bande pour la tôle livrée à l’état semi- fini (M800-65D) non recuit.

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (W/Kg)	μ_a
1,800	8,700E+03	27,920	2,078E+02	1,645E+02
1,760	7,000E+03	27,240	1,693E+02	1,989E+02
1,723	6,200E+03	25,260	1,398E+02	2,219E+02
1,686	5,200E+03	24,580	1,180E+02	2,751E+02
1,648	4,400E+03	23,880	1,003E+02	2,976E+02
1,612	3,800E+03	23,170	8,689E+01	3,368E+02
1,573	3,300E+03	22,440	7,580E+01	3,770E+02
1,536	2,900E+03	21,730	6,712E+01	4,172E+02
1,500	2,600E+03	20,720	6,012E+01	4,542E+02
1,464	2,400E+03	19,960	5,419E+01	4,918E+02
1,427	2,200E+03	19,210	4,904E+01	5,272E+02
1,390	2,000E+03	18,460	4,476E+01	5,618E+02
1,353	1,800E+03	17,700	4,089E+01	5,939E+02
1,316	1,700E+03	16,940	3,745E+01	6,256E+02
1,280	1,600E+03	16,210	3,456E+01	6,542E+02
1,243	1,500E+03	15,490	3,187E+01	6,808E+02
1,207	1,400E+03	14,770	2,945E+01	7,062E+02
1,171	1,300E+03	14,080	2,738E+01	7,297E+02
1,134	1,200E+03	13,400	2,546E+01	7,501E+02
1,098	1,100E+03	12,720	2,362E+01	7,705E+02
1,061	1,100E+03	12,060	2,189E+01	7,876E+02
1,065	1,000E+03	11,430	2,043E+01	8,020E+02
0,988	9,700E+02	10,800	1,897E+01	8,139E+02
0,951	9,200E+02	10,180	1,771E+01	8,235E+02
0,916	8,800E+02	9,590	1,641E+01	8,312E+02
0,879	8,400E+02	9,100	1,533E+01	8,367E+02
0,842	8,000E+02	8,430	1,421E+01	8,376E+02

0,805	7,700E+02	7,880	1,323E+01	8,374E+02
0,760	7,300E+02	7,340	1,222E+01	8,337E+02
0,732	7,000E+02	6,810	1,129E+01	8,274E+02
0,700	7,300E+02	6,292	1,052E+01	7,647E+02
0,663	7,000E+02	5,795	9,745E+00	7,508E+02
0,626	6,800E+02	5,308	8,929E+00	7,342E+02
0,590	6,600E+02	4,843	8,221E+00	7,159E+02
0,553	6,300E+02	4,384	7,476E+00	6,942E+02
0,516	6,100E+02	3,942	6,768E+00	6,696E+02
0,480	5,900E+02	3,521	6,151E+00	6,438E+02
0,444	5,700E+02	3,111	5,501E+00	6,155E+02
0,407	5,500E+02	2,714	4,931E+00	5,840E+02
0,370	5,400E+02	2,332	4,443E+00	5,498E+02
0,335	5,200E+02	1,978	3,891E+00	5,161E+02
0,298	5,500E+02	1,636	3,358E+00	4,776E+02
0,261	4,800E+02	1,318	2,848E+00	4,369E+02
0,225	4,500E+02	1,029	2,362E+00	3,956E+02
0,189	4,300E+02	0,762	1,904E+00	3,530E+02
0,152	3,900E+02	0,527	1,460E+00	3,065E+02
0,115	3,600E+02	0,333	1,450E+00	2,576E+02
0,078	3,000E+02	0,180	6,690E-01	2,046E+02
0,041	2,300E+02	0,075	3,396E-01	1,400E+02
0,004	1,400E+02	0,016	9,990E-02	3,205E+01
0,000	0,000E+00	0,000	4,000E-06	0,000E+00