

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

EN GENIE MECANIQUE

OPTION : CONSTRUCTION MECANIQUE

### Thème

Etude de la possibilité de substitution de l'acier  
St60-2 par l'acier St52-3 destiné pour la fabrication  
des arbres des moteurs électriques

Proposé par :  
Mr. IGUER. B

Dirigé par :  
Mr. ZIANI. H

Réalisé par :  
Mr. HADJ-ALI YUCEF

Promotion 2015



## *Remerciements*

*Je remercie tout d'abord et avant tout le Bon Dieu qui ma donné le courage, la patience et la détermination.*

*Je tiens à remercier particulièrement Mr. IGUER, de m'avoir confié ce projet d'étude, à travers lui Mr. MOHAND OUAMAR, ces collègues, ainsi que tout le personnel de l'ELECTRO INDUSTRIE (E.I).*

*Je tiens également à remercier mon promoteur Mr. ZIANI. H, d'avoir accepté de diriger ce travail, et d'avoir été patient et disponible.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements et reconnaissances, à M<sup>EME</sup> BAGUENANE. GH, pour sa disponibilité et son aide précieuse.*

*Ce mémoire de fin d'étude est également un témoignage de ma profonde reconnaissance et gratitude à mes enseignants, qui ont contribué à ma formation.*

*Mes remerciements vont aussi, aux responsables du laboratoire physico-chimique de l'entreprise (E.I), pour avoir répondu favorablement à mes nombreuses sollicitations, où je peux citer Mr. HARBIT et Mr. BLABASSE qui ma accompagné durant tout les essais que j'ai effectué. Sans oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour le bon déroulement de ce travail, parmi les nombreux, je peux citer Mr. ALIANE. , BENALI. M, M<sup>lle</sup> HAMROUNI.F, MARZOUK, DALI, ABD ARAHMAN.*

*Mes remerciements à tous mes amis (es) et camarades, en particulier OUAZAR MADANI pour ça présence et son sens de l'humour et HANICH FARES, sans oublier, MOHAND, GHILES et LYES.*

*Mes remerciements vont également à tous les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce travail.*

*Enfin, je m'incline devant ceux à qui je dois l'essentiel, mes parents, pour leur soutien incommensurable, leurs sacrifices et l'intérêt qu'ils ont accordé à mes études et à ma réussite.*

*A tout les membres de ma famille .....MERCI*





## *Dédicaces*

*A la mémoire de ma chère et regrettée mère ;*

*« Akra abayen ezizen fellli asyismim isgigh issem      aken ouliou athyathani athighil mazalikem »*

*Ait Menguellete*

*A mon père ;*

*A mes frères et sœurs*

*A toute ma famille*

*A mes amis et à toutes les personnes qui me sont chères*



# Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Présentation de l'entreprise

## Partie I : Etudes bibliographiques

### Chapitre I : Machines électrique

I. Introduction .....	1
II. Classification des machines électrique .....	1
III. Les différents types de machines électriques .....	2
III-1. Machines statiques (transformateur) .....	2
III-2. Machines tournantes .....	3
III-2-1. Constitution d'une machine tournante .....	3
III-2-2. Les différents types de machines tournantes .....	4
III-2-2-1. Générateurs électrique .....	4
1) Constitution et fonctionnement .....	4
2) la dynamo .....	5
3) L'alternateur .....	5

III-2-2-2 moteurs .....	6
1. Moteur Électrique à Courant Continu .....	6
1-2) Constitution de la machine à courant continu .....	8
2. Moteurs à courant alternatif .....	10
2-1) Moteur Électrique synchrone .....	11
2-2) Moteur Électrique Asynchrone .....	13
1) Constitution .....	15
a) Le stator .....	16
b) Le rotor .....	17
2) Fonctionnement .....	17
3) La force du courant et la tension .....	18
4) Le glissement .....	19
5) La vitesse synchrone ( $n_s$ ) .....	19
6) Bilans énergétique .....	20
6-1) Perte joule dans le: rotor et le stator .....	20
6-2) Pertes fer dans le rotor et le stator .....	21
6-3) Couple du moteur .....	21
6-4) Puissance mécanique .....	22
6-5) Rendement .....	22

## Chapitre II : Les aciers

I.	Introduction .....	23
II.	Constitution de l'acier .....	23
III.	Fabrication de l'acier .....	24
	IV-4 le laminage .....	25
	1) Laminage à chaud .....	25
	2) Laminage à froid .....	26
IV.	Classification et désignation des aciers .....	27
	V-1) Classification des aciers .....	27
	V-2) désignation des aciers .....	28

V-2-1) désignation numérique .....	28
V-2-2) désignation symbolique .....	28
a) Catégorie 1 .....	29
b) Catégorie 2 .....	33
1) aciers non alliés .....	33
2) aciers faiblement alliés .....	34
3) aciers fortement alliés .....	35
4) aciers rapides .....	36

### Chapitre III : métallurgie

I. Introduction .....	38
II. les différentes phases des aciers .....	38
II-1) Diagramme d'équilibre : Fer-carbone .....	38
II-2) Diagramme d'équilibre : Fer-cémentite .....	40
II-3) Les points caractéristiques du diagramme .....	41
II-4) les différentes phases des aciers (la microstructure) .....	45
V) Influence des éléments chimiques sur les aciers .....	50
V-1) Classification des éléments d'alliages .....	50
a) Eléments gammagènes .....	50
b) Eléments alphagènes .....	51
V-2) les éléments d'alliages .....	52

### Chapitre IV : les essais mécaniques

Introduction .....	54
I/ Essais de traction .....	55
I. Description générale d'une machine de traction .....	55
II. Eprouvettes .....	56
III. Courbes conventionnelle et rationnelle de traction .....	56
IV. Lecture et interprétation de la courbe de traction .....	58
V.1. Zone élastique .....	59
V.2. Zone plastique .....	60

II/ Essai de dureté .....	62
1) Les essais par indentation .....	63
3-1. Essai de dureté Brinell .....	63
3-2. Essai de dureté Rockwell .....	65
3-3. L'essai de dureté Vickers .....	66
2) Essais de microdureté .....	67
3) Nanodureté (indenteur Berkovitch) .....	68
III/ Essai de résilience.....	69
I. Introduction .....	69
II. éprouvettes d'essai de résilience .....	70
III. Désignation des aciers en fonction de leur résilience .....	72

## Chapitre V : description des aciers ST60-2 et St53-2

I. L'acier St52-3 .....	73
I. Identification de l'acier St60-2 .....	73
II. Domaines d'application .....	73
III. Composition chimique .....	73
IV. caractéristiques mécanique .....	73
II. L'acier St52-3 .....	74
I. Identification de l'acier St52-3 .....	74
II. Domaines d'application .....	74
III. Composition chimique .....	74
IV. caractéristiques mécanique .....	74

## Partie pratique

I. La composition chimique .....	75
1. Introduction .....	75
2. prélèvement de l'échantillon .....	75
3. Les résultats obtenus .....	75
4. Conclusion .....	75
II. Examen métallographique .....	77
1. Introduction .....	77

2. Principe du Microscope Optique (MO) .....	77
3. principe du Microscope Electrique à Balayage (MEB) .....	77
4. Prélèvement de l'échantillon .....	77
5. Préparation de la surface de l'examen .....	78
5.1. Polissage .....	78
a- Pré-polissage .....	78
b- Polissage de finition (en alumine) .....	78
5.2. Attaque chimique .....	78
6. Résultats des essais micrographiques .....	79
7. Conclusion .....	81
<b>III. Essais mécaniques</b>	
<b>I. Essai de traction.....</b>	<b>82</b>
1. Introduction .....	82
2. Matière de base brute .....	82
3. Machine d'essai de traction.....	82
4. préparation des éprouvettes .....	83
5. dimensions des éprouvettes .....	83
6. procédure .....	83
7. Les résultats de l'essai de traction pour les nuances d'aciers St60-2 et St52-3....	84
7.1 les courbes Forces-Déplacements de l'acier ST60-2 obtenues.....	84
7.2 les courbes Forces-Déplacements de l'acier ST52-3 obtenues.....	89
8. Conclusion .....	93
<b>II. Essais de résilience .....</b>	<b>94</b>
1. Introduction .....	94
2. Principe de l'essai .....	94
3. Eprouvette d'essai .....	95
4. Les résultats de l'essai de résilience pour les St52-3 et St62-2 .....	97
5. Conclusion .....	97
<b>III. Essais de dureté .....</b>	<b>98</b>

6. Introduction .....	98
7. Principe de l'essai .....	98
8. Echantillon d'essai .....	99
9. Les résultats de l'essai de dureté Brinell pour St52-3 et St62-2 .....	99
10. Conclusion .....	100

## VI. Vérification mécanique

1. introduction.....	101
2. description de l'arbre .....	101
3. calcul de la résistance .....	102
3.1. Moment de torsion $M_t$ .....	101
3.2. Donnée de l'entreprise .....	102
4. application numérique .....	102
4.1. Calcul de diamètre pour l'acier ST60-2 .....	102
4.2. Calcul de diamètre pour l'acier ST52-3 .....	102

Conclusion générale

Bibliographie

# Liste des figures

<b>Chapitre I : Machines électrique</b>	
<i>Figure 1 : classification des machines électriques</i> .....	1
<i>Figure 2 : tôle de forme E et I (a) avec des enroulements d'un transformateur(b)</i> .....	2
<i>Figure 3 : composantes de la dynamo rotation du circuit électrique dans un champ magnétique fixe ...</i>	5
<i>Figure 4 : rotation du champ magnétique, le circuit étant fixe</i> .....	6
<i>Figure 5 : partie principale d'un moteur à courant continu</i> .....	7
<i>Figure 6 : constitution d'un moteur à courant continu</i> .....	9
<i>Figure 7 : Les trois enroulements statoriques créent un champ magnétique tournant (Fréquence de synchronisme)</i> .....	10
<i>Figure 8 : schéma montrant le principe de fonctionnement d'une excitatrice</i> .....	12
<i>Figure 9: bobine de moteur asynchrone triphasé(a) et monophasé(b)</i> .....	14
<i>Figure 10 : vue éclatée d'un moteur asynchrone</i> .....	15
<i>Figure 11 : Stator d'une machine asynchrone basse tension</i> .....	16
<i>Figure 12 : deux rotors a cage d'écureuil (a) et bobiné (b)</i> .....	17
<i>Figure 13 : Déplacement du champ magnétique</i> .....	17
<i>Figure 14 : cheminement de la puissance active dans un moteur asynchrone</i> .....	20
<b>Chapitre II : Les aciers</b>	
<i>Figure 15 : élaboration de l'acier</i> .....	24
<i>Figure 16 : la chaine suivi par un lingot jusqu'au produit fini</i> .....	25
<i>Figure 17 : laminage chaud (a) et bobine apres laminage (b)</i> .....	26
<i>Figure 18 : laminage à froid</i> .....	27
<b>Chapitre III : la métallurgie</b>	
<i>Figure 19 : Diagramme d'équilibre : Fer-carbone</i> .....	38
<i>Figure 20: diagramme binaire fer-carbone</i> .....	43
<i>Figure 21 : constituants micrographiques des aciers</i> .....	45
<i>Figure 22 : courbe de l'austénite entre 727°C et 1148°C</i> .....	45
<i>Figure 23 : a gauche perlite lamellaire à droite perlite globulaire</i> .....	47
<i>Figure 24 : constituants micrographiques des aciers</i> .....	48
<i>Figure 25 : extension du domaine de la phase <math>\gamma</math> et réduction de la phase <math>\alpha</math></i> .....	50
<i>Figure 26 : extension du domaine ferritique (phase <math>\alpha</math>) et réduction d'austénitique (phase <math>\gamma</math>)</i> .....	50
<b>Chapitre IV : les essais mécaniques</b>	
<i>Figure 27 : machine de traction hydraulique</i> .....	54
<i>Figure 28 : Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique</i> .....	55
<i>Figure 29: courbe de traction conventionnelle <math>F / \Delta L</math></i> .....	56

Figure 30: <i>présentation d'une courbe de traction contrainte/déformation (matériau ductile)</i> .....	57
Figure 31 : <i>courbe de traction contrainte/déformation avec la limite conventionnelle de traction</i> .....	59
Figure 32 : <i>Définitions des différents domaines de dureté</i> .....	61
Figure 33: <i>Principe de dureté brinell.et dispositif d'essai de macrodureté. 1) écran de visualisation de l'empreinte 2) indenteur platine porte-échantillon</i> .....	63
Figure 34 : <i>Principe de mesure de la dureté Rockwell : gauche) échelle HRB, droite) échelle HRC</i> .....	64
Figure 35 : <i>lois de mesure de la dureté Rockwell : HRC et HRB</i> .....	65
Figure 36 : <i>Principe de mesure de la dureté Vickers</i> .....	66
Figure 37 : <i>filiations de microdureté Vickers au travers d'un joint soudé de 5mm</i> .....	67
Figure 38 : <i>Mouton de Charpy</i> .....	69
Figure 39 : <i>différentes éprouvettes Charpy</i> .....	70

### Partie pratique

Figure 40 : <i>photos du microscope optique pour les aciers St60-2 et St52-3</i> .....	75
Figure 41 : <i>photos du microscope optique pour les aciers St60-2 et St52-3</i> .....	79
Figure 42 : <i>machine de traction</i> .....	82
Figure 43 : <i>éprouvette normalisée pour l'essai de traction</i> .....	83
Figure 44 : <i>éprouvette entre les mors d'amarrage</i> .....	84
Figure 45 : <i>éprouvette de traction après rupture</i> .....	84
Figure 46 : <i>graphes (A) (B) (C) des essais de traction pour l'acier St60-2</i> .....	87
Figure 47 : <i>les courbes forces-déplacement de l'acier ST52-3</i> .....	91
Figure 48 : <i>machine d'essai de résilience (mouton pendule)</i> .....	93
Figure 49 : <i>Etapes de fabrication de l'éprouvette CHARPY V</i> .....	94
Figure 50 : <i>images illustrant l'essai de résilience</i> .....	95
Figure 51 : <i>appareil de dureté</i> .....	97
Figure 52 : <i>Echantillon pour le teste de dureté</i> .....	98
Figure 53 : <i>graphe comparatif de dureté St60-2 et St52-3</i> .....	99

# Liste des tableaux

Tableau N° 1: <i>acier désigné selon son utilisation et c'est caractéristique</i> .....	29
Tableau N° 2 : <i>seuil des éléments d'alliage</i> .....	34
Tableau N° 3: <i>Facteur pour les aciers faiblement alliés</i> .....	42
Tableau N°4 : <i>Les points caractéristiques du diagramme fer-carbone stable et métastable</i> .....	53
Tableau N°5 : <i>les aciers et fontes suivant la teneur en carbone dans le diagramme fer-cémentite</i> ....	54
Tableau N°6 : <i>différentes formes de liaisons la cémentite</i> .....	57
Tableau N° 7: <i>Dimensions des différentes éprouvettes de résilience</i> .....	70
Tableau N°8 : <i>symboles de désignation des aciers selon la résilience et température d'essais</i> .....	71
Tableau N°9 : <i>comparaison entre différentes normes pour l'acier ST52-3</i> .....	72
Tableau N°10: <i>composition chimique de l'acier ST60-2</i> .....	72
Tableau N°11 : <i>caractéristiques mécanique moyennes</i> .....	72
Tableau N°12 : <i>comparaison entre différentes normes pour l'acier ST52-3</i> .....	73
Tableau N°13 : <i>composition chimique de l'acier St52-3</i> .....	73
Tableau N°14 : <i>caractéristiques mécanique moyennes de l'acier ST52-3</i> .....	73
Tableau N°15 : <i>compositions chimiques des aciers ST60-2 et ST52-3</i> .....	74
Tableau N°16 : <i>la composition chimique des aciers St60-2 et St59-3</i> .....	74
Tableau N°17 : <i>dimension réel des éprouvettes de traction</i> .....	83
Tableau N°18 : <i>résultat de l'acier St60-2 (E335)</i> .....	88
Tableau N°19 : <i>résultat de l'acier St52-3 (S355-j2)</i> .....	91
Tableau N°20 : <i>dimensions de l'éprouvette de résilience (norme NF A 03-161)</i> .....	94
Tableau N°21 : <i>Résultat de l'essai de résilience pour les aciers St60-2 et St52-3</i> .....	96
Tableau N°22 : <i>Les résultats de l'essai de dureté Brinell pour St52-3 et St62-2</i> .....	98

## Présentation de l'entreprise

L'entreprise **électro-industries (EI)** située à 30 Km à l'est de TIZI OUZOU, est issue de la première société nationale **SONELEC** née en 1976. La première restructuration de **SONELEC** qui a donné naissance à l'**ENEL** (Entreprise Nationale des industries Electrotechniques) le 01/01/1983 par décret présidentiel N° 83/18 puis la restructuration de l'**ENEL** en 1999 en un certain nombre d'EPE /SPA parmi lesquelles figure **ELECTRO-INDUSTRIE**.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemand, en l'occurrence **SIEMENS** pour le produit et **FRITZ WERNER** pour l'engineering et la construction. L'infrastructure est réalisée par les entreprises algériennes **ECOTEC**, **COSIDER** et **BATIMETAL**.

### Production

L'entreprise **ELECTRO-INDUSTRIE** est spécialisée essentiellement dans la fabrication et la commercialisation des transformateurs de distribution, moteurs électriques et groupes électrogènes, réalisés et contrôlés suivant la normes DIN et conformes aux norme internationale et recommandations européennes (CEI), ces produits sont destinés essentiellement au marché national, elle détient 70% du marché des transformateurs de distributions.

- ✓ **Groupes électrogènes** : De type Skid-Capoté, Capoté insonorisé, de démarrage manuel ou automatique, de puissance 17.5 à 200 KVA, avec une tension de service de 230/ 400 V.
- ✓ **Moteurs électriques**: du type asynchrone triphasé à une ou deux vitesses, et monophasé à condensateurs. De construction fermée, à carcasse ventilée.
- ✓ **Transformateurs** : destinés à la distribution de l'électricité de type MT/BT
  - Transformateurs hermétiques à remplissage intégral «30, 100, 160 et 250 KVA ».
  - Transformateurs respirant gamme émergés dans l'huile « 10 et 30 KVA»
  - Prestations techniques : pièces et accessoires par injection d'aluminium.

# Introduction générale

Depuis son origine, l'homme découvre, cherche, et par conséquence développe son mode de vie. La découverte de l'électricité a donné un saut gigantesque aux progrès humains, la mise en évidence de sa circulation, par le physicien et chimiste danois **ØRESLED HANS** en **1819**, a donné accès à la découverte du courant induit, ainsi à la réalisation du premier moteur électromagnétique, par l'anglais **MICHAEL FARADAY** en **1831**.

Le domaine de la construction des moteurs électrique est à la fois vaste et complexe, vu le nombre de paramètres mécaniques et électriques qui interviennent dans les calculs et la conception de ces différents éléments.

Les moteurs électriques jouent un rôle indispensable dans la vie humaine et industriel. Le développement et l'amélioration des moteurs électriques, est le souci de tout chercheur dans le domaine, c'est aussi le cas de l'entreprise nationale **ELECTRO INDUSTRIE**.

L'entreprise **ELECTRO INDUSTRIE**, nous a confié la caractérisation de deux nuances d'aciers **St60-2** et **St52-3**, destinées à l'usage des arbres des moteurs électrique asynchrone qu'elle fabrique. Pour la substitution de l'acier **St60-2** par **St52-3**.

Pour mieux mener notre projet, on a partagé le travail en deux parties. La première partie concerne, l'étude bibliographique, composé de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, afin de mieux situer notre recherche, on donne une classification des machines électriques et leurs définitions, on termine avec le moteur asynchrone et ces caractéristiques mécaniques et électriques.

Le deuxième chapitre concerne les aciers et ces différents procédés de fabrication, le laminage, puis, on finit par la classification des aciers.

Le troisième chapitre intitulé la métallurgie, traite, des structures et les différentes phases des aciers. On achève ce chapitre par l'influence des éléments d'alliage.

Dans le quatrième chapitre, vu le grand intérêt des propriétés mécaniques pour le choix du matériau, on donne les différents essais mécanique tel que : l'essai de traction, la dureté pour finir avec l'essai de résilience.

Le cinquième est le dernier chapitre, on identifie nos aciers **St60-2** et **St52-3** selon différentes normes, allemande **DIN**, américaine **ASTM** et européennes EN **100027-1/2**.

Dans la deuxième partie de notre projet, après les calculs mécaniques effectué sur le bout d'arbre, on a donné les résultats des essais que nous avons effectué, premièrement mécaniques puis métallurgiques et enfin chimiques.

On couronne notre étude par une conclusion générale qui donne une synthèse des principaux résultats obtenus puis les perspectives.



Partie théorique



Chapitre I

## Machines électriques

### I. Introduction [1, 2]

Une machine électrique est un dispositif électromécanique basé sur l'électromagnétisme, permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en énergie mécanique. Ce processus est réversible, il peut servir à produire de l'électricité. En dehors des machines électriques fonctionnant grâce à l'électromagnétisme, il existe aussi des machines électrostatiques.

### II. Classification des machines électrique [1]

Les machines électriques peuvent être classées en deux catégories :

- **Machines statiques (transformateur):** qui transforment l'énergie électrique en énergie électrique.
- **Machines tournantes :** on distingue deux types
  - ✓ **Générateurs :** qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
  - ✓ **Moteurs :** qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

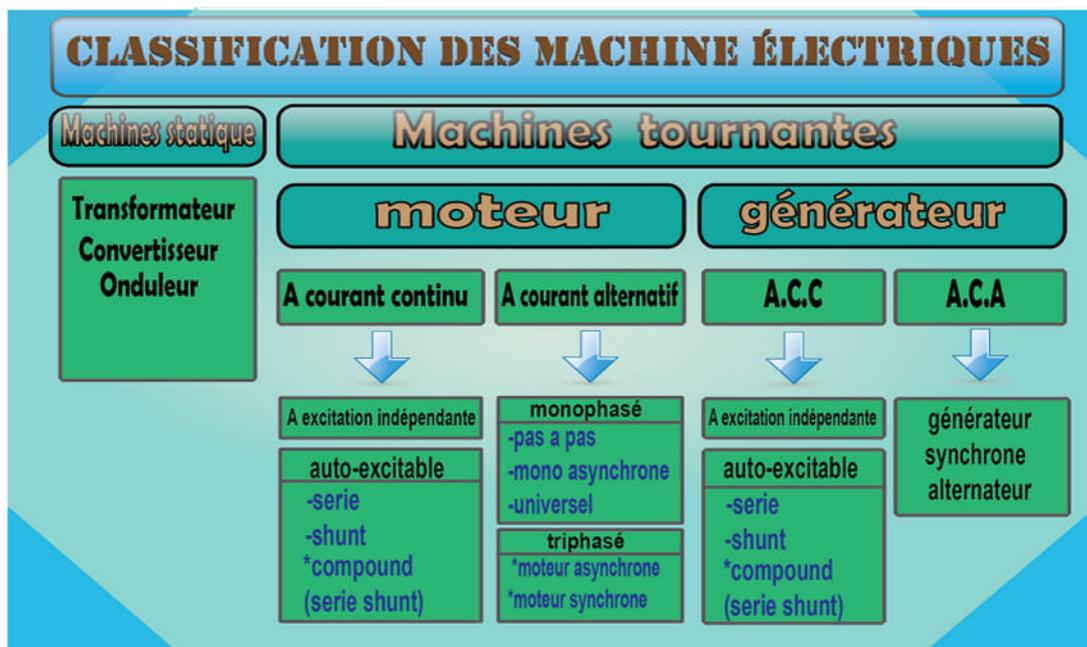


Figure 1 : classification des machines électriques [2]

## III. Les différents types de machines électriques

### III-1. Machines statiques (transformateur) [3, 4]

Un **transformateur électrique** est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique, à un récepteur donné. Ce système de conversion permet de modifier la tension et l'intensité du courant. Il existe deux types de transformateurs : les statiques et les commutatrices. Les premiers transfèrent l'énergie du primaire au secondaire via un circuit magnétique, tandis que les deuxièmes transmettent l'énergie mécaniquement entre un moteur électrique et une génératrice. La catégorie la plus importante est le **transformateur** qui modifie la grandeur des courants et tensions alternatifs.

Les autres machines transformatrices (**changeurs de fréquence, commutatrices**) transformant le courant alternatif en continu ou inversement, qui sont supplantées aujourd'hui par des systèmes statiques utilisant l'électronique de puissance qui concerne le traitement de l'énergie électrique.

Le transformateur appelé aussi convertisseur statique, permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut-être soit augmentée ou abaissée, selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique. Grâce à lui, l'énergie électrique peut-être transportée sur une grande distance de façon économique et distribuer dans les usines et les maisons.

Un transformateur est un circuit magnétique fait de tôles magnétiques, les tôles empilées ont la forme de **E** et de **I** sur lequel on a placé des bobines de fil de cuivre isolé par du verni.

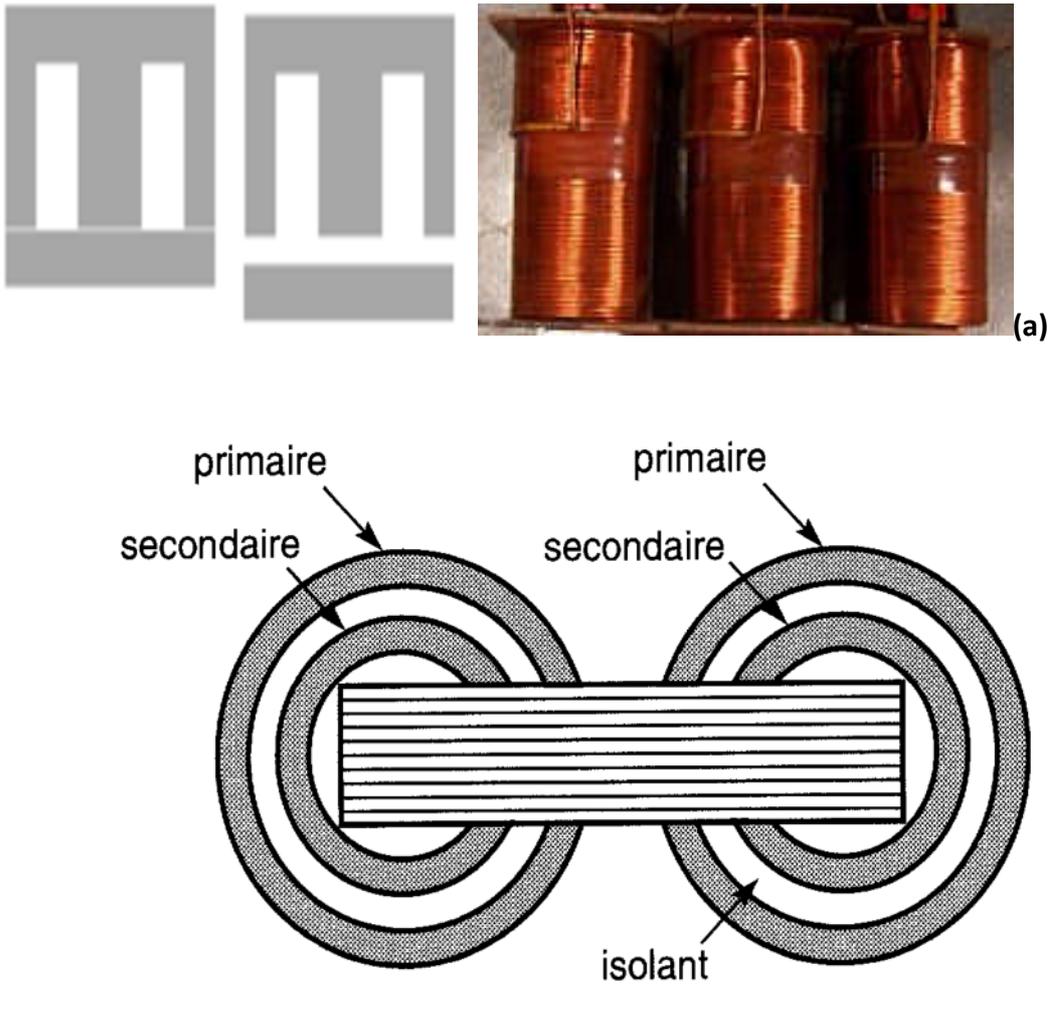


Figure 2 : (a) : Tôles de forme E et I d'un transformateur  
(b) : Tôles avec des enroulements primaire et secondaire d'un transformateur [3]

La bobine où arrive le courant est appelée "enroulement primaire", celle qui produit une autre tension est appelée "secondaire". Certains transformateurs possèdent plusieurs enroulements secondaires pour fournir plusieurs tensions à la sortie.

### III-2. Machines tournantes [5]

Une machine tournante est un dispositif électromécanique basé sur, l'électromagnétisme permettant la conversion de l'énergie électrique, en énergie mécanique ou inversement, elles produisent une énergie correspondant au produit d'un couple par un déplacement angulaire (rotation).

Les machines tournantes peuvent-être classées, en deux catégories :

- 1) **Générateurs** : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- 2) **Moteurs** : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

## III-2-1. Constitution d'une machine tournante

- de point de vue électromagnétique : une machine électrique comporte un **circuit magnétique** et souvent **deux circuits électriques**.
- de point de vue mécanique : un générateur ou un moteur est constitué par une partie fixe appelée **stator (inducteur)** et une partie mobile appelée **rotor (induit)**, qui tourne à l'intérieur du stator. Entre ces deux parties est aménagé un petit intervalle d'air appelés **entrefer**.

## III-2-2. Les différents types de machines tournantes [3, 5]

### III-2-2-1. Générateurs électrique

**Les machines génératrices** transforment l'énergie mécanique, en énergie électrique. Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique. Selon que le courant électrique induit est continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée **dynamo** ou **alternateur**.

Dans la réalité, ces générateurs sont raccordés mécaniquement. Par exemple:

- à des turbines à eau pour les centrales hydroélectriques ou marémotrice ;
- à des turbines à vapeur pour les centrales thermiques : nucléaire, gaz, charbon, déchets... ;
- par une éolienne pour le vent ;
- sur les bateaux à des gros moteurs diesel ;

#### III.2.2.1.1. Constitution et fonctionnement

- L'inducteur : Un aimant en forme d'anneau de fer.
- L'induit : Au milieu, on place un fil de cuivre qui est un bon conducteur d'électricité, isolé et bobiné sur un anneau de métal.

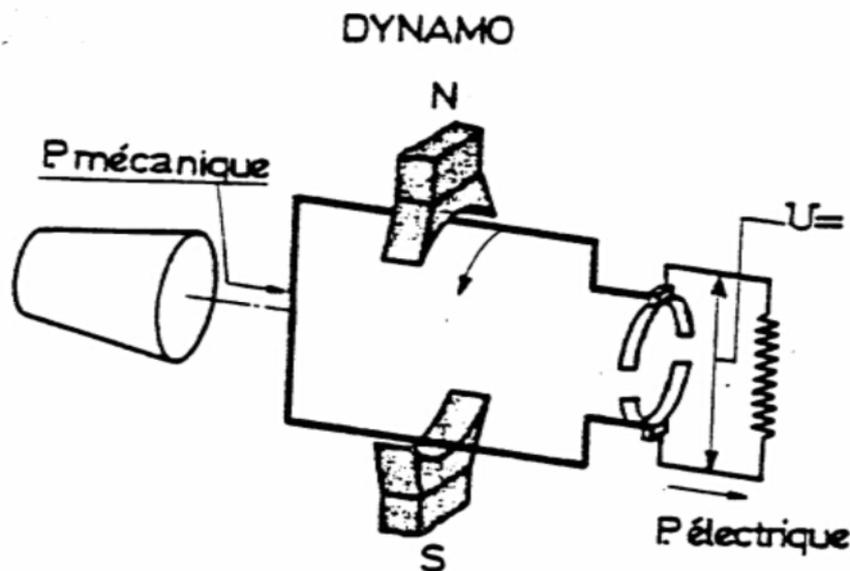
L'inducteur génère un champ magnétique entre ses deux pôles, nord et sud. On fait tourner l'induit, un déplacement d'électrons d'atome en atome se passe provoquer par le magnétisme reçu de l'aimant et l'électricité est née.

## III.2.2.1.2. la dynamo [2,3]

Le plus primitif des générateurs électriques est d'un fonctionnement simple, mais efficace. Il est constitué simplement d'un aimant et d'un long fil de cuivre enroulé sur un support, soit une bobine.

Ce générateur, basé sur l'expérience de **Faraday** et créé par **Gramme**, est de fait à la base de toutes les génératrices mécaniques d'électricité.

Dans celle-ci, les inducteurs sont fixes et les conducteurs induits sont mobiles. Elle ne produit que du courant continu.

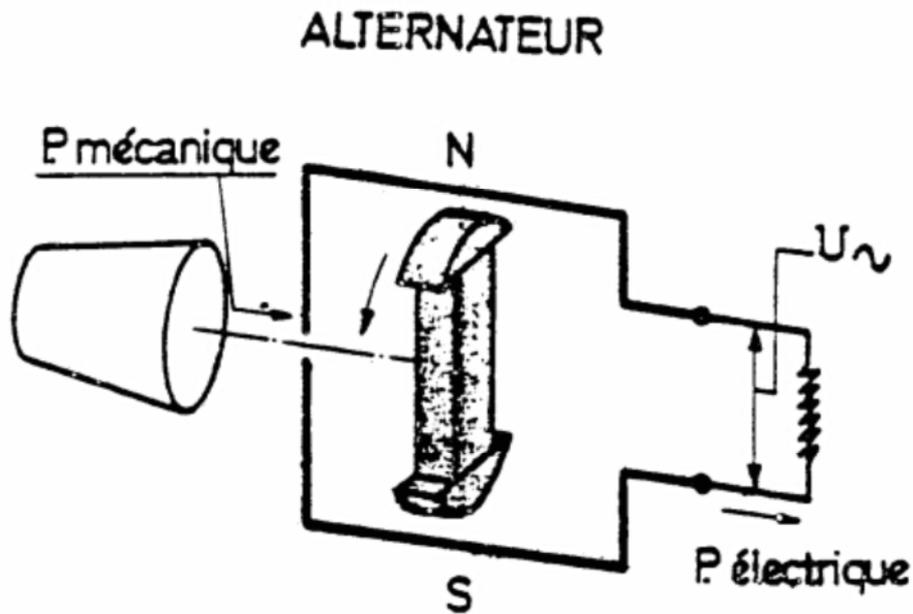


**Figure 3 : composantes de la dynamo rotation du circuit électrique dans un champ magnétique fixe. [3]**

## III.2.2.1.3. L'alternateur

Ce générateur a le même principe de fonctionnement que la dynamo. Dans la plupart des cas, les inducteurs sont mobiles sur le rotor et les induits sont fixes sur le stator. Ils sont liés directement par leur arbre, à la source mécanique qui les alimente et donc tournent au même rythme.

Ils sont utilisés pour produire le courant dans les centrales électriques et groupes électrogènes. Il ne produit que du courant alternatif.



*Figure 4 : rotation du champ magnétique, le circuit étant fixe [3]*

### III.2.2.2. moteurs : [3, 5, 6]

Un moteur électrique sert à transformer l'énergie électrique, en énergie mécanique (c'est-à-dire en mouvement). La plupart des moteurs décrits ci-dessous tournent autour d'un axe, mais il existe des moteurs spéciaux qui se déplacent de façon linéaire. Tous les moteurs fonctionnent soit en courant alternatif, soit en courant continu, mais quelques-uns peuvent fonctionner sur les deux modes.

#### 1. Moteur Électrique à Courant Continu

Les moteurs électriques à courant continu, comme toutes les machines tournantes sont constitués d'un stator et d'un rotor. Le stator crée une magnétisation longitudinale fixe à l'aide d'enroulements (inducteur) ou d'aimants permanents. Le rotor est constitué d'un ensemble de bobines reliées à un collecteur rotatif. Le collecteur rotatif permet de maintenir fixe, la direction transversale de magnétisation du rotor lorsque celui-ci tourne. Grâce à ce dispositif, les magnétisations, rotorique et statorique, sont toujours décalées de façon optimale. Ce décalage provoque un couple selon la loi du flux maximum (un pôle nord attire un pôle sud), provoquant ainsi la rotation du rotor.

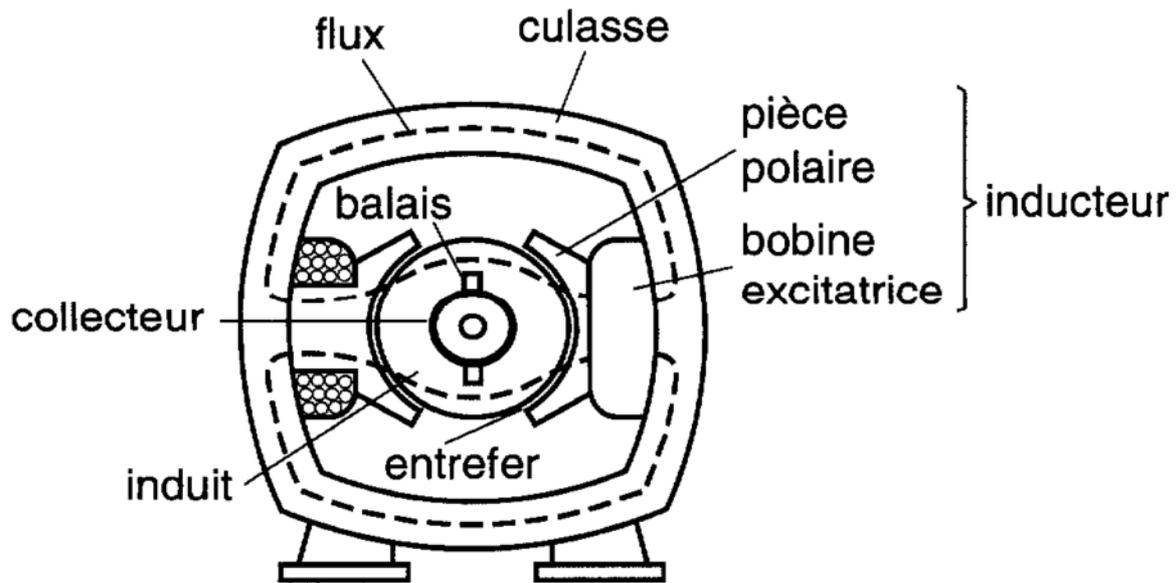


Figure 5 : partie principale d'un moteur à courant continu [2]

Ce genre de moteurs électriques est utilisé sur de petits outils tels que des appareils électroportatifs sans fil.

L'**avantage** du moteur à courant continu est de pouvoir facilement régler la vitesse de *rotation* de celui-ci. Le moteur à courant continu est alimenté par des batteries ou des piles.

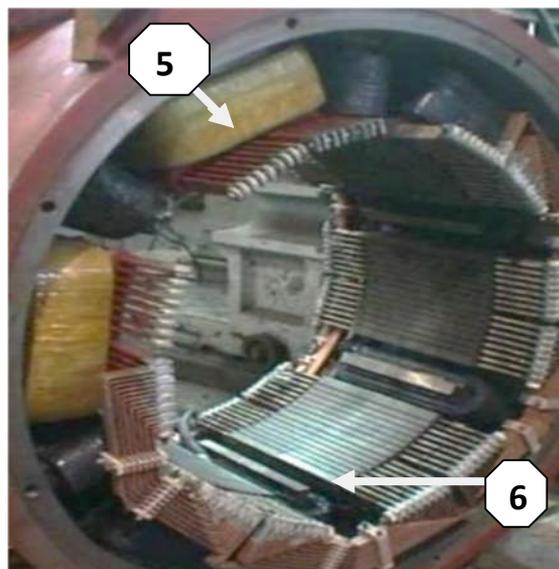
L'**inconvénient** de la machine à courant continu réside dans l'ensemble balais « **charbons** » et le collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie. Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs lorsque le rotor est bobiné, la force centrifuge finissant par casser les liens assurant la tenue des ensembles de spires (le frettage).

Ces **inconvénients** ont été partiellement résolus par des **moteurs disques** ou des **moteurs cloches** qui ne possèdent aucun *fer au rotor*, mais qui par contre possèdent toujours *des balais*. Par la suite, les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du **moteur brushless**, aussi dénommé « **moteur à courant continu sans balais** », ou **moteur sans balais**.

## 1.2) Constitution de la machine à courant continu [3]

Cette machine est constituée :

- d'une partie fixe le **stator ou inducteur (1)** et une partie tournante, le **rotor ou induit (2)** séparées par un **entrefer (3)**. Le stator et le rotor sont constitués par un assemblage de tôles afin de limiter les pertes par courants de Foucault et par hystérésis ;
- d'un circuit inducteur, qui est la source de champ magnétique. Il peut être formé soit par des **aimants de structure ferritique (4)**, soit par des **bobines inductrices (5)** en série (électroaimants). Les bobines sont placées autour de **noyaux polaires(6)**. La machine est dite bipolaire, si elle ne comporte qu'un pôle Nord et un pôle Sud ;
- d'un circuit induit au rotor. Il est formé de **conducteurs logés dans des encoches (7)** ;
- d'un **collecteur (8)** qui, associé aux **balais (9)**, permet de relier le circuit électrique rotorique de l'induit, à un circuit électrique extérieur, à la machine. Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement, les unes des autres, réunies aux conducteurs de l'induit en certains points. Les balais, portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur, et permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine qui est fixe.



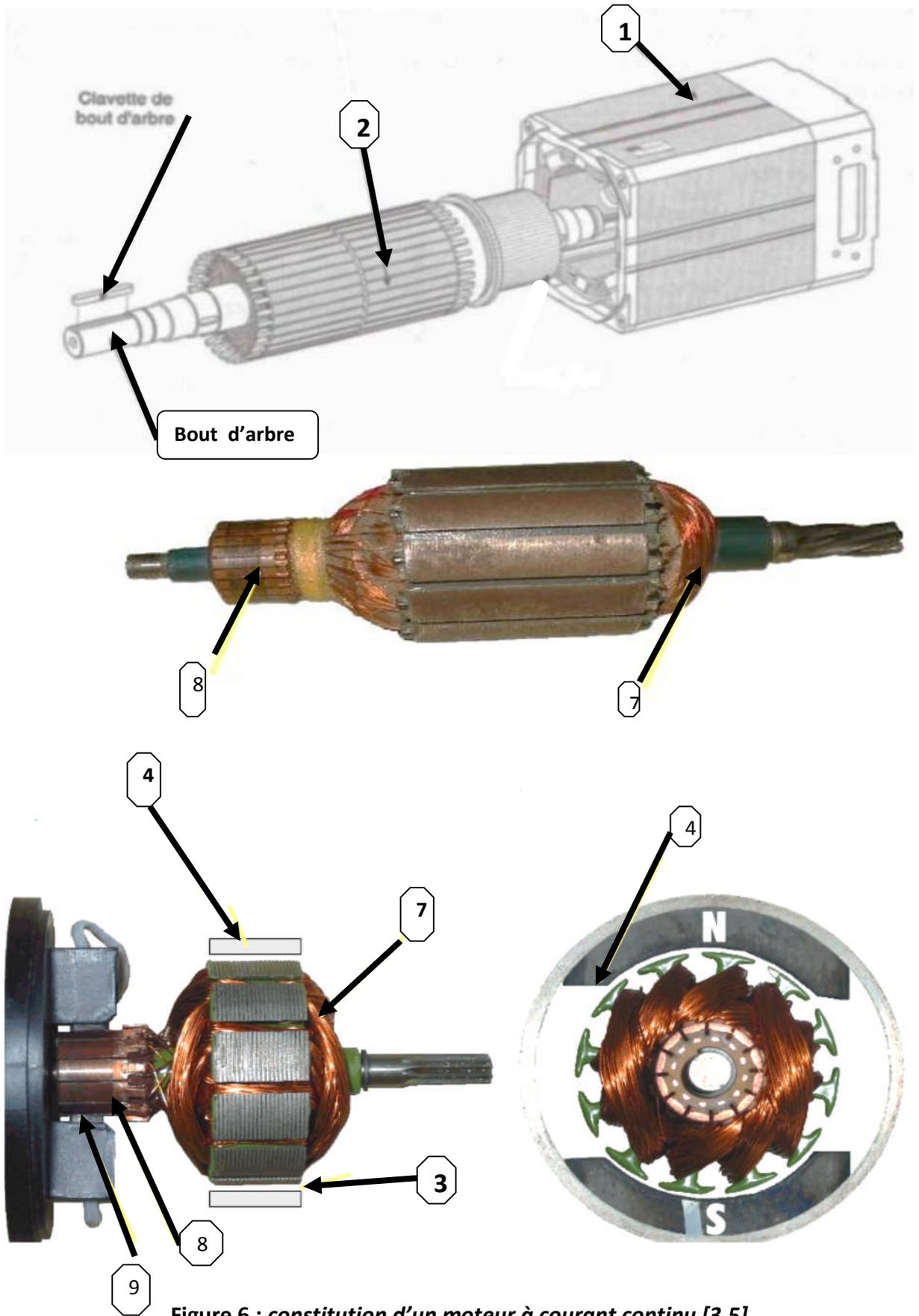


Figure 6 : constitution d'un moteur à courant continu [3,5]

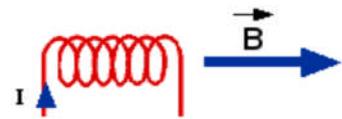
## 2. Moteurs à courant alternatif [3, 5]

Ce genre de moteurs est alimenté par un courant alternatif (monophasé ou triphasé) d'où vient le nom, les **moteurs à courant alternatif**, leur principe réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternative.

On distingue deux types :

- ✓ **Moteur Électrique synchrone.**
- ✓ **Moteur Électrique Asynchrone.**

La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique **B**. Ce champ est dans l'axe de la bobine,

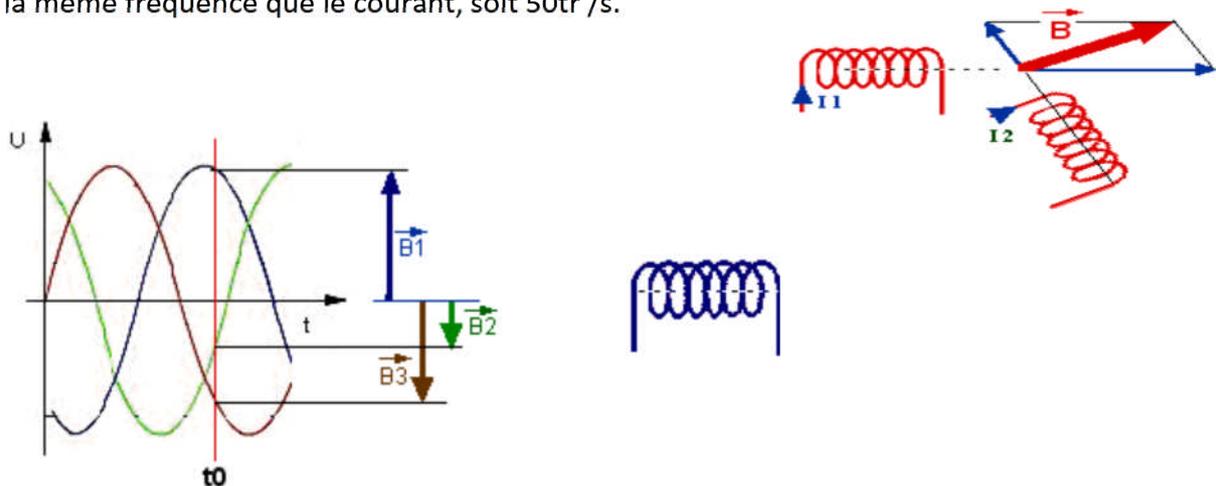


sa direction et son intensité sont en fonction du courant **I**. C'est une grandeur vectorielle.

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction, à la même fréquence que le courant.

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres.

Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à  $120^\circ$  les une des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé. Les trois champs sont diphasés. Le champ résultant tourne à la même fréquence que le courant, soit  $50tr/s$ .



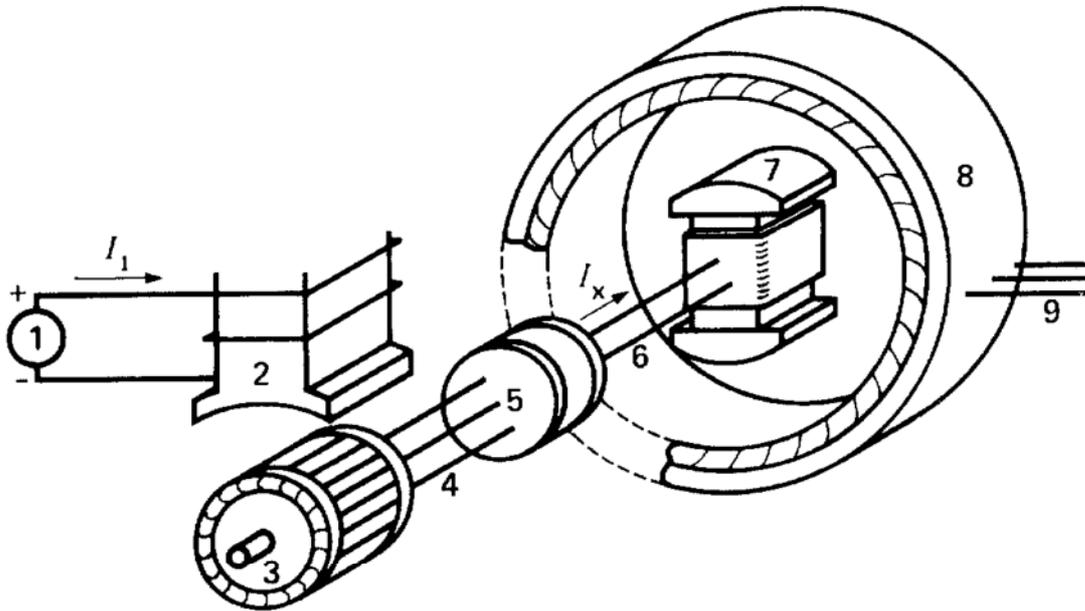
**Figure 7 : Les trois enroulements statoriques créent un champ magnétique tournant (fréquence de synchronisme) [2]**

### 2-1) Moteur Électrique synchrone [3] [7]

Toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé “machine synchrone”. Comme le nom l’indique, le rotor de ce moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator, c’est à dire à la même vitesse que ce champ. Cette vitesse est donc liée à la fréquence de la source et comme cette fréquence est constante, implique que la vitesse du moteur est constante. Elle ne varie ni avec la charge ni avec la tension de la source. Pour l’obtention d’un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit-être généré soit par des aimants, soit par un circuit d’excitation.

Les grandeurs des machines varient de quelques Watts pour les petits moteurs, à plusieurs centaines de mégawatts, pour les alternateurs de grande puissance. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable. Deux parties sont à distinguer, le stator est constitué d’enroulements triphasés qui par interaction avec le champ magnétique rotorique crée un couple électromécanique, le rotor quant à lui est responsable de générer le champ d’induction. Il existe trois sortes de rotor, les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants, et finalement les rotors à aimant. Il est souvent appelé **roue polaire**, est alimenté par une source continue (excitatrice) dans le cas du rotor bobinées.

Le **moteur synchrone** existe donc en deux versions soit bobinées pour les fortes puissances et à aimant pour les entraînements à hautes performances, ils sont généralement des moteurs **triphases**.



- 1 - source de commande à c.c.
- 2 - pôles à c.c. stationnaires
- 3 - alternateur (excitatrice)
- 4 - ligne triphasée
- 5 - redresseur à diodes
- 6 - ligne à c.c.
- 7 - rotor du moteur synchrone
- 8 - stator du moteur synchrone
- 9 - ligne d'alimentation triphasée

Figure 8 : schéma montrant le principe de fonctionnement d'une excitatrice [3]

Deux modes de fonctionnement sont à distinguer pour les machines synchrones. En mode génératrice, elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor. En mode moteur, elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminée, par la fréquence du courant. Le moteur synchrone est souvent utilisé comme **génératrice**.

### 2-2) Moteur Électrique Asynchrone [5] [7]

Le **moteur électrique asynchrone** est le plus répandu des moteurs alternatif, connu également sous le terme " anglo-saxon " de **moteur à induction**.

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces moteurs n'est pas forcément proportionnelle, à la fréquence des courants, qui la traversent. Le moteur asynchrone est utilisé quand on dispose d'une source d'alimentation alternative triphasée ou monophasée. Il a la particularité d'être robuste et simple. Il est plus utilisé, car sa gamme de puissance peut aller de quelques centaines de Watts, à plusieurs dizaine de Kilowatts. Au-dessous de 1 KW, pour les usages domestiques (compresseurs de réfrigérateurs, de congélateurs, moteurs de machines à laver, pompes de chauffage central,...), on parle des moteurs asynchrones monophasés. Par contre, La gamme des puissances des moteurs asynchrones triphasés s'étend de 1 KW, à une dizaine de MW. Ce genre de moteurs est utilisé sur des machines-outils, monte-charges, tapis-roulants...etc. C'est le moteur industriel par excellence, qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu. Les courants qui circulent dans le stator constituent l'unique source externe de champ magnétique. Le rotor n'a pas à être relié à une source d'énergie électrique. Il existe bien des courants rotoriques qui participent, eux aussi, à la création du champ magnétique, mais ce sont des **courants induits**. C'est de là, que vient le nom, "**moteur à induction**".

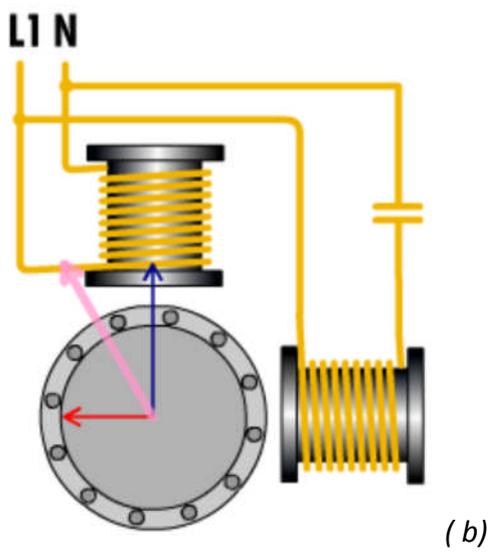
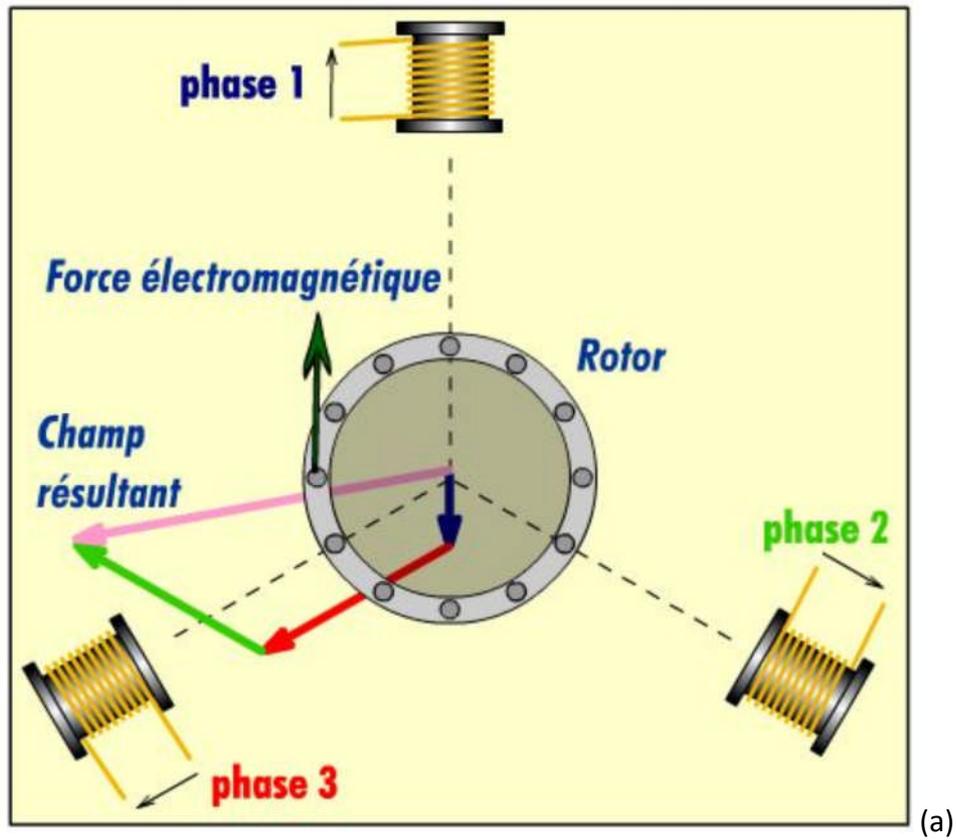


Figure 9: (a) : bobine de moteur asynchrone triphasé [7]  
(b) : bobine de moteur asynchrone monophasé [5]

## 1) Constitution [3]

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et d'une partie mobile appelée rotor, d'une autre part.

La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier.

Sur chaque moteur est fixé, sur le côté opposé à l'accouplement, un capot en tôle d'acier ou alliage d'aluminium ou polyester thermodurcissable armé de fibres de verres, à l'intérieur duquel se trouve le ventilateur monté sur l'arbre.

Aspiré à travers le grillage du capot par le ventilateur, à ailettes droites permettant un fonctionnement correct dans les deux sens de rotation, l'air de refroidissement est pulsé le long des ailettes de la carcasse.

Les circuits magnétiques sont fabriqués avec de la tôle magnétique au silicium, à faibles pertes et isolée en double faces, elle est découpée à la presse, encochée, puis simplifiée.

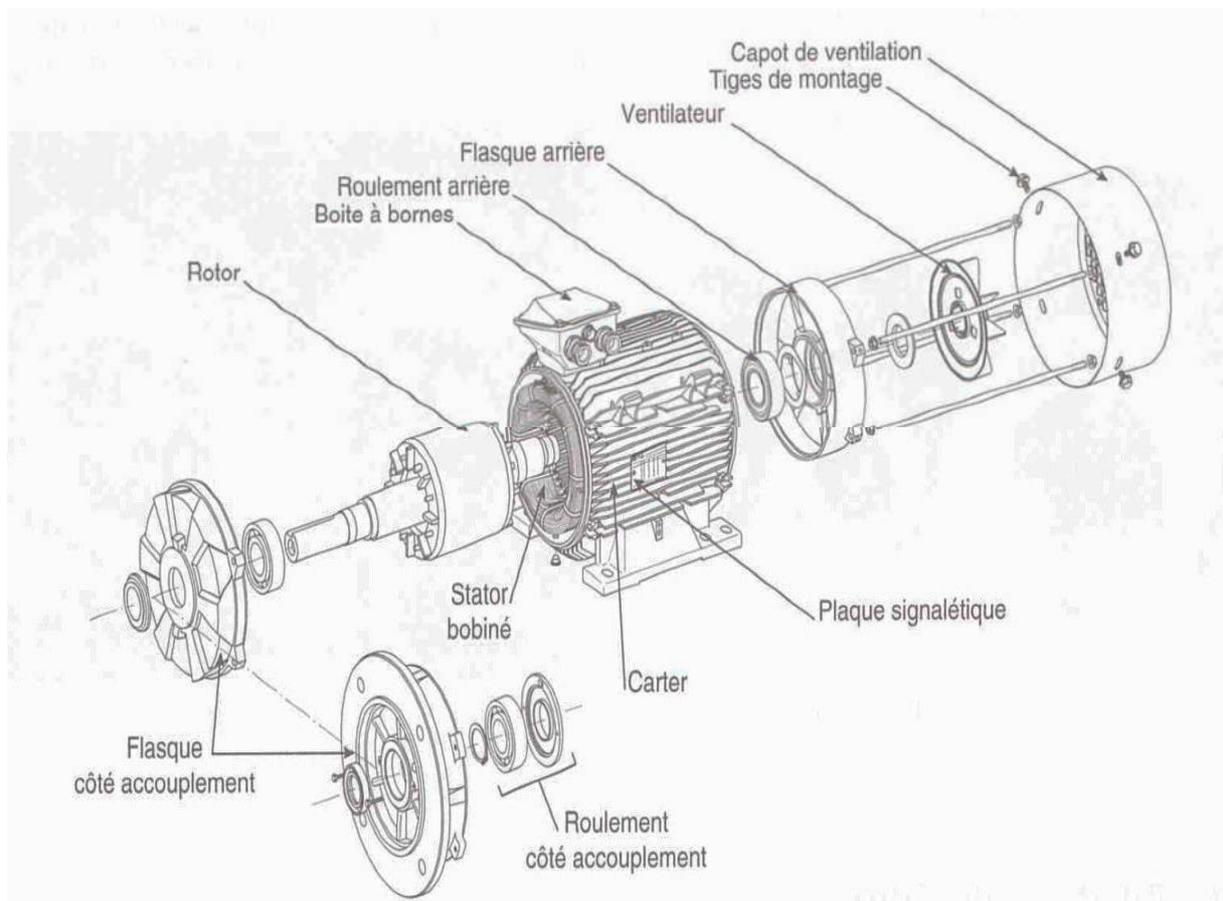


Figure 10 : vue éclatée d'un moteur asynchrone. [3]

### a) Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres, à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriquée, ondulée ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

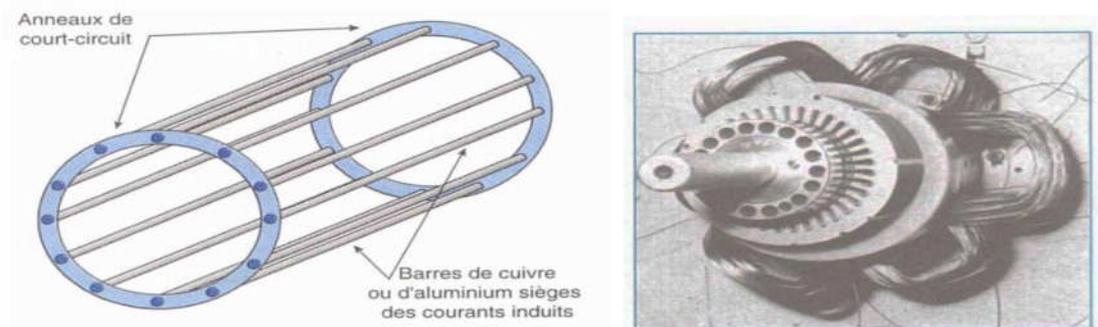


*Figure 11 : Stator d'une machine asynchrone basse tension [2]*

### b) Le rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.



**Figure 12 : (a) rotor à cage d'écureuil [3]**

**(b) rotor bobiné [5]**

### 1) Fonctionnement [3, 7]

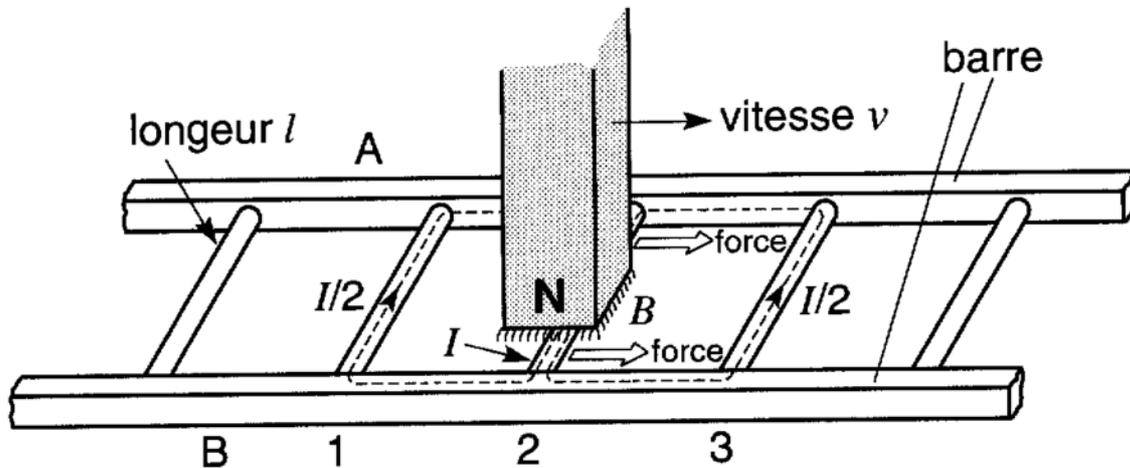


Figure 13 : Déplacement du champ magnétique [3]

Comme chaque conducteur est court-circuité, un courant  $i$  se met à circuler dans le conducteur qui est momentanément en dessous du champ magnétique (ou de l'aimant), puisque ce courant traverse le champ magnétique, d'après la loi de Laplace, une force mécanique est appliquée sur ce conducteur. Cette force entraîne le conducteur dans le sens de déplacement du champ magnétique. Si ces conducteurs sont mobiles, ces derniers accélèrent et à mesure qu'ils atteignent de la vitesse  $v$ , la vitesse à laquelle le champ magnétique est coupé par ces conducteurs ralentit et la tension induite diminue, de même que le courant  $i$ . Cet effet de la loi de Lenz a pour conséquence de diminuer la force de la place. Ainsi si les conducteurs se déplaçaient à la même vitesse que le champ magnétique, la tension induite, le courant  $i$  et la force s'annuleraient. La vitesse du rotor est donc légèrement inférieure à la vitesse du champ magnétique. [7]

Comme il est cité ci dessus Le rotor d'un moteur à induction ne tourne pas à la vitesse synchrone, c'est-à-dire à la vitesse du champ magnétique du stator, mais il existe un léger décalage temporel entre les deux vitesses. Ce décalage, nommé "glissement", s'exprime en pourcentage de la vitesse synchrone. Le glissement du moteur est le résultat de l'interaction entre le champ magnétique du stator et le champ magnétique créé par les courants induits circulant dans le rotor. Les barres du rotor coupent les lignes de force magnétiques et

## Chapitre I : Machines électriques

produisent ainsi un couple moteur. Quand le moteur ralentit (c.-à-d. lorsque le glissement augmente) sous l'action de la charge ajoutée, le couple engendré augmente.

### 2) La force du courant et la tension

$$F = I L B \quad \text{et} \quad E = B L V$$

**F** : Force (Newtons)

**E** : tension du courant (Volts)

**I** : Intensité du courant (Ampères)

**L** : Longueur (mètres)

**B** : Flux magnétique (webers/m<sup>2</sup>)

**V** : vitesse de déplacement de l'aimant [m/s]

### 3) Le glissement [3]

$$\text{glissement} = \frac{\text{vitesse synchrone} - \text{vitesse de fonctionnement}}{\text{vitesse synchrone}} \times 100$$

Autrement dit, Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega$  plus petite que la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  à cause du glissement  $g$ . Ce glissement  $g$  va dépendre de la charge.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad [\%]$$

- $n_s$  : vitesse de rotation du synchronisme, du champ tournant (tr/s).
- $n$  : vitesse de rotation du rotor (tr/s).

$$\Omega_s = 2\pi.n_s \quad [\text{rad/s}]$$

et

$$\Omega = 2\pi.n \quad [\text{rad/s}]$$

### 4) La vitesse synchrone $n_s$ [3]

La vitesse synchrone est la vitesse de rotation du champ tournant dépend du nombre de pôles magnétiques dans le stator et La fréquence (celle de l'alimentation).

$$n_s = \frac{120f}{p} = \Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad [\text{rad/s}]$$

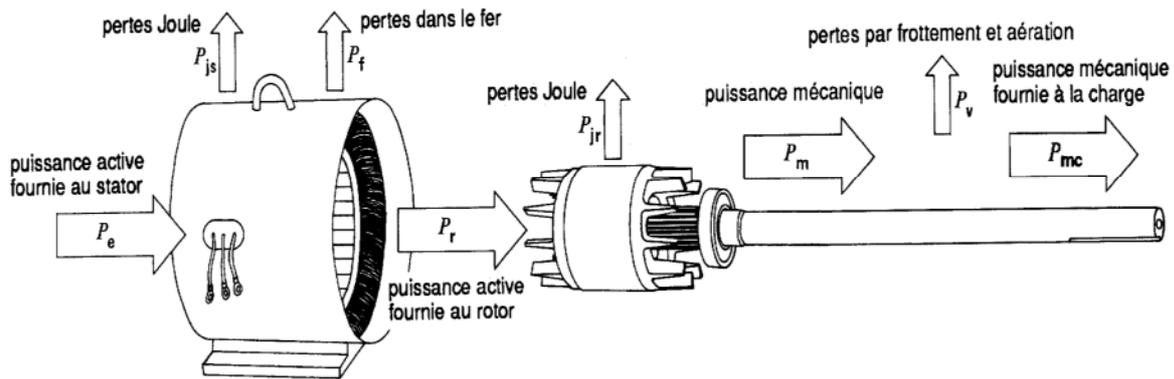
- $n_s$  : La vitesse synchrone en (tr/s).
- $\omega$  : Pulsation des courants alternatifs en rad/s  $\omega=2\pi f$
- $f$  : La fréquence de l'alimentation du moteur.
- $P$ : nombre de pôles magnétique, lorsque on donne le nombre de paire de pôles  $p'$

On divise la formule par 2 car  $p = 2p'$ . Ce qui est implique  $n_s = \frac{60f}{p}$

### 5) Bilans énergétique [3]

Les tensions et les courants d'un moteur asynchrone permettent de comprendre son fonctionnement détaillé. Cependant, on comprend mieux la transformation de l'énergie mécanique, en suivant le cheminement de la puissance active qu'il absorbe. Ainsi, lorsqu'on alimente un moteur asynchrone, une partie  $P_{js}$  de la puissance active  $P_e$  qu'il reçoit et dissipé par effet joule dans les enroulements du stator, et une autre partie  $P_f$  est perdue dans le fer. Le reste de la puissance  $P_r$  est transporté au rotor, par induction, à travers l'entrefer.

Une troisième tranche  $P_{jr}$  se dissipe par effet joule dans les enroulements du rotor, et le reste  $P_m$  est enfin disponible sous forme de puissance mécanique. Si l'on en soustrait les pertes par ventilation et friction  $P_v$ , on obtient la puissance mécanique  $P_{mc}$  fournie à la charge. Dans ce qui suit les pertes  $P_v$  sont assimilées aux pertes  $P_f$  dans le fer, donc  $P_{mc} = P_m$



**Figure 14 : cheminement de la puissance active dans un moteur asynchrone. [3]**

### 6-1) Perte par effet joules dans le rotor et le stator

Les pertes dans le stator sont dues à l'effet d'échauffement (effet Joules) du courant  $I$  qui circule dans la résistance  $R$  des enroulements du stator. Elles représentent quelque 35 % des pertes totales

✓  $P_{jr} = 3 R_r \cdot I_r^2 = g \times P_r$

$P_{jr}$  : pertes par effet joules dans le rotor [w].

$P_r$  : puissance transmise au rotor [w].

$g$  : glissement.

$R_r$  : résistance du rotor par phase [ $\Omega$ ].

$I_r$  : courant qui traverse l'enroulement rotor [A].

✓  $P_{js} = 3 R_s \cdot I_s^2$

$P_{js}$  : pertes par effet joules dans le stator [w].

$R_s$  : résistance du stator par phase [ $\Omega$ ].

$I_s$  : courant qui traverse l'enroulement du stator [A].

### 6-2) Pertes fer dans le rotor et le stator : [3]

Les pertes fer rotoriques et statorique sont négligeables pour la premier, constantes pour la deuxième, puisqu'elles dépendent de la fréquence qui est faible et la tension. Les pertes dans le fer comprennent, les pertes par hystérésis (énergie nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique) ainsi que les pertes par courants de Foucault dans le circuit magnétique du stator (courants de circulation induits par magnétisme). Les pertes dans le fer représentent environ 25 % des pertes totales.

### 6-3) Couple du moteur :

$$T = \frac{9,55 P_r}{n_s} = \frac{9,55 P_m}{n}$$

**T** : couple du moteur, en (newton-mètre [N.m]).

**P<sub>r</sub>** : Puissance transmise au rotor  $P_r = \frac{n_s T}{9,55}$  en watts [w].

**n<sub>s</sub>** : vitesse synchrone, en tours par minute [trs /min].

**P<sub>m</sub>** : puissance mécanique fournie au moteur en [w].

**n** : vitesse du rotor [trs/s].

**9,55** : facteur de tenant compte des unités [valeur exacte 30/π].

### 6-4) Puissance mécanique [3]

$$P_m = \frac{nT}{9,55} = P_r - P_{jr}$$

**$P_m$**  : puissance mécanique fournie au moteur en [w].

**$n$**  : vitesse du rotor tr/s.

**$T$**  : couple du moteur en newton-mètre [N.m].

**$P_r$**  : puissance transmise au rotor [w].

**$P_{jr}$**  : pertes joule dans le rotor.

**$g$**  : glissement.

**9,55** : facteur de tenant compte des unités [valeur exacte  $30/\pi$ ].

### 6-5) Rendement [3]

Le rendement d'un moteur est le rapport de la puissance mécanique qu'il fournit sur la puissance électrique qu'il absorbe, et, s'exprime généralement en pourcentage.

$$\eta = \frac{\text{puissance mécanique fournie}}{\text{puissance électrique absorbée}} = \frac{P_m}{P_e}$$

**$P_m$**  : puissance mécanique fournie, en [w].

**$P_e$**  : puissance électrique absorbée, en [w].



Chapitre II

### I. Introduction [8, 9]

Les aciers sont les matériaux les plus répandus dans l'industrie et la construction mécanique d'une manière générale. L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté, Il peut encore contenir d'autres éléments incorporés volontairement ou non, mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone à l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Si l'on ajoute plus de 5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié. L'acier, c'est un produit intermédiaire entre le fer et la fonte.

### II. Constitution de l'acier [8, 10, 11]

L'acier est élaboré pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux. Pour résister à ces sollicitations, des éléments chimiques peuvent être ajoutés à sa composition en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (**Mn**), le chrome (**Cr**), le nickel (**Ni**), le molybdène (**Mo**).

Les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en 3 catégories :

- ✓ **Les impuretés**, originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (**S**) et le phosphore (**P**) présent dans le coke mais aussi le plomb (**Pb**) et l'étain (**Sn**) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (**As**), l'antimoine (**Sb**).
- ✓ **Les éléments d'additions** mentionnés plus haut et qui sont ajoutés de manière intentionnelle pour conférer au matériau les propriétés recherchées.
- ✓ **Les éléments d'accompagnements** que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'**aluminium**, le **silicium**, le **calcium**.

### III. Fabrication de l'acier [8, 9,11]

L'acier produit en France, comme dans les autres pays développés, contient en moyenne un peu plus de la moitié de fer recyclé. Dans les pays émergents tels que l'Algérie, le Brésil ou la Chine, l'acier est produit majoritairement à partir de minerai puisqu'il n'y a pas encore suffisamment de recyclage.

L'acier s'obtient par deux façons :

- ✓ A partir de la fonte (affinage de la fonte)
- ✓ A partir de ferraille de récupération (recyclage)

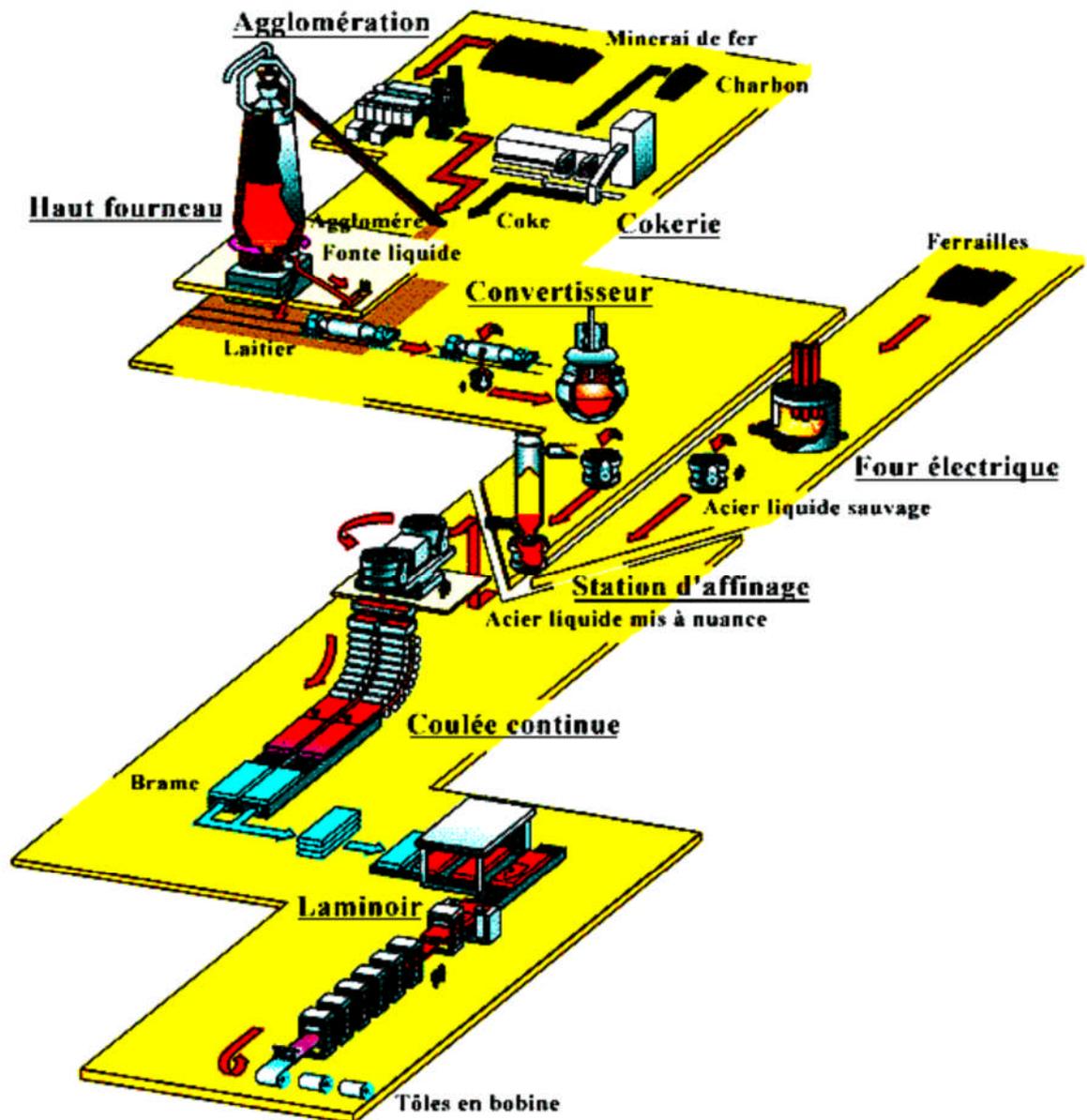


Figure 15 : élaboration de l'acier [9]

#### IV-4) le laminage [12]

Le laminage est l'étape finale de la fabrication des aciers. Cette transformation consiste principalement à laminier les demi-produits, c'est-à-dire à étirer et écraser le métal pour lui donner les dimensions et formes souhaitées. Deux types de laminages sont mis en œuvre : le laminage à chaud et le laminage à froid. La description suivante s'applique aux produits plats.

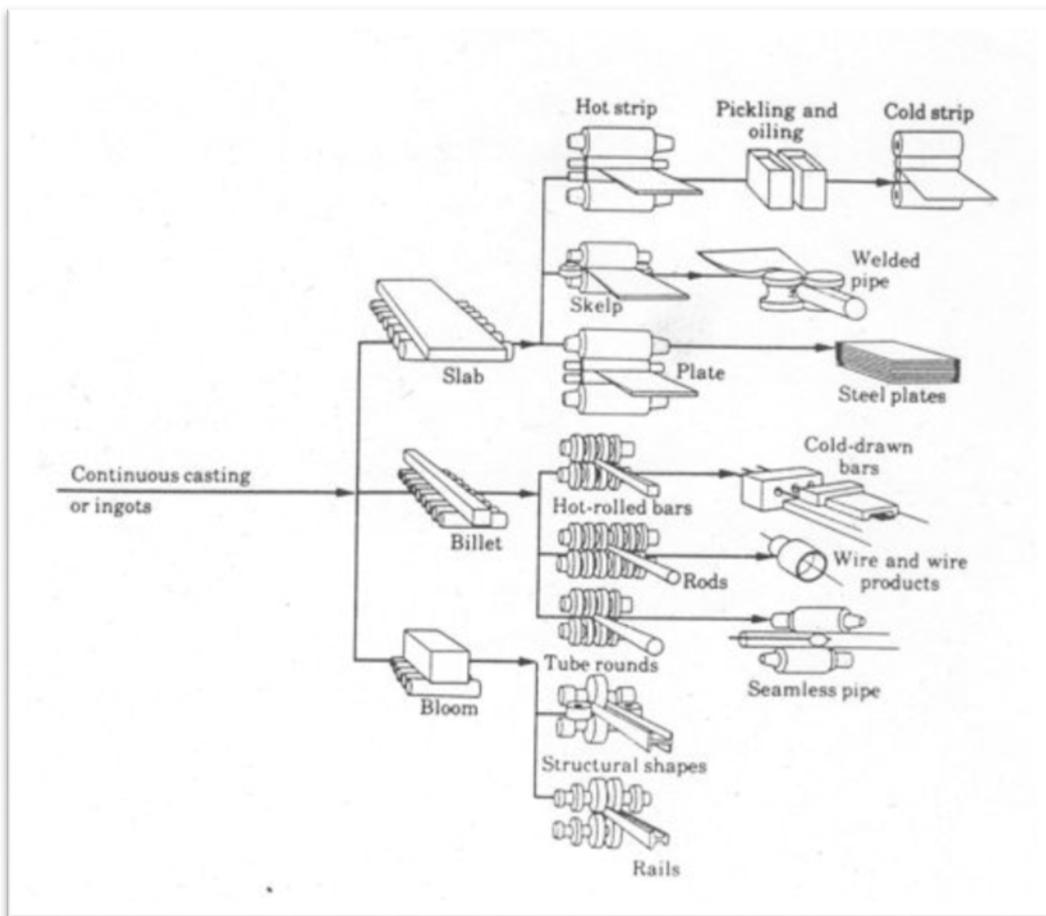


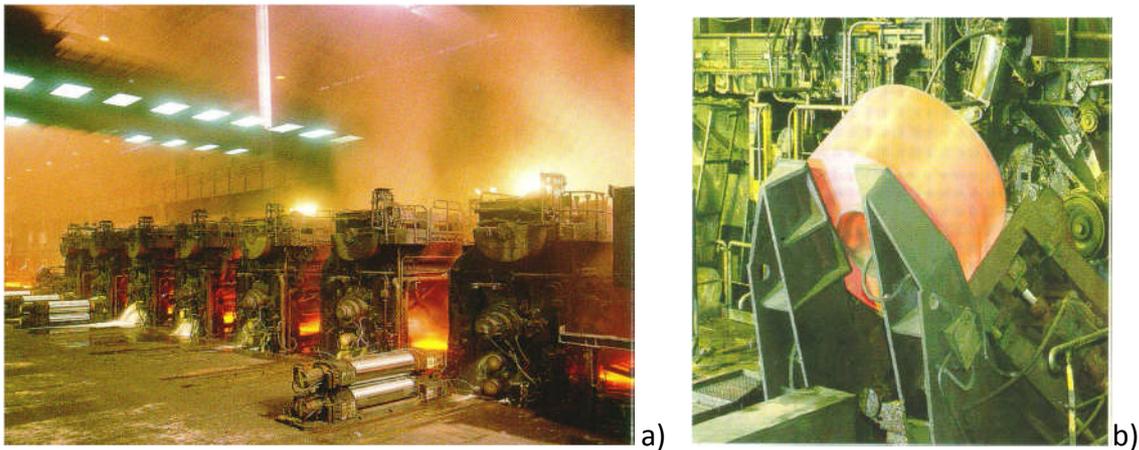
Figure 16 : la chaîne suivi par un lingot jusqu'au produit fini. [9]

##### 1) Laminage à chaud [13,16, 17]

Le laminage à chaud, qui est en fait un traitement mécanique à chaud, est un passage obligé pour toutes les brames fabriquées par fonderie en coulée continue. Ces brames ont généralement des épaisseurs très importantes (25cm) sur plusieurs mètres et peuvent peser jusqu'à 20 tonnes. Il intervient chronologiquement immédiatement après l'élaboration de l'acier.

Les brames peuvent être considérées comme un produit intermédiaire : le métal, brut de solidification, figé chimiquement, n'est pas encore dans son état terminal. En effet, ni sa géométrie (largeur, longueur, planéité...), ni sa structure métallurgique et ses caractéristiques mécaniques ne sont encore fixées. Le laminage à chaud consiste à réduire l'épaisseur du métal par une succession de passages entre deux cylindres animés de mouvements de rotation opposés. La brame est ainsi amenée jusqu'à l'épaisseur de produit fini de quelques millimètres (1 à 1.5 mm) et se réalise à une température comprise entre 1200°C et 1300°C. Elle se pratique à chaud afin de limiter les efforts de laminage nécessaires pour laminier la plaque. Puis enroulée pour former une bobine.

Exemple : à partir d'une brame de 10 m de long, 25 cm d'épaisseur et 2 m de large, on obtient une bobine de tôle de plus d'1 km de long et de 2 mm d'épaisseur.



**Figure 17 : (a) : laminage chaud  
(b) : bobine après laminage [9]**

### 2) Laminage à froid [17]

Plus de la moitié des tôles laminées à chaud sont ensuite laminées à froid pour en réduire encore l'épaisseur.

Le laminage à froid est effectué à une température qui avoisine 100°C. Elle permet à partir d'une tôle précédemment laminée à chaud de réduire l'épaisseur et de réaliser des tôles minces à l'épaisseur souhaitée par le client. Les lots de bobines laminées pèsent au moins 10 tonnes. Le laminage à froid peut produire des tôles minces jusqu'à 0.1 mm en plusieurs passes sur des laminoirs indépendants ou montés en tandem. Cette dernière

phase fait l'objet d'une attention constante sur la planéité et les caractéristiques mécaniques du produit laminé.

Les applications potentielles des produits laminés sont diverses : carrosserie d'automobile (tôle mince d'épaisseur moyenne comprise entre 0.5 et 1 mm, l'emballage (fer blanc d'épaisseur inférieur à 0.2 mm).



*Figure 18 : laminage à froid. [9]*

#### **IV. Classification et désignation des aciers [14]**

Les progrès en métallurgie ont donné naissance à de multiples nuances d'**acier**. Il est donc indispensable d'avoir un système de **désignation normalisé** afin de pouvoir désigner une nuance sans ambiguïté. Cependant, chaque pays a adopté un système différent. Pour ce qu'il suit, on travaillera avec la norme européenne **EN 10027** pour les aciers

##### **V-1) classification des aciers [12]**

Vue le nombre élevé des éléments d'addition ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

L'adoption de cette dernière, nous permet de recenser quatre familles d'acier :

- Les aciers au carbone d'usage général ;
- Les aciers de traitements thermiques alliés ou non alliés ;
- Les aciers à outils ou les aciers rapides ;
- Les aciers inoxydables ;

### V-2) Désignation des aciers

La désignation des aciers selon la norme européenne **EN 10027**, on distingue :

- ✓ les aciers non-alliés, ou acier au carbone :
  - les aciers non-alliés, d'usage général ;
  - les aciers non-alliés spéciaux (pour traitements thermiques, malléables, soudables, forgeables, ...) ;
- ✓ les aciers faiblement alliés ;
- ✓ les aciers fortement alliés (au moins un élément a une teneur Supérieure ou égale à 5 %), essentiellement les aciers inoxydables.
- ✓ les aciers rapides, qui gardent la trempe à haute température, donc qui restent durs malgré un échauffement, ils sont essentiellement utilisés comme aciers à outil, (foret, fraises, anciens outils d'usinage).

Les aciers ont deux désignations :

- ✓ **une désignation symbolique**, selon la catégorie à laquelle ils appartiennent, et qui rappelle leurs caractéristiques principales.
- ✓ **une référence numérique**.

#### V-2-1) Désignation numérique

Cette désignation fait référence à la norme **NF EN 10027-2**. Chaque matière est codée sous forme : **X.YYZZ**

- **X** : famille de la matière (ex 1 pour les aciers).
- **YY** : numéro du groupe (les aciers de construction générale sont en 00, les aciers inoxydables sont en 4Y).
- **ZZ** : numéro d'ordre dans le groupe.

Ce système de désignation n'est pratiquement pas utilisé hors industrie, ou généralement, on fait appelle à la désignation symbolique selon la norme **NF EN 10027-1**.

#### V-2-2) désignation symbolique : [19] [12]

La désignation symbolique des aciers est composée de lettres et de chiffres/nombres, écrits en général sans espace entre eux. Ces symboles expriment des caractéristiques principales et des caractéristiques liées aux propriétés d'emploi, par exemple des

caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques. Dans le cas des aciers moulés, la lettre **G** est ajoutée, avant les désignations symboliques décrites ci-après.

Deux catégories sont distinguées :

- ✓ **Catégorie 1** : Aciers désignés en fonction de leur emploi et de leurs caractéristiques mécaniques ou physiques.
- ✓ **Catégorie 2** : Aciers désignés en fonction de leur composition chimique.

Les désignations symboliques sont constituées de symboles principaux et éventuellement de symboles additionnels. Pour des précisions sur les symboles additionnels ou des nuances spécifiques il convient de se reporter à la norme **NF EN 10027-1** et/ou aux normes européennes de produits dans lesquelles les désignations individuelles des nuances d'acier sont données.

### ➤ 1/ Catégorie 1

Ce système de désignation est basé sur l'utilisation de l'acier. Le codage est réalisée à partir d'une lettre suivie d'une valeur numérique, la lettre indique leur usage (les plus courants, sont S et E) et Puis, suit la limite d'élasticité en méga pascals (1 MPa = 1 N/mm. = 0,1 daN/mm). D'autres symboles peuvent compléter la désignation selon les particularités, comme indiqué dans le Tableau ci-dessous.

**Tableau N° 1: acier désigné selon son utilisation et ses caractéristiques. [14]**

Type d'aciers	Symboles principaux		Symboles additionnels	Exemples
	Lettre	Caractéristique		
Aciers pour béton armé	B	Valeur spécifiée de la limite d'élasticité en [MPa]	Lettre indiquant la classe de ductilité, suivie si nécessaire de 1 ou 2 chiffres	B500A : Acier pour béton armé de limite d'élasticité spécifiée égale à 500 [MPa] et de classe de ductilité A

## Chapitre II : Les aciers

Produits plats en acier nus ou revêtus à haute résistance pour formage à froid (autres que les aciers dont la désignation commence par H)	D	Lettre C (laminé à froid), D (laminé à chaud pour formage direct à froid) ou X (conditions de laminage non spécifiées) suivies de deux chiffres correspondant à une aptitude croissante au formage à froid	Oui ; voir NF EN 10027-1	DX53D+Z275 : Acier à bas carbone d'un produit plat pour emboutissage profond, avec revêtement de zinc de masse nominale 275 g/m <sup>2</sup> sur les deux faces
Aciers de construction mécanique	E	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence (pour une épaisseur donnée) en [MPa]	Lettre G (autres caractéristiques) suivie de 1 ou 2 chiffres ou lettre C (destiné à l'étirage)	E335GC : Acier de construction mécanique de limite d'élasticité spécifiée égale à 335 [MPa] pour les épaisseurs nominales ≤ 16 mm avec aptitude complémentaire à l'étirage à froid
Produits plats nus ou revêtus pour formage à froid (pliage, emboutissage)	H	Une lettre C, D ou X suivie de la valeur minimale de la limite d'élasticité en MPa ou deux lettres CT, DT ou XT suivie de la valeur minimale spécifiée de la résistance à la traction en [MPa]. C = laminé à froid, D = laminé à chaud pour formage direct à froid, X = conditions de laminage non spécifiées	Oui ; voir NF EN 10027-1	HCT980X+ZA200 : Produit plat laminé à froid pour formage à froid de valeur minimale spécifiée de résistance à la traction égale à 980 [MPa], avec revêtement de zinc-aluminium de masse nominale 200 g/m <sup>2</sup> sur les deux faces
Aciers pour tubes de conduite	L	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence en [MPa]	Oui ; voir NF EN 10027-1	L245GA : Acier pour tubes de conduite de valeur spécifiée de la limite d'élasticité pour le corps du tube égale à 245 [MPa] et de classe de prescription A

## Chapitre II : Les aciers

<p>Aciers magnétiques (pour applications électriques)</p>	<p>M</p>	<p>Centuple des pertes totales en [W/kg] suivi d'un tiret, du centuple de l'épaisseur nominale en mm et du type de produit (voir NF EN 10027-1)</p>	<p>Non</p>	<p>M400-50A : Acier pour applications électriques à grains non orientés sous forme de bandes et tôles laminées à froid et livrées à l'état fini, de pertes totales spécifiques maximales égales à 4 W/kg à 50 Hz et 1,5 T, d'épaisseur nominale 0,50 mm.</p>
<p>Aciers pour appareil à pression</p>	<p>P</p>	<p>Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence en [MPa]</p>	<p>Oui ; voir NF EN 10027-1</p>	<p>P355NL1 : Acier pour appareil à pression de limite d'élasticité de référence égale à 355 MPa, pour les épaisseurs nominales <math>\leq 16</math> mm, livré à l'état normalisé, et d'énergie minimale de rupture en flexion par choc dans la direction transversale, pour une température d'essai de <math>-40^{\circ}\text{C}</math>, égale à 27 joules</p>
<p>Aciers pour ou sous forme de rails</p>	<p>R</p>	<p>Dureté Brinell minimale spécifiée (HBW)</p>	<p>Oui ; voir NF EN 10027-1</p>	<p>R320Cr : Acier pour rail de fourchette de dureté Brinell 320 à 360, à 1 % de Cr, non traité thermiquement.</p>

Aciers de construction (pour constructions métalliques)	S	Valeur spécifiée d'une limite d'élasticité de référence en [MPa]	Oui ; voir NF EN 10027-1	S235J0 Acier de construction de limite d'élasticité de référence spécifiée égale à 235 MPa, pour les épaisseurs nominales $\leq 16$ mm, et d'énergie minimale de rupture en flexion par choc pour une température d'essai de 0°C, égale à 27 Joules
Aciers pour emballage (fer blanc, fer noir, fer chromé)	T	Lettre H (pour les produits recuit continu) ou S (pour les produits recuit base) suivie de la valeur nominale de la limite d'élasticité en [MPa]	Non	TH580 : Acier pour emballage, (fer blanc ou fer chromé) de limite d'élasticité nominale égale à 580 MPa
Aciers de précontrainte	Y	Valeur spécifiée de la résistance à la traction en [MPa]	Oui ; lettre liée au type de produit (fil, toron ou barre) et à son processus de fabrication	Y1960C : Acier de précontrainte de résistance à la traction spécifiée de 1 960 MPa, livré sous forme de fil tréfilé

**Exemple :**

➤ **S355J2**

- ✓ S = Acier de construction.
- ✓ 355 : Valeur minimale, de limite d'élasticité.
- ✓ J2 : Energie de rupture 27J à -20°C.

➤ **E295**

- ✓ E = Aciers de construction mécanique.
- ✓ 295 = Valeur minimale de limite d'élasticité.

### ➤ **Catégorie 2**

Ce système est basé sur la composition chimique des aciers. Le premier renseignement concerne le taux de carbone. Ensuite, tout dépend de la présence d'élément d'alliage et de leur teneur.

La norme européenne EN 10027 distingue cinq principaux types d'acier

- les aciers non-alliés, ou acier au carbone :
  - ✓ les aciers non-alliés d'usage général.
  - ✓ les aciers non-alliés spéciaux (pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, ...).
- les aciers faiblement alliés.
- les aciers fortement alliés (au moins un élément a une teneur supérieure ou égale à 5 %), essentiellement les aciers inoxydables ;
- les aciers rapides, qui gardent la trempe. haute température, donc qui restent durs malgré un échauffement ; ils sont essentiellement utilisés comme aciers. Outil (foret, fraises, anciens outils d'usinage).

### ❖ **1) aciers non alliés [15]**

Un acier est dit non allié quand il contient une faible teneur en carbone et les éléments d'alliage sont inférieurs à un seuil, donné dans le tableau ci-dessous pour chaque un. On distingue :

- ✓ Les aciers de qualité non alliés pour lesquels il existe par exemple des exigences de propriétés spécifiées de ténacité (résilience), de grosseur de grain et/ou de formabilité. On trouve par exemple parmi eux les aciers magnétiques (notre cas), les aciers de décolletage ne satisfaisant pas à au moins une des prescriptions spécifiées dans la norme pour définir les aciers non alliés spéciaux.
- ✓ Les aciers spéciaux non alliés qui présentent par rapport aux aciers de qualité non alliés une plus grande pureté, notamment vis à vis des inclusions non métalliques. La plupart du temps, ces aciers sont destinés à un traitement de trempe et revenu ou à un traitement de trempe superficielle. Ces aciers permettent de répondre à des

exigences sévères. On trouve par exemple, parmi ces produits, les aciers pour armatures de précontrainte.

**Tableau N° 2 : seuil des éléments d'alliage [12]**

Élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Seuil (%)
Chrome	Cr	C	0.30
Manganèse	Mn	M	1.65
Molybdène	Mo	D	0.08
Nickel	Ni	N	0.30
Silicium	Si	S	0.50
Tungstène	W	W	0.10
Vanadium	V	V	0.10

La désignation commence par un **C**, puis suit le pourcentage massique de carbone **multiplié par 100**.

**Par exemple :**

**C35** est un acier non-allié avec  $35/100 = 0,35$  % de carbone.

On peut ajouter une lettre donnant des précisions :

- ✓ **E** : contient du soufre pour améliorer l'usinabilité.
- ✓ **C** : acier pour formage.
- ✓ **S** : acier pour ressort.

**Par exemple : C35 E.**

### ❖ 2) aciers faiblement alliés [15]

Un acier est dit faiblement allié quand un ou plus de ses éléments d'alliage, dépasse le seuil du tableau N° 2, tout en restant inférieur à 5%. Ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance.

### Désignation :

- un nombre égal à **100** fois la teneur en **carbone**.
- les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- les teneurs des principaux éléments d'addition multipliés par **4, 10, 100 ou 1000** (voir tableau ci-dessous).
- Eventuellement, des indications supplémentaires concernant la soudabilité (**S**), l'aptitude au moulage (**M**), ou à la déformation à froid (**DF**).

**Tableau N° 3: Facteur pour les aciers faiblement alliés [14]**

Élément d'adition	Coefficient
Cr, Co, Mn, Si, W, Ni	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, V, Zr, Ta, Ti	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

### Par exemple :

#### ➤ **G 35 Ni Cr Mo 16-8**

- ✓ **G**:Acier moulé.
- ✓ **35/100=0.35%** de **carbone**.
- ✓ **16/4=4%** de **Nickel**.
- ✓ **8/4=2%** de chrome (**Cr**) et des traces de **Molybdène**.

#### ❖ **3) aciers fortement alliés**

Un acier est dit fortement allié quant un ou plusieurs de ses éléments d'alliage est présent à 5% ou plus. Ces aciers sont réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%)

### Désignation

La Lettre **X**, symbolisant la famille, Suivie par un nombre égal à **100** fois la teneur en carbone et mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés, la Seule différence: pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition.

### Par exemple

➤ **G X 6 Cr Ni Ti 18-11**

- ✓ **G** : acier moulé
- ✓ **X** : catégorie des aciers fortement alliés
- ✓ **6/100=0.06%** de **Carbone**
- ✓ **18%** de chrome (**Cr**)
- ✓ **11%** de **Nickel**
- ✓ Des traces de **Titane**

❖ **4) aciers rapides**

La désignation comprend successivement les symboles suivants : Les lettres **HS** (**High-speed**), Les teneurs des éléments d'alliage dans l'ordre suivant : **tungstène, molybdène, vanadium, cobalt.**

### Par exemple

➤ **HS 8,5 – 3,5 – 3,5 – 11**

Acier rapide à **8,5%** de **Tungstène**, **3,5%** de **Molybdène**, **3,5%** de **Vanadium** et **11%** de **Cobalt.**



Chapitre III

### I) Introduction [19]

En amont de toute fabrication, le concepteur fait le choix du matériau potentiellement le plus apte à supporter les conditions de service auxquelles sera soumis le produit fabriqué. En pratique, ce sont principalement les propriétés mécaniques des matériaux, qui guident les concepteurs dans ce choix.

Par exemple, on choisira un alliage de haute résistance à la traction pour fabriquer une charpente métallique soumise à des efforts de tractions élevées, ou un acier résistant au choc, pour fabriquer un essieu de camion...

Or, les propriétés d'un matériau dépendent de sa structure métallurgique (arrangement interne de la matière...).

Enfin, le rôle principal de la métallurgie est-il de comprendre le fonctionnement métallurgique d'un matériau, ou encore, plus simplement dît, de savoir comment « *façonner, ou faire évoluer* » sa structure métallurgique, afin de maîtriser ses propriétés.

### II. les différentes phases des aciers [18, 20]

L'acier est un mélange formé par la dissolution de carbone dans le réseau métallique du fer. Il existe différentes phases des aciers qui présentent chacune des propriétés différentes. Ces propriétés sont liées notamment à la position du carbone dans la structure métallique du fer (**CC**) ou (**CFC**). [5] et leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi d'autres éléments d'alliage), et de la température. De là qu'on parle du diagramme binaire **fer-carbone**.

#### II-1. Diagramme d'équilibre : Fer-carbone

Le diagramme Fer-Carbone se présente comme la montre la **figure 19**. Les lettres repères sont conventionnelles.

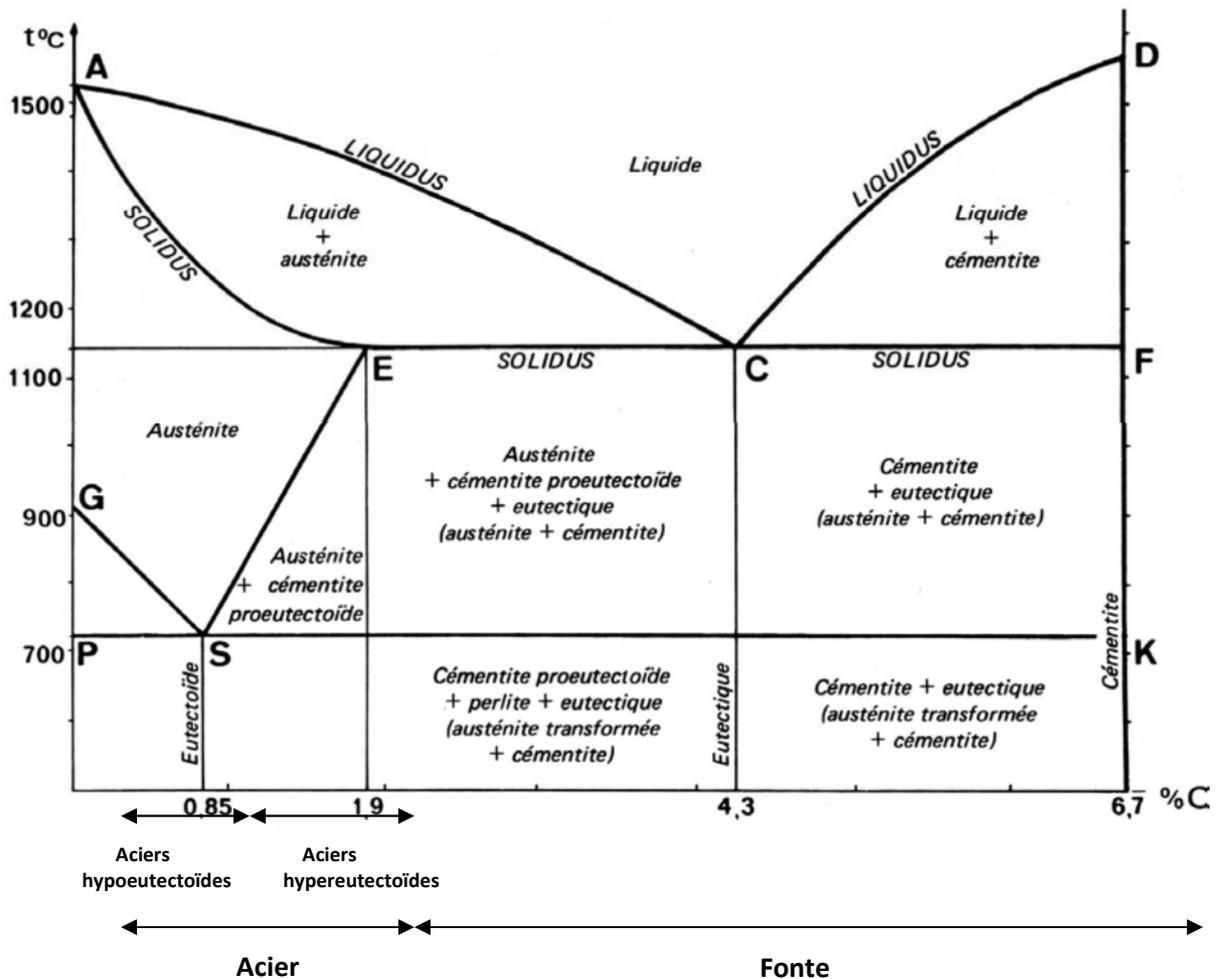


Figure 19: Diagramme d'équilibre : Fer-carbone [19]

Le liquidus est toujours représenté par la ligne A C D, le solidus par la ligne A E C F D, l'eutectique par le point C. [17]

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le **graphite** ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique **Fe<sub>3</sub>C** appelée **cémentite** ou **carbone de fer**.

Donc on a l'existence de deux diagrammes d'équilibres :

- Le diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe<sub>3</sub>C (cémentite).
- Le diagramme d'équilibre stable fer-graphite.

Pour les fontes grises, on se réfère au diagramme stable Fer-Carbone. Pour les fontes blanches et les aciers, on se réfère au diagramme métastable Fer-Cémentite.

Les diagrammes sont souvent montrés superposés car lors du refroidissement d'une fonte à partir de l'état liquide, il y a souvent passage du diagramme stable au diagramme métastable dans le domaine comportant de l'austénite. [20]

### Nomenclature [19]

Le métallurgiste utilise les termes suivants :

- **Ferrite ou Fer** : la forme cristalline CC pouvant dissoudre jusqu'à 0,02 % C (en poids).
- **Cémentite** : le carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ , contenant environ 6,67 % C)
- **Perlite** : la structure lamellaire de ferrite et de cémentite décrite plus tôt. La quantité totale de carbone contenue par cette structure est de 0,8 %.
- **Austénite ou Fer** : la forme cristalline de fer CFC qui existe à haute température et qui peut contenir jusqu'à environ 2 % C.
- **Acier** : l'alliage contenant moins de 2 % C.
- **Fonte** : l'alliage contenant plus de 2 % C.

### II-2. Diagramme d'équilibre : Fer-cémentite [20, 23]

Le diagramme d'équilibre Fer-Carbone métastable, représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. La cémentite est dure et fragile, en comparaison avec le fer pur [15], elle correspond à 6,67 % de carbone.

La **figure19** représente à la fois les deux diagrammes, celui représenté par des traits en pointillés correspondant au diagramme stable Fer-Graphite et l'autre en trait continu correspondant au diagramme métastable Fer-Cémentite.

Pour des températures élevées, la cémentite se décompose en fer et en carbone et c'est la cause qui ne laisse pas connaître la température de fusion de la cémentite, on considère sa température de fusion à environ 1392°C et peut être, elle est plus élevée.

Sur la **figure19**, le fer pur représente la partie limite gauche et la cémentite la partie limite droite. La cémentite contient 6,67 % de carbone. Les complications qui existent dans le fer sont les différentes modifications allotropiques du fer et les différentes capacités de

dissolution du carbone. Les aciers et aciers de moulage se solidifient selon le système métastable.

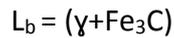
### II-3) Les points caractéristiques du diagramme

- ✓ A : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).
  - ✓ D : correspond à la température de fission de la cémentite (1392°C).
  - ✓ B : 0,51 % C, dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite  $\delta$  et l'austénite à la température péritectique 1493°C.
  - ✓ H : 0,10 % C, teneur limite du carbone dans la ferrite  $\delta$  à 1493°C.
  - ✓ I : 0,16 % C, dans l'austénite à la température péritectique 1499°C.
  - ✓ N (1392°C) et G (910°C) marquent la transformation polymorphe réciproque ferrite-austénite ( $\delta/\gamma$ ).
  - ✓ E : 2,1 % C, teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF; 1147°C).
  - ✓ S : 0,8 % C, dans l'austénite à la température eutectoïde 727°C.
  - ✓ P : 0,02 % C, teneur limite dans la ferrite à la température eutectoïde 727°C.
  - ✓ C : 4,3 % C, transformation eutectique à la température 1147°C.
- ❖ Les liquides du diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C qui déterminent le processus de cristallisation ont la notation et le sens physique suivant :
- ✓ AB : liquidus qui matérialise la température de début de cristallisation de la ferrite  $\delta$  à partir de l'alliage liquide.
  - ✓ NH et NI : limite supérieure intérieure de la coexistence des deux phases ferrite  $\delta$  et austénite ( $\gamma$ ).
  - ✓ BC : liquidus qui marque le début de cristallisation de l'austénite  $\gamma$ , à partir de l'alliage liquide.
  - ✓ CD : liquidus correspondant au début de cristallisation de la cémentite primaire (Fe<sub>3</sub>C) à partir de l'alliage liquidé.
- Donc ABCD représente la ligne liquidus pour tout le diagramme au dessus d'ABCD, tous les alliages sont à l'état liquide.
- ✓ AH : ligne de solidus traduisant les températures délimitant le domaine de l'alliage liquide et les cristaux Fe $\delta$ . Au dessous existent uniquement les cristaux de ferrite  $\delta$ .

- ✓ HIB : ligne de transformation péritectique ( $T = 1499^{\circ}\text{C}$ ,  $C = \text{constante}$ ), A la température inférieure à  $1499^{\circ}\text{C}$ , on a l'amorce de la réaction péritectique (interaction du liquide de composition B avec les cristaux de fonte  $\delta$  de composition H dégage de l'austénite de composition I.



- ✓ ECF : cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite ( $L_b$ ).



- Donc AHIECF représente la ligne de solidus, au dessous de cette ligne, tous les alliages se trouvent à l'état cristallin (solide).

Entre les lignes du solidus et du liquidus, tous les alliages se trouvent à l'état pâteux avec des composantes hétérogènes de liquide et de cristaux (ferrite, austénite, cémentite) ayant des compositions différentes et dans des portions variables.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06 % C s'appellent aciers et dont la teneur en carbone est supérieure à 2,06 % C s'appellent fontes. Cette délimitation coïncide avec la solubilité limite du carbone dans l'austénite. L'austénite possède une structure très plastique, ce qui rend les aciers malléables, les fontes possèdent de bonnes propriétés de fonderie, un point de fusion plus bas et des retraits plus petits dus à la présence dans la structure du composant eutectique lédéburite.

Les points de transformations des aciers jouent un rôle prédominant dans la détermination des températures des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit et cémentation).

Ces points sont notés par :  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_{cm}$ , lors du chauffage ou du refroidissement sont notés respectivement par :  $A_{c0}$ ,  $A_{c1}$ ,  $A_{c2}$ ,  $A_{c3}$  et  $A_{ccm}$  et  $A_{r0}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r2}$ ,  $A_{r3}$  et  $A_{rcm}$ .

- ✓  $A_0$  : ( $T = 210^{\circ}\text{C}$ ) correspond à la transformation lors du chauffage de la cémentite ferro-magnétique en cémentite non magnétique.
  - ✓  $A_1$  : ( $T = 727^{\circ}\text{C}$ ) correspond à la transformation réversible Perlite – Austénite.
  - ✓  $A_2$  : point de curie ( $T = 769^{\circ}\text{C}$ ), au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques, cette température est marquée par ligne MO.
  - ✓  $A_3$ , correspond aux températures associées à la ligne SE (Cm est le symbole abrégé de la cémentite)
- Donc les lignes GOS et SE représentent le lieu des points  $A_3$  et  $A_{cm}$  définissant des températures variables.

- Les points caractéristiques du diagramme Fer-Carbone stable et métastable sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau N°4 : *Les points caractéristiques du diagramme fer-carbone stable et métastable [22]*

Point	Température en °C	% de carbone
A	1539	0
B	1499	0,51
C	1147	4,30
D	1392	6,67
E	1147	2,06
F	1147	6,67
G	910	0
H	1499	0,10
I	1499	0,16
K	723	6,67
M	760	0
N	1392	0
P	727	0,02
Q	20	0,006
C'	1147	4,30
E'	1153	2,03
S'	727	0,69

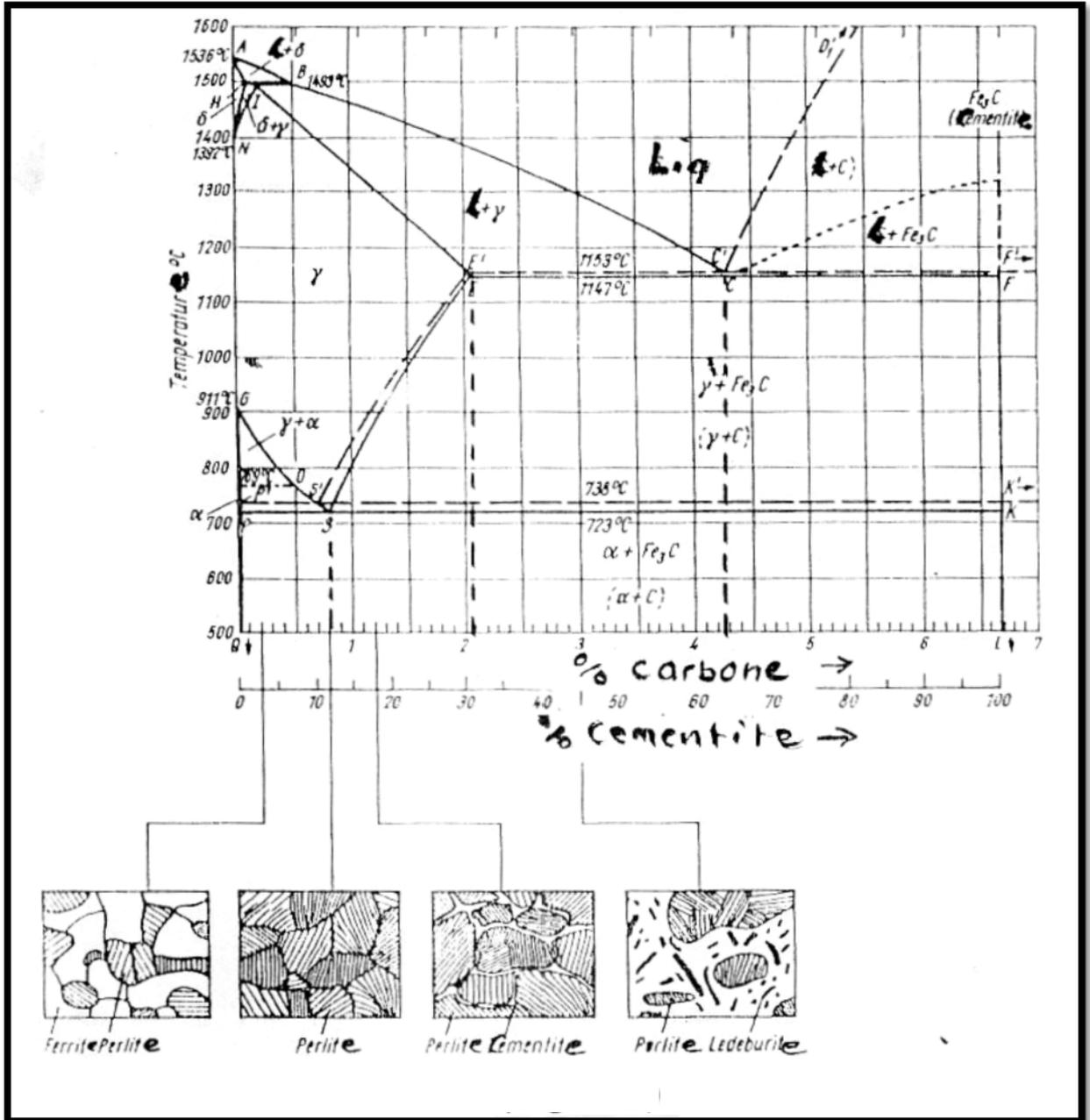


Figure 20 : diagramme binaire fer-carbone [19]

A partir du diagramme fer-cémentite, on peut définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone.

Tableau N°5 : les aciers et fontes suivant la teneur en carbone dans le diagramme fer-cémentite

[19]

Désignation	% de carbone
Aciers hypoeutectoides	0,02 à 0,8
Aciers entectoïdes	0,8

Aciers hypereutectoides	0,8 à 2,06
fontes hypoeutectiques	2,06 à 4,3
Fontes eutectiques	4,3
Fontes hypereutectiques	4,3 à 6,67

### II-4) Les différentes phases des aciers (la microstructure) [13, 20]

L'acier est constituée de fer et de carbone, la façon dont ces éléments se combinent dépend de nombreux paramètres et détermine les propriétés de l'acier.

L'obtention des différentes combinaisons est liée aux cycles thermiques couple (température- temps) appliqués aux aciers.

#### ➤ La ferrite (F)

C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$ , c'est à dire la ferrite est constituée par du fer  $\alpha$  renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02 %), ainsi que d'autres inclusions.

On distingue la ferrite  $\alpha$  à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02 % et la ferrite  $\delta$  à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 %. La ferrite est peu tendre et très ductile ( $HV = 90$ ,  $Rm = 300 \text{ N/mm}^2$ ,  $K = 300 \text{ J/cm}^2$ ), Elle est magnétique à la température ordinaire, au microscope la ferrite a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C.

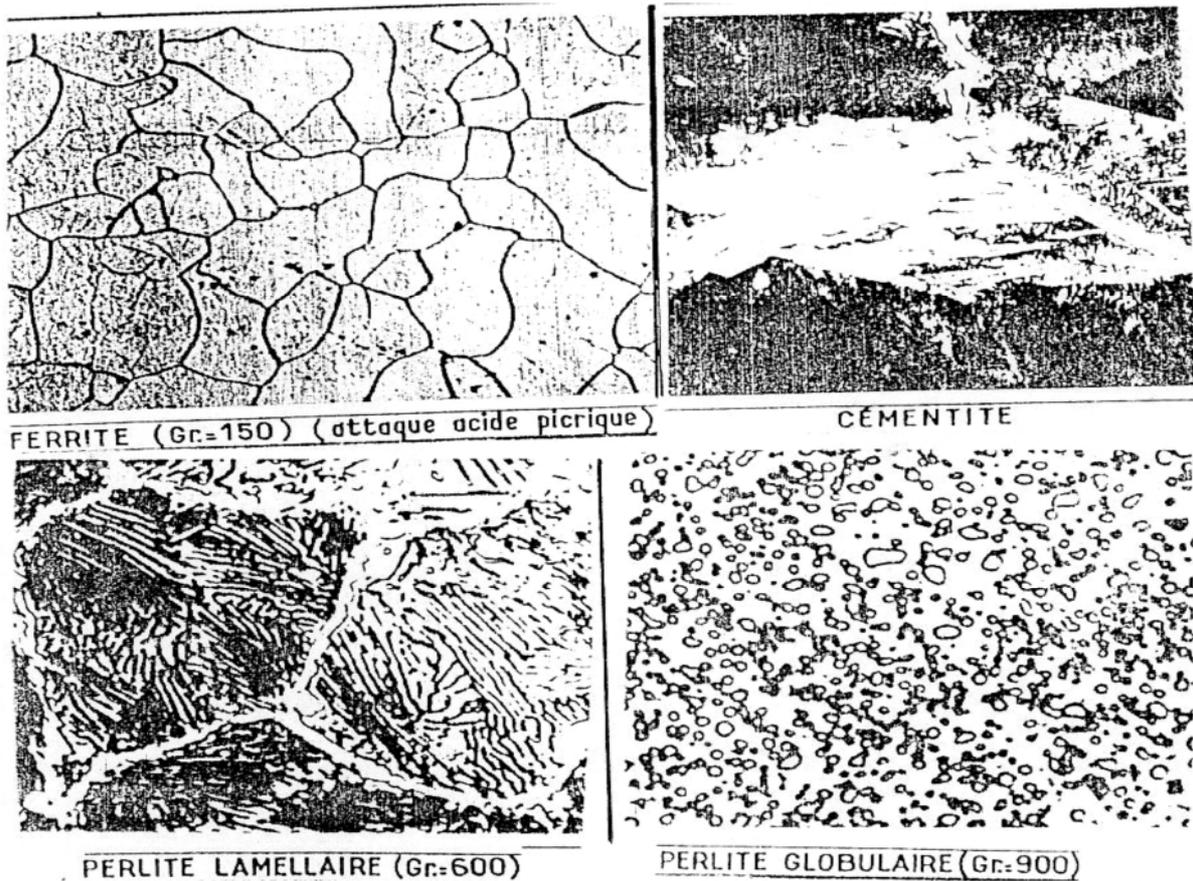


Figure 21 : constituants micrographiques des aciers [19]

➤ L'austénite (A)

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer  $\gamma$ . Sa structure cristalline est CFC, La solubilité du carbone dans le fer  $\gamma$  dépend fortement de la température est de 0,77% à 727°C et jusqu'à 2,11% à 1148°C. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de gains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est anti-ferromagnétique (paramagnétique).

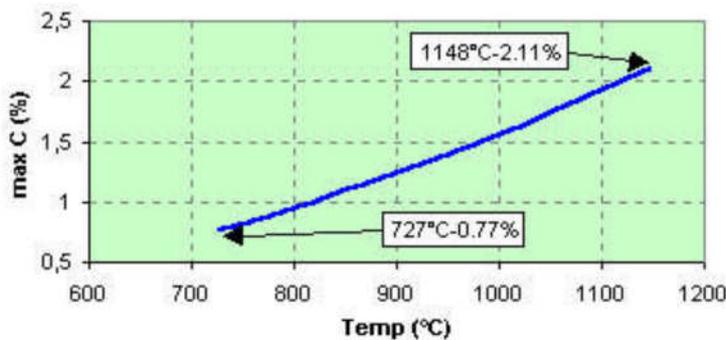


Figure 22 : courbe de l'austénite entre 727°C et 1148°C

### ➤ La cémentite (C)

La cémentite ou carbone de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67 %. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (HB = 700) mais fragile. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- ✓ Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- ✓ Grains dans les aciers avant subit un traitement thermique de recuit.
- ✓ Précipites inter-granulaires dans les aciers ayant un pourcentage de carbone supérieur à 0,8 %.

Selon le diagramme Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  et lors du refroidissement, la cémentite peut exister sous trois différentes formes de liaisons mais avec la même composition chimique.

**Tableau N°6 : différentes formes de liaisons la cémentite [20]**

Désignation	Obtention par
Cémentite primaire	Cristallisation primaire du métal liquide suivant la ligne CD
Cémentite secondaire	Ségrégation à partir de l'austénite suivant la ligne ES
Cémentite tertiaire	Ségrégation à partir de la ferrite suivant la ligne PQ

### ➤ la perlite (P)

La perlite est un composant biphasé. C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88 % de ferrite et 12 % de cémentite). Elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8 % de carbone.

Elle est présente dans l'acier ordinaire, toujours à une teneur en carbone de 0,85 %. La perlite est dure (HV = 200) et assez ductile  $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ .

Dans la perlite, la cémentite peut se présenter sous forme de lamelles ou de globules. Ce sont les cycles thermiques qui permettent de passer d'une structure lamellaire à une structure globulaire ou le contraire.

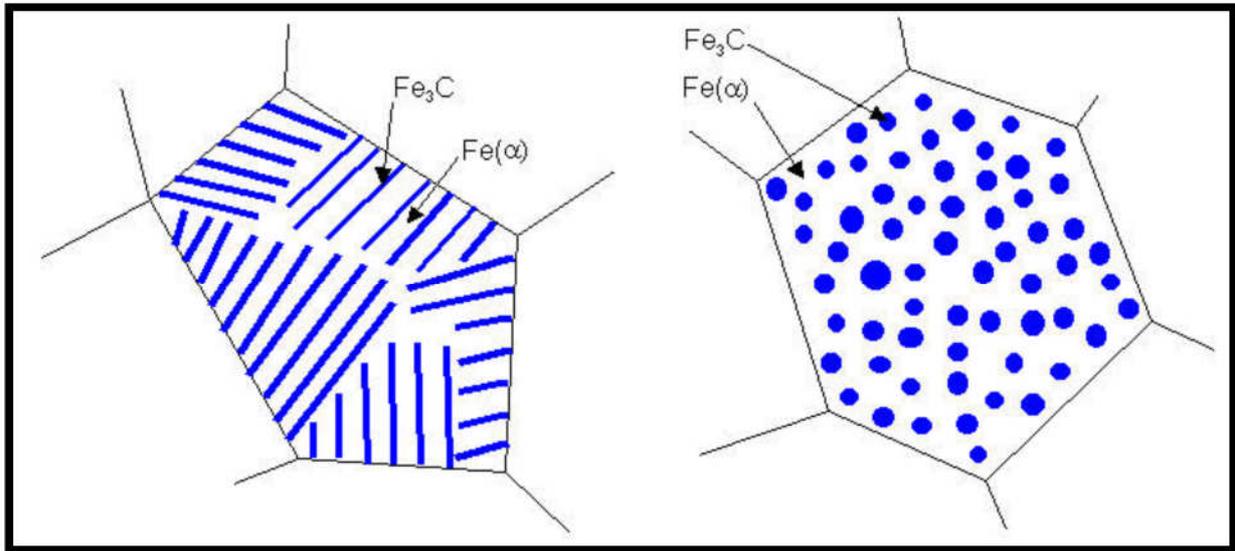


Figure 23 : a gauche perlite lamellaire à droite perlite globulaire [20]

### ➤ La bainite (B)

La bainite est une structure très particulière. Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures apparaissant parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Ces carbures ne sont discernables qu'en microscopie électronique.

Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique.

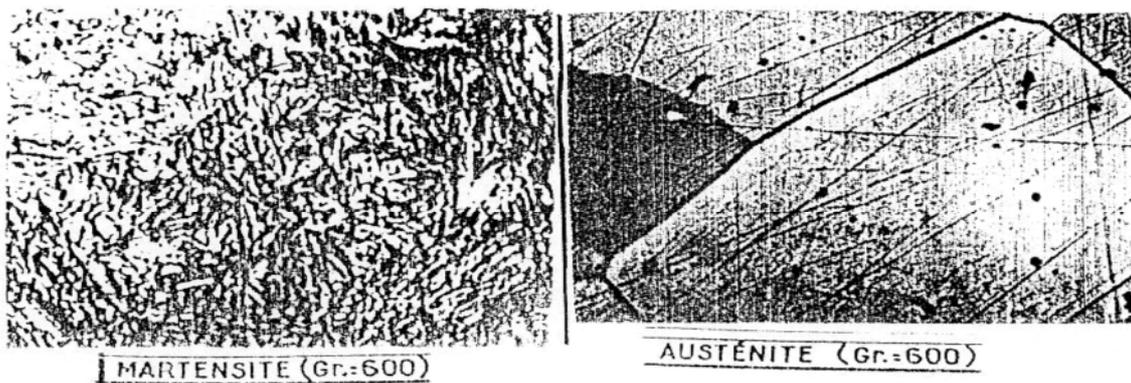
### ➤ La martensite $\alpha'$ (M)

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. La martensite est une structure obtenue par un refroidissement rapide de l'austénite, les atomes de carbone n'ont pas le temps de migrer pour recomposer de la perlite ou de la cémentite. Ils sont pris au piège au sein du réseau cristallin.

Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, lorsque la température passe en dessous d'un certain seuil nommé Ms (Martensite Start), la martensite se crée. Au fur et à mesure de la baisse de la température, le pourcentage de martensite créée augmente pour atteindre 100% à une température appelée Mf (Martensite Finish), le temps n'intervient pas dans sa création, seulement la température atteinte détermine le pourcentage de la martensite créée, les températures Ms et Mf dépendent fortement de la composition de l'acier, si Mf est inférieure à la température ambiante, toute l'austénite ne sera pas transformée en martensite.

C'est pour réduire cette austénite résiduelle que certains aciers alliés subissent une trempe cryogénique (pour passer en dessous de Mf). La martensite possède une grande dureté (HV = 700 à 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés. Toutes ces microtextures ou microstructures sont toutes des produits de décomposition de l'austénite. Elles sont composées d'un mélange de ferrite  $\alpha$  et de carbure (cémentite ou carbure plus ou moins complexes).



**Figure 24 : constituants micrographiques des aciers [19]**

### III. Influence des éléments chimiques sur les aciers [20, 22]

La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peut être ductile ou fragile selon :

- ✓ La composition chimique.
- ✓ L'état de surface.
- ✓ La température.

Une tonne d'acier (c'est-à-dire un cube de 0,5 m d'arête) contient entre  $10^{12}$  et  $10^{15}$  inclusions qui peuvent occuper jusqu'à 1 % du volume. La quantité totale est largement dépendante de l'origine du minerai, du coke et d'autres matériaux utilisés pour extraire le métal et par le procédé de fabrication de l'acier.

Le phosphore et le soufre par exemple sont les impuretés préoccupant principalement l'aciériste. Si ces impuretés ne sont pas réduites à des concentrations faibles, elles vont former des phosphures et des sulfures qui sont néfastes à la ténacité de l'acier. Par contre, Le manganèse est toujours ajouté dans les aciers. S'il n'y avait pas de manganèse, des sulfures de fer se formeraient et auraient un effet beaucoup plus néfaste que les (MnS) sur la ténacité.

L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes.

#### III-1) Classification des éléments d'alliages [21]

##### a) Eléments gammagènes

Comme le Ni et le Mn, ces éléments abaissent le point  $A_3$  et élèvent le point  $A_4$ , ce qui donne une extension du domaine de la phase  $\gamma$  et une réduction du domaine de la phase  $\alpha$ . La figure 33 montre l'addition de ces éléments qui fait monter le point  $A_4$  jusqu'à la ligne solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage, le point A descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation réciproque  $\alpha$  en  $\gamma$  et  $\gamma$  en  $\alpha$ . Les alliages de ce type sont dits austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation  $\alpha$  en  $\gamma$ , s'appellent demi-austénitiques.

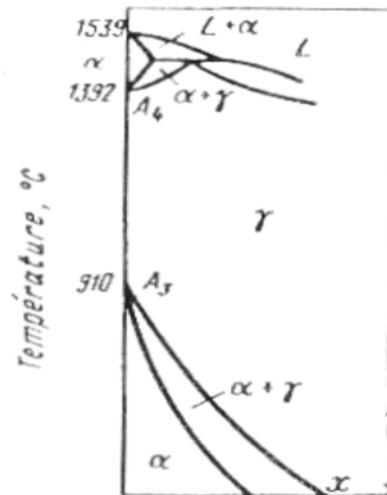


Figure 25 : extension du domaine de la phase  $\gamma$  et réduction de la phase  $\alpha$  [19]

b) **Éléments alphagènes**

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si,...etc. ces éléments abaissent le point  $A_4$ , et élèvent le point  $A_3$ . Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation  $A_3$  et  $A_4$ , se rencontrent et le domaine de la phase  $\gamma$  se trouve complètement fermé, c'est à dire, il y a extension du domaine de la phase  $\alpha$  (ferritique) et un rétrécissement du domaine  $\gamma$  (austénitique), (fig.138). Les alliages de ce type sont dit "ferritiques". Lorsque la transformation  $\alpha$  en  $\gamma$  ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent demi-ferritiques.

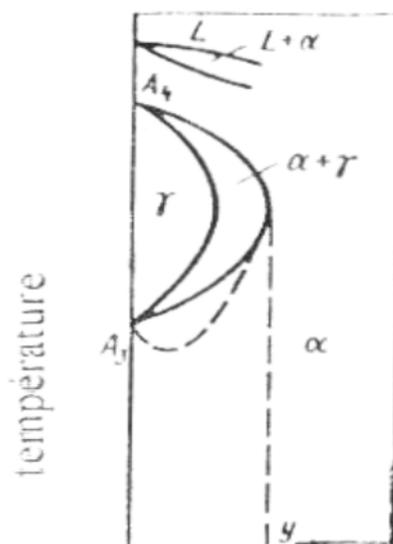


Figure 26 : extension du domaine ferritique (phase  $\alpha$ ) et réduction d'austénitique (phase  $\gamma$ ) [19]

### V-2) les Alliages [19, 22, 12]

Voici une description des effets de quelques éléments d'alliages sur les aciers.

#### 1 .Carbone

Même si le carbone n'est pas considéré comme un élément d'alliage, il n'en constitue pas moins l'élément le plus important dans la composition d'un acier, puisque c'est lui qui en influence la dureté, l'aptitude à la trempe, la ténacité et la résistance à l'usure. Plus on approche de 0,85 % de carbone, plus l'acier est dur et présente une résistance à la traction élevée; par contre, sa ductilité et sa soudabilité sont amoindries. Au-delà de 0,85% de carbone, l'ajout de carbone ne modifie que sensiblement la dureté de l'acier, mais cela lui confère une meilleure résistance à l'usure.

#### 2 .Manganèse

Le manganèse existe en solution dans la ferrite sous forme de **MnS** et surtout sous forme de carbure  $Mn_3C$  associé à la cémentite  $Fe_3C$ . La présence du manganèse dans l'acier est très souhaitée, car d'une part, il augmente la dureté de l'acier et sa trempabilité et améliore la qualité et le fini de surface, et d'autre part, il joue le rôle d'antidote du soufre, car le soufre est moins nocif dans la mesure où il se trouve sous forme de **MnS** et non sous forme de **FeS** ou de soufre libre.

#### 3 .Chrome

Le chrome augmente la dureté, la résistance à la corrosion et à l'oxydation ainsi que la résistance aux chocs. En contre partie, il diminue un peu la ductilité de l'acier. Le chrome est l'élément essentiel des aciers inoxydables.

#### 4 .Nickel

Le nickel améliore la résistance à la traction et la ductilité de l'acier. Il résiste aux effets de la chaleur et de la corrosion.

#### 5 .Le phosphore

Il existe en solution dans la ferrite et provoque un grossissement des grains, ce qui augmente la fragilité de l'acier à froid. En se ségréguant facilement, il contribue à l'hétérogénéité de l'acier. Sa teneur doit être limitée de 0,025 à 0,040 %. Le phosphore

augmente la limite élastique et la charge à la rupture tout en, diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

On trouve le phosphore en grande quantité dans les aciers d'usinage à décolletage (tournage) rapide ou à faible teneur en carbone, car il améliore les qualités d'usinage. Plus la proportion de phosphore augmente, moins l'alliage est résistant aux chocs.

### 6 .Le soufre :

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de **MnS** et de **FeS**. A Froid, le soufre amène également une diminution importante de la résistance au choc. La teneur limite en soufre doit être inférieure à (0,035 à 0,060%), généralement inférieure à  $\frac{1}{4}$  de la teneur en manganèse. Parfois, on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 à 0,025 %), afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02 %), est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité. Cependant, plus l'alliage contient de soufre, moins il est facile à souder.

### 7 .Le silicium

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 à 0,3 %, il existe surtout à l'état de solution dans la ferrite. Son influence n'est pas très importante sur les propriétés de l'acier (Il accroît la résistance à la dureté, mais pas le manganèse.), mais rend toutefois, l'acier plus homogène à la coulée, en s'opposant, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures, l'un des défauts les plus fréquents, qu'on rencontre après solidification de l'acier. Sa présence en grande quantité permet une bonne désoxydation de l'acier.

### 8 .Cuivre

Le cuivre réduit l'usinabilité par forgeage mais n'influence pas le soudage réalisé à l'arc électrique ou par procédé oxyacétylénique. Il améliore la résistance à la corrosion atmosphérique lorsqu'il est présent dans l'alliage dans une proportion supérieure à 0,15%.

En plus de tous ces éléments, on peut citer Le plomb qui améliore l'usinabilité de l'alliage, le vanadium qui affine les grains primaire donc la structure de coulée, il favorise l'aptitude au soudage des aciers, enfin, le zirconium qui est un générateur de carbures, utilisé en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénitration et désulfuration.



Chapitre IV

### Introduction [24, 25, 26]

La fabrication des diverses structures mécaniques et le rôle fonctionnel que joue chaque pièce dans son assemblage, exige en premier lieu, de connaître le comportement mécanique du matériau vis-à-vis des sollicitations, qui sont imposées par le milieu extérieur. Les essais mécaniques, sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module de Young, à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

Cependant l'identification expérimentale du comportement mécanique d'un matériau est par nature, une opération délicate car elle ne peut s'effectuer qu'à partir d'essais mécanique sur des éprouvettes qui, par leur taille normalisés, doivent être considérées comme des structures.

Les essais son effectués en laboratoire ou sur le terrain, ils apportent des renseignements précis et fiables, sur les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre qui sont réglementés par des normes internationales pour la plupart.

On peut citer par exemple :

- ✓ Essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...);
- ✓ Essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...);
- ✓ Essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...);
- ✓ Essais sur les fluides (viscosité, écoulements...).

Nous définissons dans le cadre de ce travail, trois essais mécaniques fondamentaux (traction, dureté, résilience,...), qui intéressent d'une voie directe ou indirecte le comportement mécanique des matériaux, que nous étudions dans ce qui suit.

### I/ Essais de traction [24]

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé pour la caractérisation des matériaux. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts  $F$  de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette, L'essai est le plus souvent normalisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique.

#### I. Description générale d'une machine de traction [27]

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure, à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. Selon, ce qui peut-être proposé, par le système de pilotage.

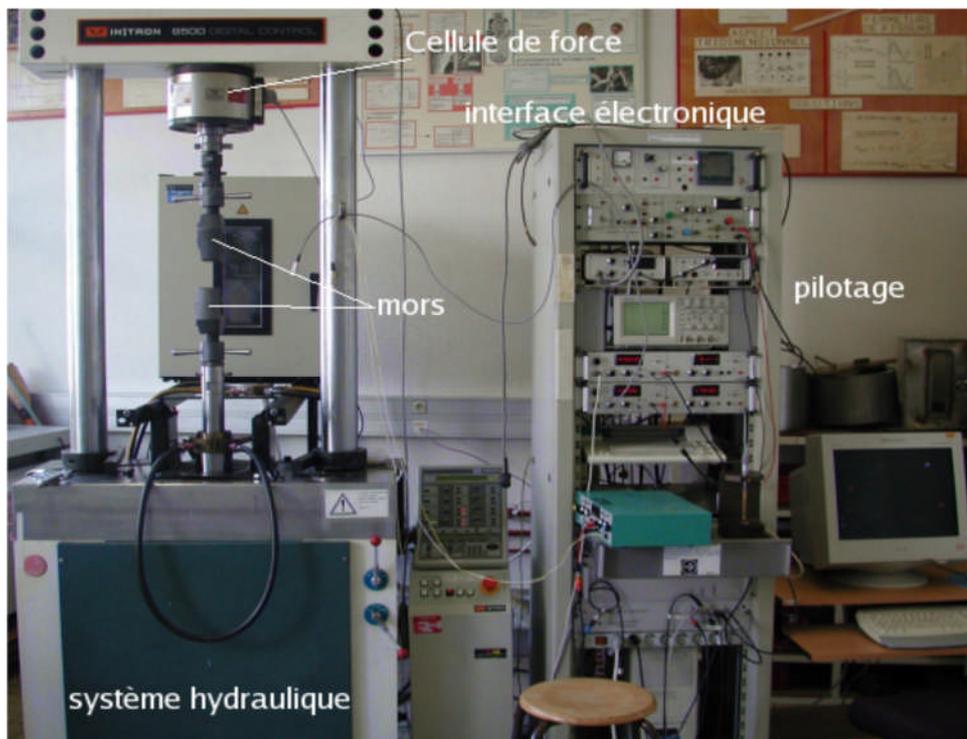


Figure 27 : machine de traction hydraulique [27]

## II. Eprouvettes [26]

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.

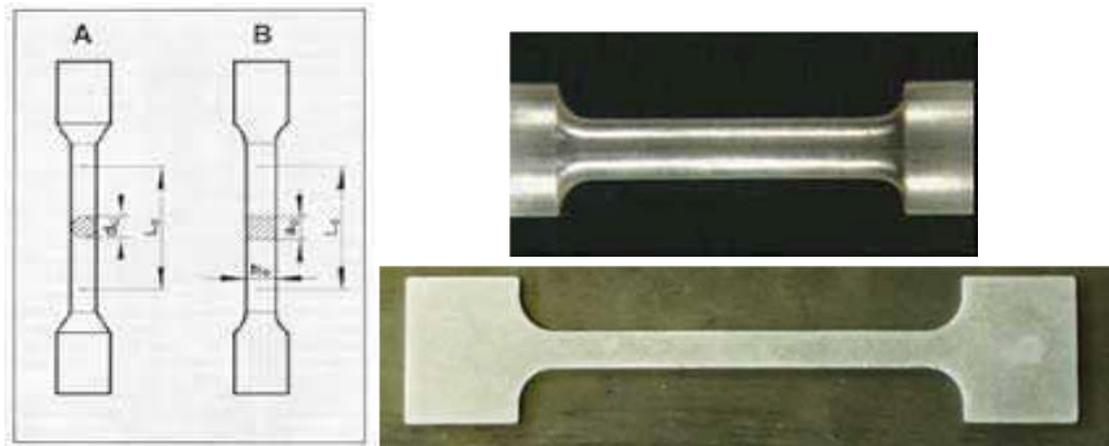


Figure 28 : Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique. [26]

Les extrémités, ou têtes, de l'éprouvette ont une section supérieure à  $S_0$ , ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai. La géométrie des têtes dépend du mode de fixation utilisé (*serrage sur têtes lisses, filetage ou épaulement*). Le raccordement entre la partie centrale et les têtes doit toujours être progressif afin de minimiser l'effet de concentration des contraintes. L'éprouvette comprend toujours, entre deux repères séparés par une distance  $l_0$ , une section constante  $S_0$ .

## III. Courbes conventionnelle et rationnelle de traction

L'essai de traction, nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'une courbe dite courbe de traction du matériau.

Dans le cas général, les machines d'essai fournissent une courbe dite conventionnelle en termes d'efforts et de déplacement puisqu'on rapporte les efforts  $F$ , à la valeur initiale  $S_0$  de la section, que l'on cherche, ensuite à convertir, en une courbe Contrainte-Déformation.

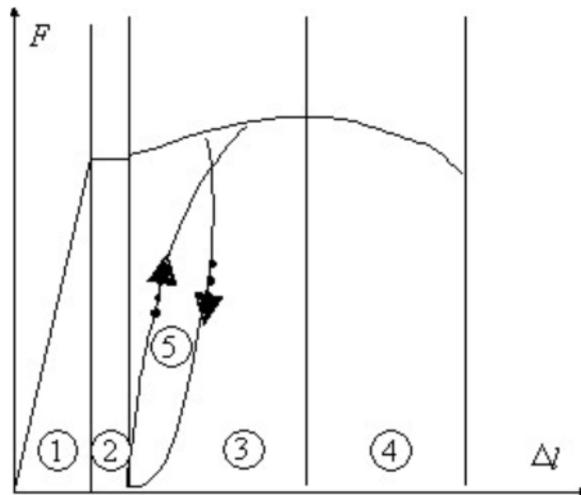


Figure 29 : courbe de traction conventionnelle  $F / \Delta L$  [26]

L'essai de traction met habituellement en évidence trois stades principaux dans l'évolution du comportement du matériau :

- ✓ Un comportement élastique linéaire ou non (domaine 1), pour lequel aucune déformation résiduelle ne se maintient après décharge.
- ✓ Un stade de déformation plastique parfait (domaine 2) et avec écrouissage (domaine 3) caractérisé par une déformation résiduelle irréversible après décharge, l'ensemble du comportement étant complètement indépendant du temps, notamment de la vitesse de chargement.
- ✓ Une étape d'endommagement (domaine 4) conduisant à la rupture. L'endommagement se manifeste par l'altération progressive des propriétés mécaniques qui accompagnent, habituellement pour d'assez grandes déformations ou sous sollicitations cycliques, la formation et la croissance de microfissures et microcavités, altération pouvant aller jusqu'à la rupture. Selon les matériaux, la rupture peut se produire plus ou moins tôt, notamment en stade élastique ou plastique avant endommagement.

Cependant, dans bien des cas, le temps intervient et la courbe d'essai obtenue est en fonction de la vitesse de sollicitation (domaine 5). Ainsi, un arrêt à contrainte constante s'accompagne d'une déformation de fluage, un arrêt à déformation constante s'accompagne d'une relaxation de la contrainte, une sollicitation cyclique d'hystérésis. C'est la manifestation de la viscosité du matériau viscoélasticité ou visco-élasto-plasticité. [22]

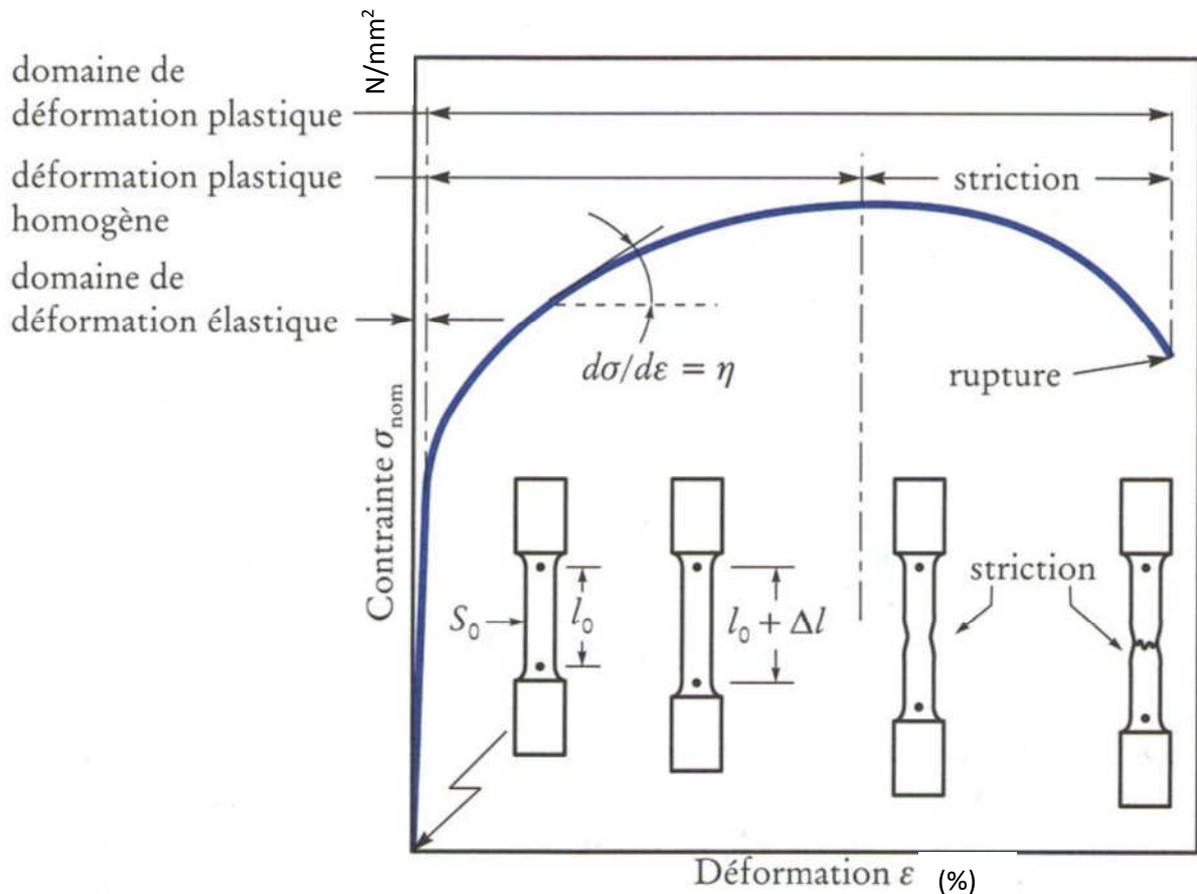


Figure 30 : présentation d'une courbe de traction Contrainte/Déformation (matériau ductile) [22]

$\Delta L$  : l'allongement qui est égale à :  $L - L_0$  [mm].

$L_0$  : Longueur initiale de l'éprouvette, au repos (sans charge) [mm].

$L$  : Longueur de l'éprouvette mesurée, sous charge  $F$  [mm].

$F$  : Force exercée par la machine d'essai, sur l'éprouvette [N].

$\sigma$  : est contrainte appliquée à l'éprouvette  $\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ N/mm}^2$

#### IV. Lecture et interprétation de la courbe de traction

La courbe de traction rationnelle délivre donc des informations plus importantes que l'essai classique. Cependant les propriétés de traction sont souvent définies, à partir d'une courbe conventionnelle de traction.

### ❖ Zone élastique

Pendant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire et obéit la loi de **Hooke**. Théoriquement, la pente de la droite est égale au **module de Young  $E$**  ; en pratique, le module d'élasticité est très rarement mesuré de cette façon, car, dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, et la précision des mesures laisse alors à désirer. La limite de ce domaine est marquée par une propriété importante. C'est la limite élastique  **$R_e$**

✓ Résistance Elastique  $R_e = \frac{F_0}{S_0} \begin{cases} R_e \text{ en [MPa]} \\ F_0 \text{ en [N]} \\ S_0 \text{ en [mm}^2\text{]} \end{cases}$

✓ Module d'Young  $E = \frac{L_0}{S_0} \times \text{tg}\alpha \text{ [MPa]} \quad \left\{ \text{tg}\alpha = \frac{\Delta F}{\Delta(\Delta L)} \right.$

✓ La déformation  $\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [%]}$

✓ La loi de Hooke  $\sigma = E \times \epsilon \text{ [MPa]}$

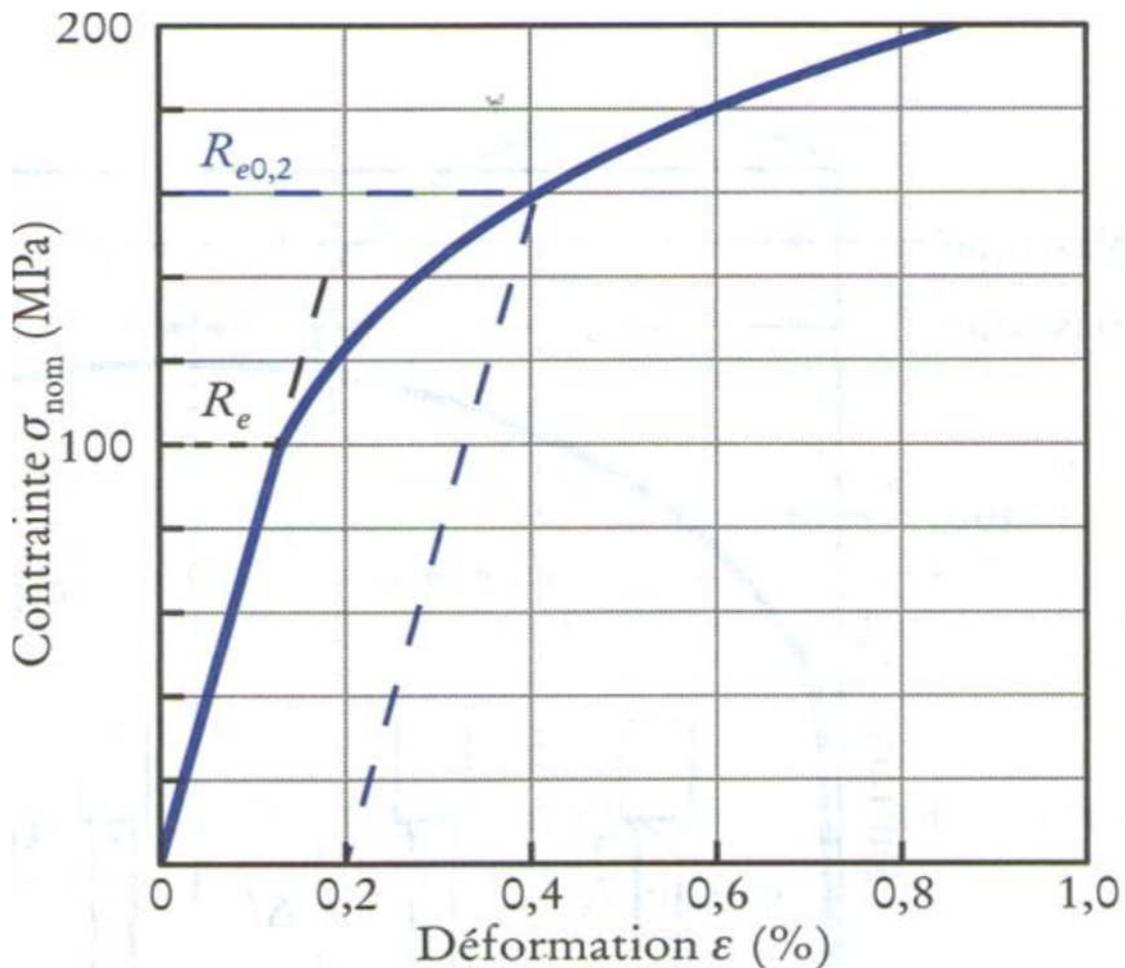


Figure 31 : courbe de traction Conainte/Déformation avec la limite conventionnelle de traction [27]

En toute rigueur, la limite d'élasticité **Re** correspond a la contrainte à partir de laquelle le comportement du matériau s'écarte de la loi de Hooke, c'est-à-dire au moment où apparait la première déformation plastique irréversible. La limite de proportionnalité, ou limite d'élasticité vraie **Re**, dépend donc de la précision que l'on a sur la mesure de l'allongement. On lève toute ambiguïté en définissant une limite conventionnelle d'élasticité à **0,2 %**, notée **Re0,2**: Elle définit la contrainte à laquelle correspond une déformation plastique permanente égale à **0,2 %**.

#### ❖ Zone plastique

Dans la seconde phase de l'essai, le comportement du matériau n'est plus linéaire puisque la déformation élastique est suivie de la déformation plastique qui se manifeste de deux façons :

1) **Déformation plastique homogène** : Dans ce sous-domaine qui est compris entre la limite élastique et se poursuit jusqu'à la valeur maximale de la contrainte, le matériau se consolide par phénomène d'érouissage. Le taux de consolidation est la pente de la courbe  $\sigma=(\epsilon)$ , diminue quand la contrainte augmente et devient nul à la valeur maximale de la contrainte nominale appliquée. Cette dernière caractérise, La résistance à la traction  **$R_m$**  qui se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction. Les matériaux fragiles n'ont pas de domaine de déformation plastique, dans ce cas, la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont confondues.  $R_m = \frac{F_M}{S_0} [N/mm^2] \quad [22]$

2) **Déformation plastique hétérogène (localisée)** : Une fois que la courbe de traction ait atteint un maximum  **$R_m$** , la contrainte nominale diminue bien que l'allongement continue de croître. Quand l'allongement augmente au-delà de celui qui correspond à la charge maximale atteinte, un nouveau phénomène apparaît localement, la consolidation du matériau ne peut plus compenser l'augmentation de la contrainte. La déformation n'est plus homogène, mais elle est localisée dans la zone de striction. Ce phénomène se traduit par une réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette, se produisant au cours de l'essai. Il est caractérisé par le coefficient de striction  **$Z$** .

$$Z = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \begin{cases} S_0 \text{ la section initiale de l'éprouvette} \\ S_f \text{ la section finale de l'éprouvette} \end{cases} (mm^2)$$

Finalement, la rupture se produit dans la zone de striction, là où la section est la plus faible. Le comportement ductile du matériau, il peut être mis en relief à partir de l'allongement à la rupture  **$A\%$** . Cette caractéristique peut être lue directement sur la courbe de traction ou mesurée sur l'éprouvette rompue. Il est nul pour les matériaux fragiles. [23]

$$A\% = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

## II/ Essai de dureté

L'essai de dureté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie (*indenteur*) et de la surface d'un échantillon.

Plusieurs domaines de dureté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée, *Bückle* a introduit en 1965 la notion de la **macro-dureté** pour des charges supérieures à 3/5 *kgf* et celle de **micro-dureté** pour des charges inférieures à 200 *gf*. Le domaine intermédiaire étant celui de la dureté sous charge réduite. Dans les années 80, est apparu le domaine de nano-dureté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1*gf*. [24, 28]

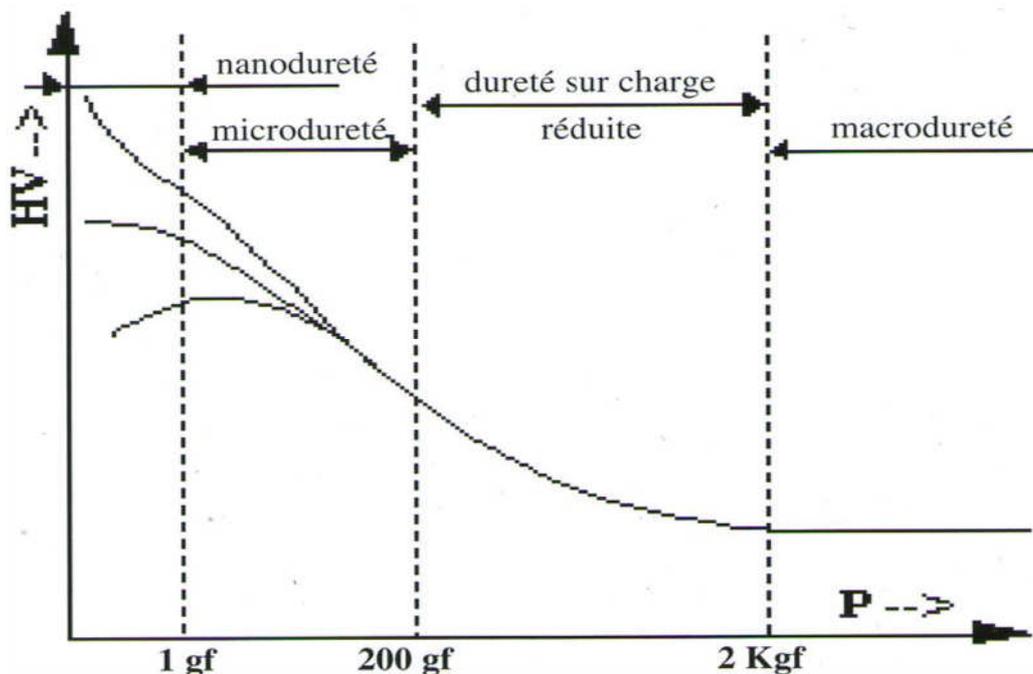


Figure 32 : Définitions des différents domaines de dureté [28]

De très nombreuses méthodes d'évaluation de la dureté ont été proposées. Les plus courantes et les plus familières consistent à mesurer la résistance à la pénétration, mais les essais par rayage, par rebondissement ou par oscillations de pendules peuvent dans certains cas offrir des possibilités intéressantes.

La littérature rapporte l'existence de plusieurs critères de dureté qui dans la majorité des cas sont classés selon :

- ✓ La géométrie de l'indenteur (*pyramide, cône, sphère etc.*)

- ✓ Le type et le mode de sollicitation, suivant le comportement viscoélastique que l'on désire mettre en évidence : fluage, recouvrance, relaxation ou amortissement.
- ✓ Les normes et les appareils correspondant à chaque classe.
- ✓ La taille de l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface.

Il existe différents essais de dureté, dans notre cas, on s'intéressera aux :

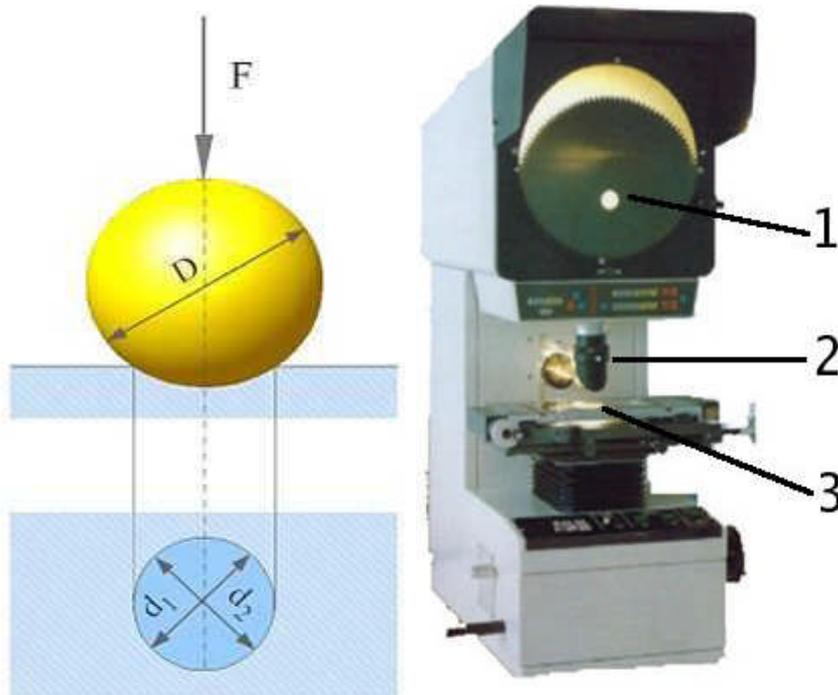
### 1) Essais par indentation

Les essais d'indentation évaluent la "dureté" du matériau en mesurant la pression de contact pendant l'enfoncement d'un indenteur (pyramidal, conique ou sphérique). La dureté est calculée soit après l'essai, par mesure de la surface de l'empreinte, soit pendant l'essai, par mesure de l'enfoncement de l'indenteur, dans les deux cas en fonction de la charge appliquée. Le résultat obtenu a la dimension d'une pression, mais s'exprime dans une unité liée à la géométrie de l'indenteur qui s'écrit : H (pour hardness, dureté en anglais) suivi d'un caractère indiquant le type d'indenteur utilisé V pour Vickers (tête pyramidale) ou B pour Brinell (tête sphérique).

Ces essais sont faciles à mettre en œuvre, puisqu'ils ne nécessitent qu'un polissage et peuvent être réalisés sur des échantillons de petite taille.

#### 1-1. Essai de dureté Brinell

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène. Le diamètre  $D$  utilisé peut valoir  $1\text{ mm}$ ,  $2,5\text{ mm}$ ,  $5\text{ mm}$  et  $10\text{ mm}$ . La charge  $F$  (égale à  $30D^2$  au plus  $29\,420\text{ N}$ ), appliquée sur le métal est maintenue pendant  $15$  à  $30\text{ s}$  selon le solide. Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre  $d$ .



**Figure 33: Principe de dureté brinell.et dispositif d'essai de macrodureté. 1) écran de visualisation de l'empreinte 2) indenteur platine porte-échantillon. [24]**

Cette mesure peut se faire à 0,05 mm près, soit à l'aide d'une réglette spéciale dite réglette Le Châtelier, soit, beaucoup plus souvent, avec une lunette à oculaire micrométrique d'un grossissement de l'ordre de 20. Le diamètre  $d$  est la moyenne de deux mesures effectuées à 90 ° l'une de l'autre. La dureté Brinell s'exprime, par le rapport de la charge  $F$  à la surface  $S$  de la calotte sphérique imprimée dans le métal :

Avec :

- $F$  (kgf) charge,
- $D$  (mm) diamètre de la bille,
- $d$  (mm) diamètre de l'empreinte. Avec  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

La dureté s'exprime par un nombre suivi d'un premier chiffre donnant le diamètre de la bille en millimètres et d'un second indiquant la charge en kilogrammes-force. Toutefois, si l'essai a été réalisé en un temps différent de 10 à 15 s, un troisième chiffre doit l'indiquer.

**Exemple :**

- ❖ **350 HB 5/750** correspond à
  - ✓ une dureté Brinell de 350 mesurée à l'aide d'une bille de 5 mm de diamètre, sous une charge de 750 kgf.

### 3-2. Essai de dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère *HRC* (figure 34 de droite), ou bien sphérique pour le critère *HRB* (figure 43 gauche.) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet  $120^\circ$  à pointe arrondie sphérique de rayon de  $0,2\text{mm}$ . Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre  $1,588\text{ mm}$  ou  $3,175\text{mm}$ . L'essai se déroule en trois phases.

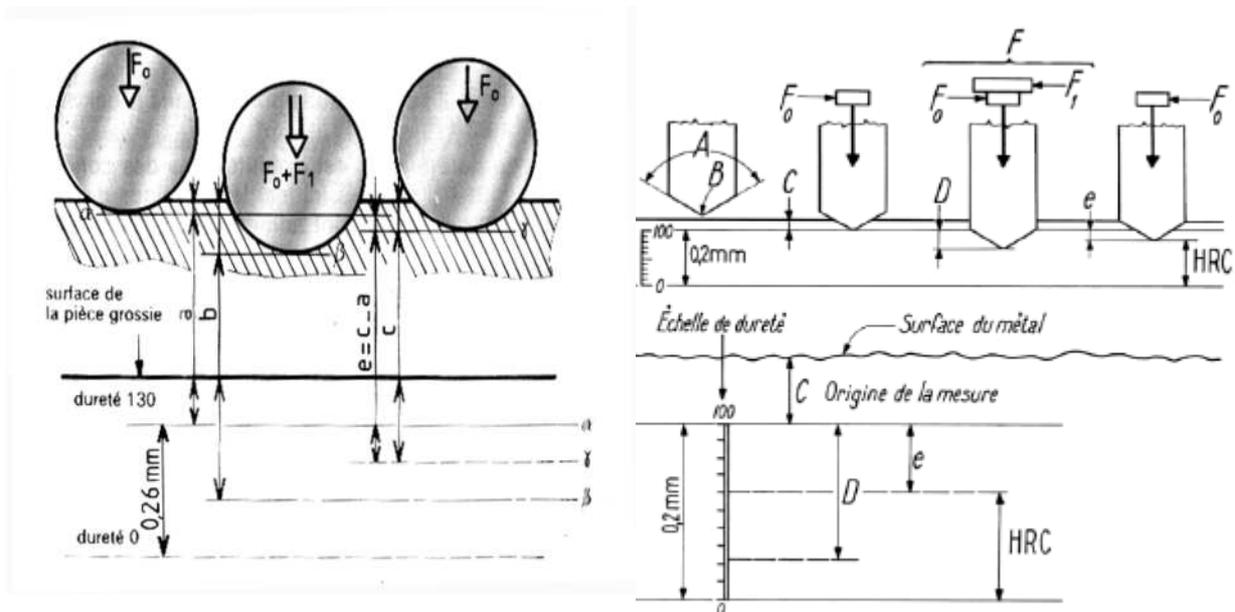
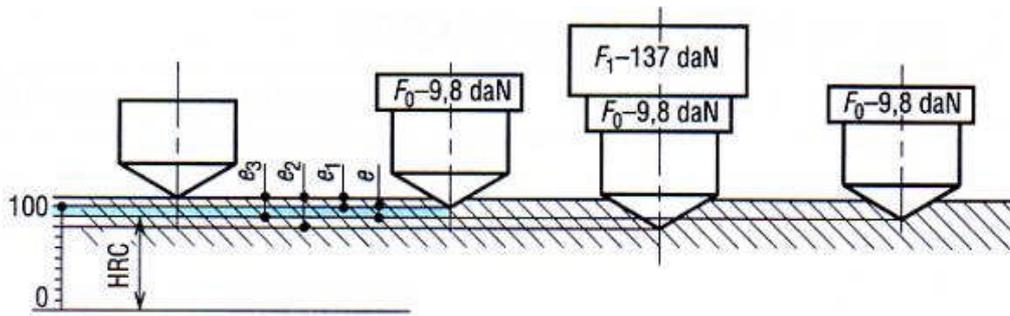


Figure 34 : Principe de mesure de la dureté Rockwell : gauche : échelle HRB, Droite : échelle HRC. [28]

- i) Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale  $F_0 = 98\text{N}$  ( $10\text{ kgf}$ ). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.
- ii) Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire  $F_1$ , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur  $P$ .
- iii) Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force  $F_1$  est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

Pour éviter les effets liés à l'enclume, sur laquelle repose la pièce, l'épaisseur de cette pièce ou de la couche superficielle à essayer ne doit pas être inférieure à  $8h$ . En aucun cas, une déformation ne doit être visible sur la face opposée à celle de la mesure.



$$e = e_3 - e_1$$

$$1 \text{ division} = \frac{0,2}{100} = 0,002$$

$$\text{HRC} = (100 - e) = 100 - \frac{e_3 - e_1 \text{ (mm)}}{0,002}$$

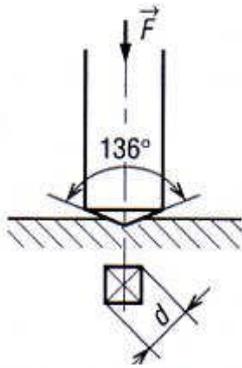
$F_0$  = charge initiale (référence de la mesure)  
 $F_1$  = surcharge  
 $F$  = charge totale  
 $e$  = accroissement rémanent de la profondeur de pénétration

Symboles	Rockwell C HRC	Rockwell B HRB	Rockwell E HRE	Rockwell F HRF
Pénétrateurs	Cône en diamant	Bille en acier trempé HV ≥ 850		
		D = 1,59 1/16 pouce	D = 3,175 1/18 pouce	D = 1,59 1/16 pouce
Charge initiale $F_0$ daN	9,8	9,8	9,8	9,8
Surcharge $r_1$ daN	137,3	88,3	88,3	49
Dureté	100 - e	130 - e		

Figure 35 : lois de mesure de la dureté Rockwell : HRC et HRB. [28]

### 3-3. L'essai de dureté Vickers

Le principe est le même que celui de l'essai Brinell, Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte, avec un pénétrateur en diamant, de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136°, sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur. L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est que la loi de similitude est automatiquement respectée, quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables, donc des valeurs identiques pour la dureté. De plus, l'avantage du diamant est l'absence de déformation du pénétrateur, quand on mesure des duretés élevées.



La charge normale d'essai  $\vec{F} = 29,4$  daN est appliquée pendant 10 à 15 secondes.

On peut également employer l'une des charges suivantes :

4,9 - 9,8 - 19,6 - 49 - 78,4 - 98 daN.

Avec des charges inférieures à 4,9 daN on se trouve dans le domaine des microduretés.

Les charges supérieures à 98 daN sont parfois utilisées avec une pyramide en acier trempé sur des matériaux de faible dureté.

$d$  = diagonale de l'empreinte

$$HV = \frac{F}{S} \rightarrow \begin{array}{l} \text{charge de l'essai (daN)} \\ \text{aire de l'empreinte (mm}^2\text{)} \end{array}$$

$$HV = \frac{2 F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d\alpha^2}$$

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

$\frac{HV}{10}$  charge cruciale 9,8 daN appliquée pendant 10 à 15 secondes.

Figure 36: Principe de mesure de la dureté Vickers [28]

La dureté Vickers HV est le quotient de la charge d'essai  $F$  (49,03/98,07 /196,1/ 294,2/ 490,3, 784/ 980,7 N) par l'aire de l'empreinte de diagonale moyenne  $d$ , c'est-à-dire :

Si on prend La force  $F$  étant exprimée en (kgf), le diamètre de l'empreinte  $d$  en mm et la dureté Vickers est exprimée en (kgf /mm<sup>2</sup>) selon la relation suivante :

$$HV = \frac{1,8454 \times P}{d^2}$$

avec:  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

## 2) Essais de microdureté [24, 28]

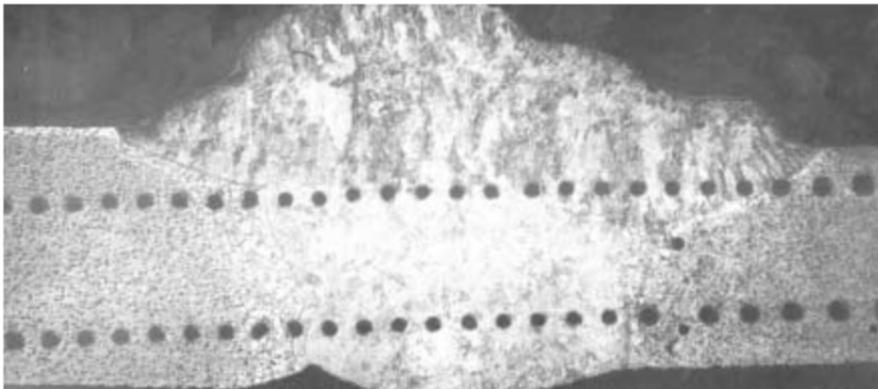
Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté précédemment décrits des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelque fois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants. La pénétration des plus petites micros empreintes est de l'ordre de 0,5  $\mu\text{m}$ .

Les mesures de microdureté, pour donner des résultats satisfaisants, doivent être faites en précisant tous les paramètres : charge appliquée, vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage), structure micrographique ; elles nécessitent des précautions multiples, comme l'élimination des vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme du diamant, caractéristiques optiques, précision mécanique).

Dans ces conditions, la microdureté permet d'obtenir des résultats extrêmement intéressants, en ce qui concerne en particulier :

- ✓ les petits échantillons (aiguilles, fils, rubans minces) ;
- ✓ les couches superficielles (couches cémentées, nitrurées, dépôts électrolytiques) ;
- ✓ les matières dures et fragiles (carbures, verres, émaux) susceptibles de se fissurer, sauf sous très faible charge ;

De nombreux **microduromètres** ont été mis au point, comportant un dispositif assurant le maintien sans aucun déplacement de la pièce, un appareillage pour appliquer la charge à vitesse contrôlée, un microscope de puissance élevée.



**Figure 37 : filiations de microdureté Vickers au travers d'un joint soudé de 5mm [20]**

### 3) Nanodureté (indenteur Berkovitch)

Les essais de nanodureté permettent de mesurer des empreintes de taille inférieure au micron (sous la limite de résolution de la microscopie optique). Le mode opératoire de ces essais est un peu différent : le dispositif expérimental effectue une première indentation à faible charge pour localiser la surface, puis, la mesure à pleine charge. La courbe d'indentation est enregistrée et la profilométrie des surfaces peut-être mesurée, par exemple par microscopie à force atomique.

Cette méthode permet de mesurer la dureté des grains un par un dans un matériau biphasé, ou l'efficacité de traitements thermomécaniques qui portent sur de très faibles profondeurs.

### III/ Essai de résilience

#### I. Introduction [28]

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Cette rupture se produit à plus ou moins grande vitesse, par propagations de fissures existant dans le matériau. Il existe un autre type de rupture dite fragile, elle est caractérisée par la propagation très rapide des fissures (consommation d'énergie faible) soit au travers des grains, soit le long des joints de grains. On parle donc du choc, et qui dit choc dit résilience.

##### a- La résilience [29]

La résilience est la capacité d'un matériau d'emmagasiner de l'énergie quand il se déforme d'une manière élastique et de libérer cette énergie quand la charge est supprimée.

Elle est caractérisée par l'essai de résilience.

##### b- l'essai de résilience [30]

L'essai de résilience a été élaboré pour prendre en compte les phénomènes de rupture. C'est le moyen le plus classique pour caractériser la fragilisation du matériau, sous l'action d'un choc (essai de flexion par choc) sur une éprouvette entaillée. Il est fréquemment dénommé essai de résilience CHARPY ou même essai CHARPY. Met au point par Georges CHARPY en 1901 avec la machine (mouton CHARPY) qui permet de réaliser cet essai de résilience. Cet essai a permis d'améliorer la qualité des aciers et d'éviter les accidents liés à leur possible fragilité.

Il constitue à mesurer l'énergie nécessaire pour casser une éprouvette préalablement entaillée.

On détermine l'énergie absorbée  $W$  en **(Joule)**, dont on déduit la résilience.

La résilience est exprimée en (Joules par  $\text{cm}^2$ ), l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

On peut aussi citer selon la norme **ASTM E23-96** qui, en plus de l'essai Charpy classique, décrit l'essai de résilience Izod. Dans l'éprouvette a une longueur de 75 mm (au lieu de 55 mm pour l'éprouvette Charpy) et l'entaille en V est pratiquée à 28 mm de l'une des

extrémités. L'autre extrémité est encastrée verticalement jusqu'au niveau de l'entaille. Un couteau de choc spécial vient frapper la face entaillée à l'extrémité libre. Cet essai n'est pas pratiqué en Europe. [29]

**Résilience = énergie absorbée par la rupture  $W$  (joules) / section au niveau de l'entaille ( $\text{cm}^2$ )**



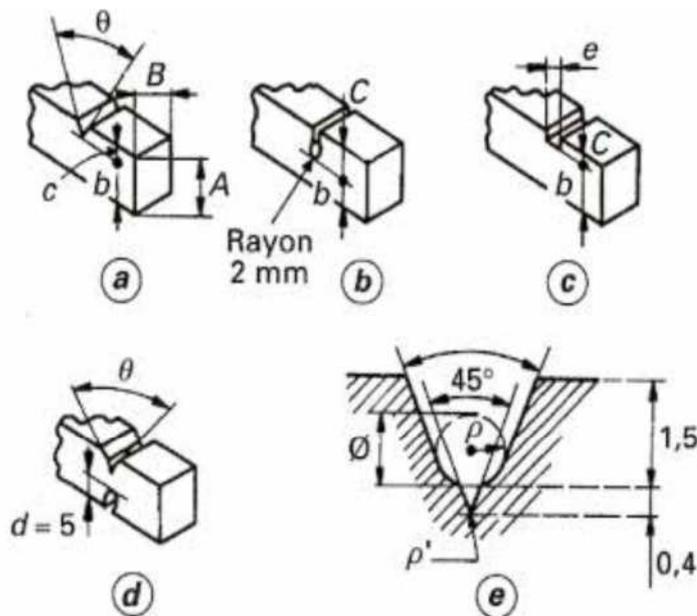
Figure 38 : Mouton de Charpy [29]

## II. éprouvettes d'essai de résilience [31] [32]

On utilise en général un échantillon en forme de barreau de section carrée et de dimension standard (10mm x 10mm x 55mm). L'entaille peut-être soit en V (angle de 45° et de profondeur 2mm), soit en U de profondeur 5mm et de rayon en fond d'entaille de 1mm. Comme il existe d'autres entailles représentées dans le tableau et la figure ci-dessous.

Tableau N° 7: Dimensions des différentes éprouvettes de résilience [32]

Eprouvettes	Dimensions							
	A (mm)	B (mm)	C (mm)	b (mm)	d (mm)	$\rho$ (mm)	e (mm)	$\theta^\circ$
Charpy U-UF	10	10	5	5	...	1	1à2	...
Mesnager	10	10	2	8	...	1	2	...
Charpy V	10	10	2	8	...	0,25	...	45
Izod	10	10	2	8	...	0,25	...	45
Schnadt(cohérencie)	10	10	2	8	5	0,5	...	45



Les dimensions de ces éprouvettes sont données dans le tableau 11  
Les cotes indiquées ici sont exprimées en millimètres

- (a) éprouvette Izod ou Charpy V
- (b) éprouvette UF
- (c) éprouvette Mesnager
- (d) éprouvette Schnadt
- (e) détail de l'entaille Schnadt

Figure 48 : différentes éprouvettes Charpy [28]

### III. Désignation des aciers en fonction de leur résilience

La norme **NF EN 10025** définit la désignation des aciers de construction non alliés.

Elle a la forme : Lettre - Nombre - Symbole no 1 - Symbole no 2.

#### Exemple :

**S 275 J2** désigne un acier de construction générale ayant une résistance élastique de 275 MPa et une résilience minimale garantie de 27 J à -20 °C.

Le symbole N° 1 définit la résilience minimale garantie de l'acier à une température donnée.

**Tableau N°8 : symboles de désignation des aciers selon la résilience et température d'essais [14]**

	Energie de rupture (J)			Température d'essai
	27 J	40 J	60 J	°C
Symboles	JR	KR	LR	20
	JO	KO	LO	0
	J2	K2	L2	- 20
	J3	K3	L3	- 30
	J4	K4	L4	- 40
	J5	K5	L5	- 50
	J6	K6	L6	- 60



Chapitre V

I/ L'acier St60-2

I. Identification de l'acier St60-2 [suivant la norme EN 10277-2]

C'est un acier à usage courant en mécanique générale, de qualité non allié. Laminé à chaud ou à froid. L'analyse chimique n'est pas définie par la norme et ne garantit pas d'éventuels traitements thermiques.

Il offre une bonne résistance mécanique ( $R_m$ ), satisfaisante à des conditions normales et comporte une garantie de résistance à la température ambiante, avec une soudabilité médiocre et non garantie.

Le tableau N°9 ci-dessous regroupe la représentation de cet acier, par, les différentes normes.

Tableau N°9 : représentation selon différentes normes de l'acier St62-2

Norme	AFNOR	DIN	NF EN 1027-1
Nuances	A60-2	St60-2	E335 (1.0060)

II. Domaines d'application

L'acier **St60-2** est utilisé, pour la fabrication des Pièces soumises à des fortes pressions de surface, vis sans fin, pignons, clavettes, axes, bagues... etc.

III. Composition chimique

Le tableau N°10 ci-dessous donne la composition chimique de notre acier selon la norme EN 10277-2.

Tableau N°10: composition chimique de l'acier ST60-2

Éléments	C	P	S	Mn	N
Teneur max (%)	NON Communiqué	0,045	0,045	NON Communiqué	0,0012

IV. caractéristiques mécanique

Dans le tableau N°11 en regroupe les caractéristiques moyennes de l'acier **St60-2** à étudier.

Tableau N°11 : caractéristiques mécanique moyennes

$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ N/mm <sup>2</sup> (valeur minimal)	$A_5$ % (valeur minimal)	Dureté HB
510 / 710	295	6	169/211

## II/ L'acier St52-3

### I. Identification de l'acier St52-3 [suivant la norme EN 10277-2]

C'est un acier de construction laminé à chaud, de qualité non allié. Pour emplois structuraux. D'un point de vue général il s'agit d'une nuance apte au soudage.

Le tableau ci-après donne, la représentation de l'acier **St52-3**, selon les différentes normes

**Tableau N°12 : représentation selon les différentes normes de l'acier ST52-3**

Norme	DIN	ASTM	NF EN 1027-1
Nuances	ST52-3	Gr.50	S355J2 (1.0577)

### II. Domaines d'application

Cet acier est utilisé dans les domaines suivants :

Acier de base pour profils, dimensions plates, tubes et éléments de constructions en acier.

### III. Composition chimique

Le tableau ci-dessous nous révèle, la composition chimique de l'acier **St52-3** à étudier, selon la norme EN 10277-2

**Tableau N°13 : composition chimique de l'acier St52-3**

Eléments	C	P	S	Si	Cu	Mn	N
Teneur max (%)	0.22	0.035	0.035	0,60	0,60	1,70	NON Communiqué

### IV. caractéristiques mécanique

Dans le tableau N°14 en regroupe les caractéristiques moyennes de l'acier **St52-3** à étudier.

**Tableau N°14 : caractéristiques mécanique moyennes de l'acier ST52-3**

Rm N/mm <sup>2</sup>	Rp <sub>0.2</sub> N/mm <sup>2</sup> (valeur minimal)	A% (valeur minimal)	Dureté HB
500 /770	355	9	146 /187



Partie pratique



### I. La composition chimique

#### 1. Introduction

Le but de cette analyse est, d'une part l'identification des éléments et d'autre part, la détermination quantitative de ces éléments, puis les comparer à la composition donnée par la norme EN 10277-2, dans le chapitre V.

Dans le cadre de notre travail, la composition chimique est réalisée au niveau du laboratoire de la fonderie, de la **Société National des véhicules Industriel (SNVI)**, sise à **ROUBA**.

Pour identifier et déterminer les différents éléments constitutifs, ils on utiliser un spectromètre à émission optique. La quantité de carbone est déterminée par un autre appareillage (carbone determination W12).

#### 2. Prélèvement de l'échantillon

Le mode de prélèvement de l'échantillon est une étape essentielle pour le dosage des éléments. On doit veiller à éliminer d'éventuelles pollutions durant le prélèvement des copeaux.

Dans notre cas, les copeaux sont prélevés sur les échantillons des aciers **St60 -2** et **St52-3** utilisé pour le teste de dureté.

#### 3. Les résultats obtenus

Le tableau 8 suivant, nous donne les compositions chimiques de nos deux aciers

**Tableau N°15 : compositions chimiques obtenus des aciers ST60-2 et ST52-3**

Composantes	C	Mn	Si	Cr	P	S
Aciers						
<b>ST 60-2</b>	0.37	0.71	0.10	0.11	0.08	0.005
<b>ST 52-3</b>	0.14	0.79	0.11	0.09	0.08	0.009

Le tableau ci-dessous donne la composition chimique des deux aciers donné par la norme EN 10277-2

**Tableau N°16 : la composition chimique des aciers St60-2 et St52-3**

	Eléments	C	P	S	Si	Cu	Mn	N
Teneur max (%)	<b>St52-3</b>	0.24	0.035	0.035	0,60	0,60	1,70	NON Communiqué
	<b>St60-2</b>	Non communiqué	0,045	0.045	Non communiqué			0.0012

### 4. conclusion

Les résultats de la composition chimique des deux aciers étudiés, obtenus par l'analyse chimique, vérifie la fourchette exigé par la norme **EN 10277-2** , à l'exception du phosphore qui est supérieur à la norme. Le taux de carbone est élevé dans l'acier **St60-2** en comparaison avec celui de l'acier **St52-3**. Tandis que les autres éléments d'alliages très proches ou identiques.

## II. Examen métallographique

### 1. Introduction

La métallographie microscopique (micrographie) a pour but de mettre en évidence la structure de l'échantillon, en visualisant les différentes phases et des inclusions non métalliques lors de l'observation au **microscope optique** ou **électronique à balayage**.

Selon la norme **NF A05-150**, des règles strictes sont imposées pour le prélèvement et la préparation de la surface.

### 2. Principe du Microscope Optique (MO)

Le principe du microscope optique repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons et l'agrandissement des images effectué par un jeu de lentilles.

### 3. principe du Microscope électronique à Balayage (MEB)

Son principe est basé sur les interactions électrons-matières qui produisent des électrons rétrodiffusés. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon, qui nous permet d'explorer la surface avec une haute résolution.

### 4. Prélèvement de l'échantillon

Des précautions doivent être prise pour éviter une modification de la structure de l'échantillon, résultant soit d'un échauffement, soit de déformation entraînent un écrouissage.

### 5. Préparation de la surface pour l'examen

L'échantillon est coupé de façon à obtenir une surface d'examen généralement comprise entre 1 et 10 *mm*. Avant la visualisation la surface doit être polie jusqu'à l'obtention d'une surface lisse (surface miroir), puis attaqué avec une solution chimique pour faciliter la visualisation des différents constituants.

#### 5.1. Polissage

Le polissage se fait généralement en deux étapes (pré-polissage et polissage de finition) et sous un jet d'eau, pour évacuer les copeaux et la chaleur dû au frottement.

### a- Pré-polissage

Il se fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométries plus en plus fines (de 400 à 4000).

### b- Polissage de finition (en alumine)

En général, il existe trois modes de polissage de finition :

- 1- **Polissage électrolytique** : basé sur le principe de la dissolution anodique. Son avantage est de supprimer l'écaillage superficiel du pré-polissage.
- 2- **Polissage à la pâte diamantée** : ce type de polissage consiste à frotter l'échantillon sur un disque en feutre ou en drap, contenant un agent de polissage étant une pâte ou une suspension diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque.
- 3- **Polissage à l'alumine** : dans notre cas, on a utilisé le polissage à l'alumine, qui consiste à frotter l'échantillon sur un disque en feutre ou en drap imbibé d'eau et d'alumine 3 $\mu$ m.

### 5.2. Attaque chimique

Après avoir une surface de bonne qualité 'miroir', on l'attaque avec une solution chimique, qui permet de donner des différences des reliefs ou de coloration des différents constituants dans une même phase. pour notre cas, au NITAL dont la composition chimique est :

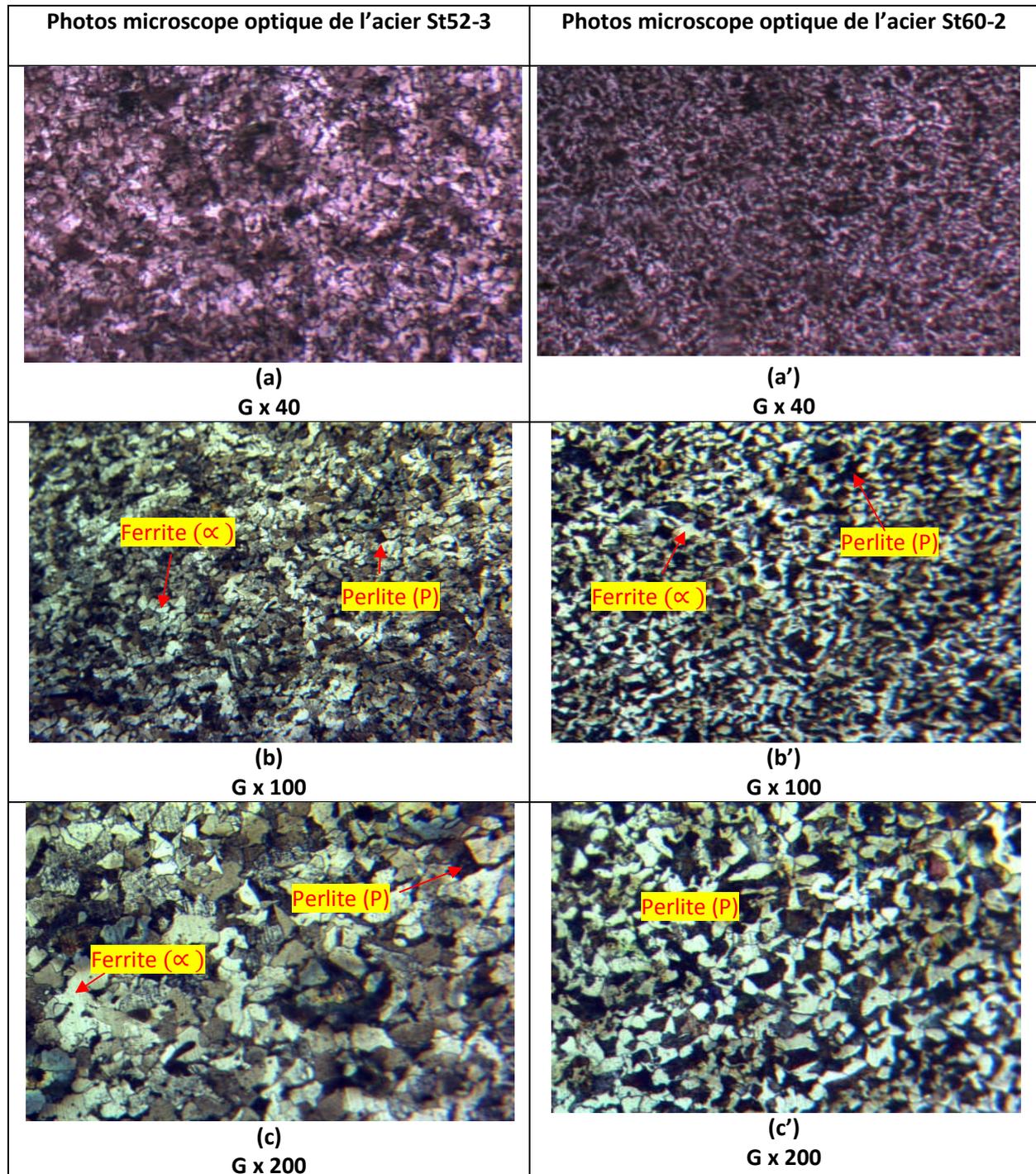
- Acide nitrique 4% ( $\text{HNO}_3$ ).
- Alcool 96% (Ethanol  $\text{CH}_3 - \text{CH}_2\text{OH}$ ).

La durée de l'attaque est d'environ 5s mais elle peut durer jusqu'à 1min 30s, suivant les nuances et les traitements.

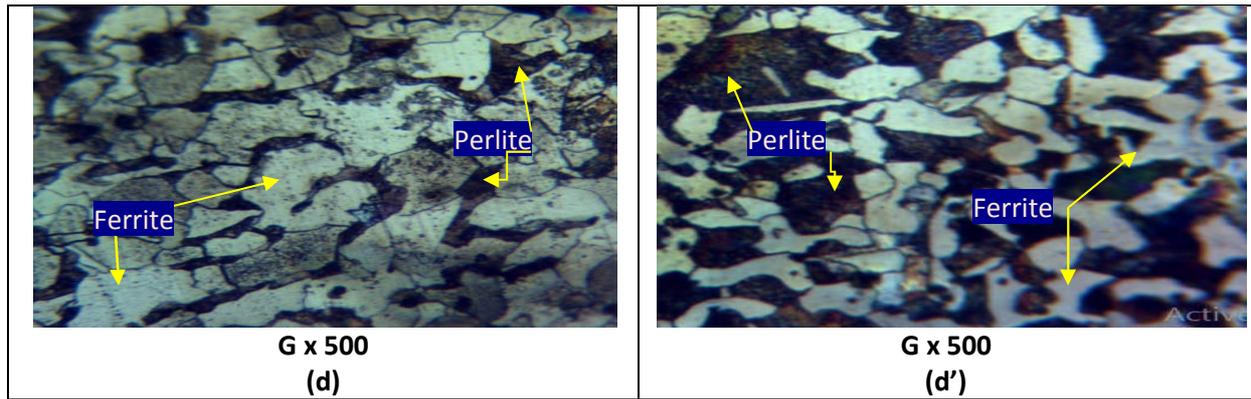
Après disparition de la qualité 'miroir', qui veut dire que la surface est attaquée. Elle doit être lavée à l'eau et sécher à l'aide d'un séchoir pour qu'elle soit prête à la visualisation.

## 6. Résultats des tests micrographiques

Les photos prises de l'observation du microscope optique pour, les aciers St60-2 et St52-3 sont représenté dans la figure ci-dessous.

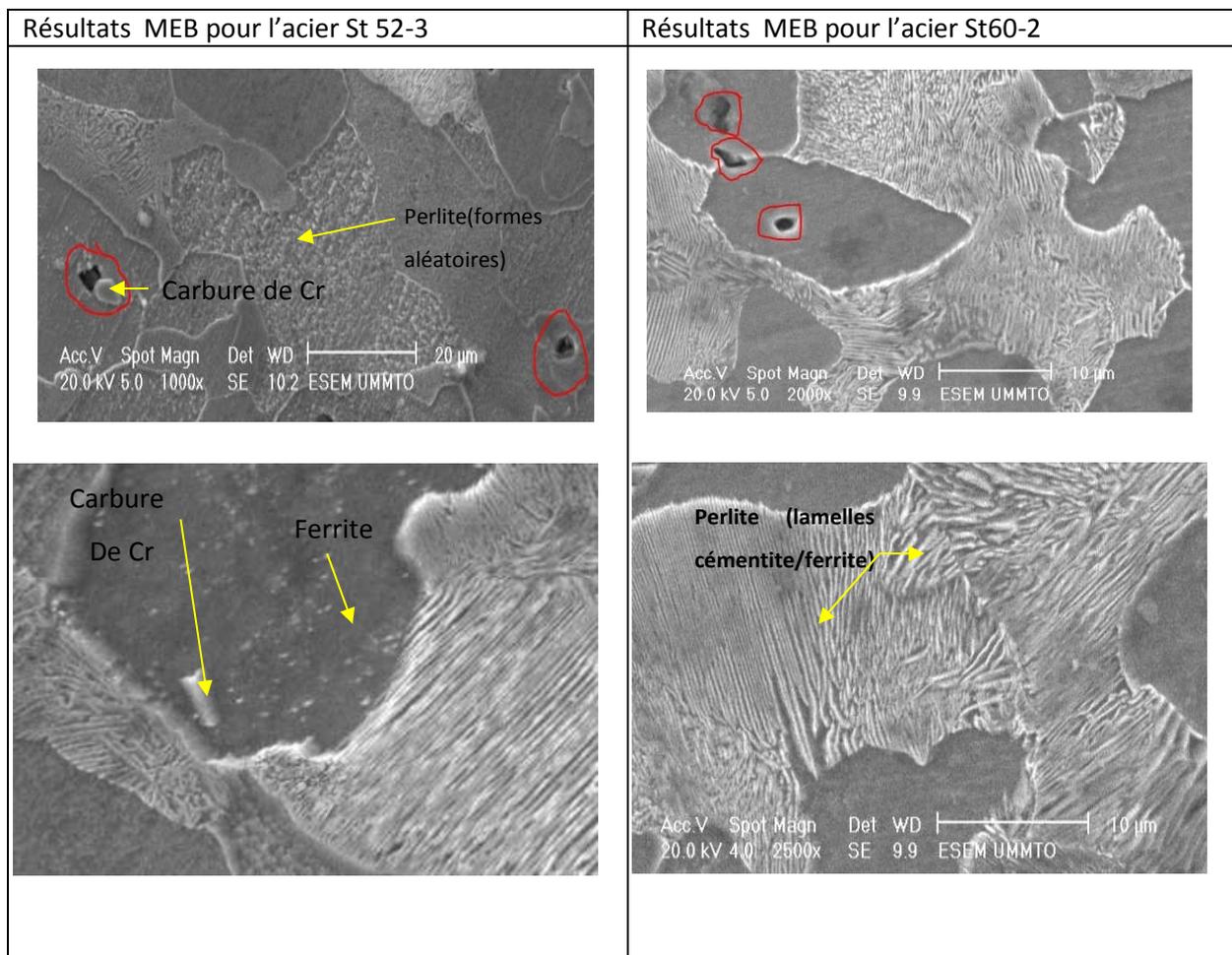


## Partie métallographique



**Figure 40 : photos du microscope optique pour les aciers St60-2 et St52-3**

Les photos prises de l'observation du microscope électronique à balayage pour, les deux aciers St60-2 et St52-3 sont représenté dans la figure suivante.



**Figure 41 : photos du microscope électronique à balayage pour les aciers St60-2 et St52-3**

### 7. Conclusion

Selon la composition chimique des deux aciers **St60-2** et **St52-3** et le diagramme d'équilibre fer-carbone, les deux aciers sont hypoeutectoïde.

La structure visualisée avec les différents grossissements, nous indique que les deux aciers sont constitués de ferrite (zones de contraste claire pour le microscope optique ou bien zones de contraste sombre pour le MEB), et de la perlite qui se présente sous deux formes, lamellaire dite de Widmanstätten (lamelles de contraste claire qui représentent la cémentite et de contraste sombre qui est la ferrite pour le MEB) et de la perlite avec des grains de forme aléatoire ou bien dit globulaire (globules de contraste claire qui représentent la cémentite et des zones contraste sombre qui est la ferrite pour le MEB). Les observations au M.O confirment la structure prévue par la composition chimique et le diagramme d'équilibre.

L'acier **St 52-3** comporte plus de ferrite avec une forme de grains plus grande par rapport à l'acier **St60-2**.

Le **MEB** met en évidence la phase ferritique et perlitique ainsi les précipités de chrome dans l'acier **St52-3**.

### III. Essai de traction

#### 1. Introduction

Le but de cet essai est la détermination des propriétés mécaniques, caractéristiques usuelles via les courbes forces-déplacements. Ce travail a été réalisé conformément à la norme DIN 50 125.

#### 2. Matière de base brute

Les deux aciers à étudier sont livrés sous forme de barres rondes de 30 mm de diamètre et 3000 mm de longueur. Statistiquement, trois échantillons de 220 mm dans chaque barre sont prélevés pour servir comme éprouvettes normalisées, pour l'essai de traction.

#### 3. Machine d'essai de traction

C'est une machine électromécanique, fabriquée par « **SCHENK-TREBEL** » suivant la norme **DIN51-222**, comporte :

- ✓ L'unité centrale, fonctionnant en automatique et semi automatique, est dotée d'un afficheur digital.
- ✓ D'un bloc pour les essais, d'une vitesse de traction de 0.125 à 500 mm/min.
- ✓ Une table traçante avec extensomètre RDA qui permet, la détermination de la limite d'écoulement, la limite d'élasticité conventionnelle et celle du module d'élasticité longitudinal. Avec une précision de  $\pm 0,05\%$ .



Figure 42 : machine de traction

#### 4. préparation des éprouvettes

Les échantillons sont usinés sur un tour parallèle, entre pointes jusqu'à l'obtention de la forme représentée ci-dessous conformément à la norme **DIN 50-125** :

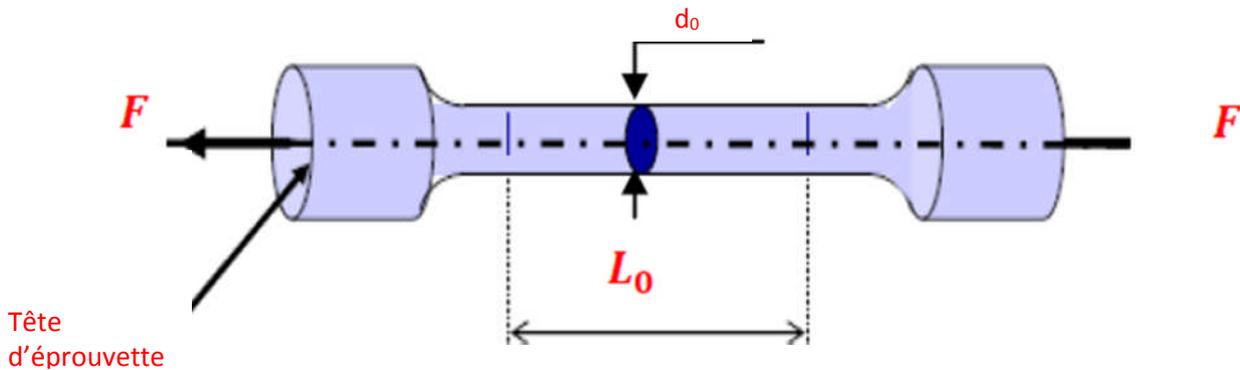


Figure 43 : éprouvette normalisée pour l'essai de traction

- $d_0$  : diamètre de la partie calibré [mm].
- $L_0$  : longueur initiale ( $L_0 = 5 \times d_0$ ), [mm].
- $d_1$  : diamètre de la tête d'éprouvette [mm].
- $L_c$  : longueur calibrée ( $L_c \geq L_0 + d_0$ ), [mm].
- $h_0$  : longueur de la tête, [mm].
- $L_t$  : longueur totale, [mm].

#### 5. dimensions des éprouvettes

On a regroupé les dimensions réelles des éprouvettes de traction dans le tableau ci-dessous

Tableau N°17 : dimensions réelles des éprouvettes de traction

$d_0$ [mm]	$L_0$ [mm]	$d_1$ [mm]	$h_0$ [mm]	$L_c$ [mm]	$L_t$ [mm]
12	60	16	55/45	80 / 100	200

#### 6. procédure

On dispose de six éprouvettes, trois de chaque nuance. Numérotées de 1 à 3, on trace à l'intérieur de  $L_c$ , la longueur  $L_0$ , et on mesure le diamètre  $d_0$ . Puis, on insère l'éprouvette entre les mors d'amarrage de la machine de traction.



**Figure 44 : éprouvette entre les mors d'amarrage**

La vitesse de traction répond aux prescriptions de la norme DIN 50145, à savoir  $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ , pour les matériaux dont le module Young est supérieur à  $150000 \text{ N/mm}^2$ .

La charge maximale est relevée sur machine, comme on peut la relever sur le graphe, ainsi que pour la charge de la limite d'élasticité, sauf dans l'absence du palier d'écoulement, on détermine sur le graphe, la limite conventionnelle à 0.2% «Rp<sub>0.2</sub>».

La variation de l'allongement est lue sur l'éprouvette après rupture en mettant bout à bout les deux parties.



**Figure 45 : éprouvette de traction après rupture**

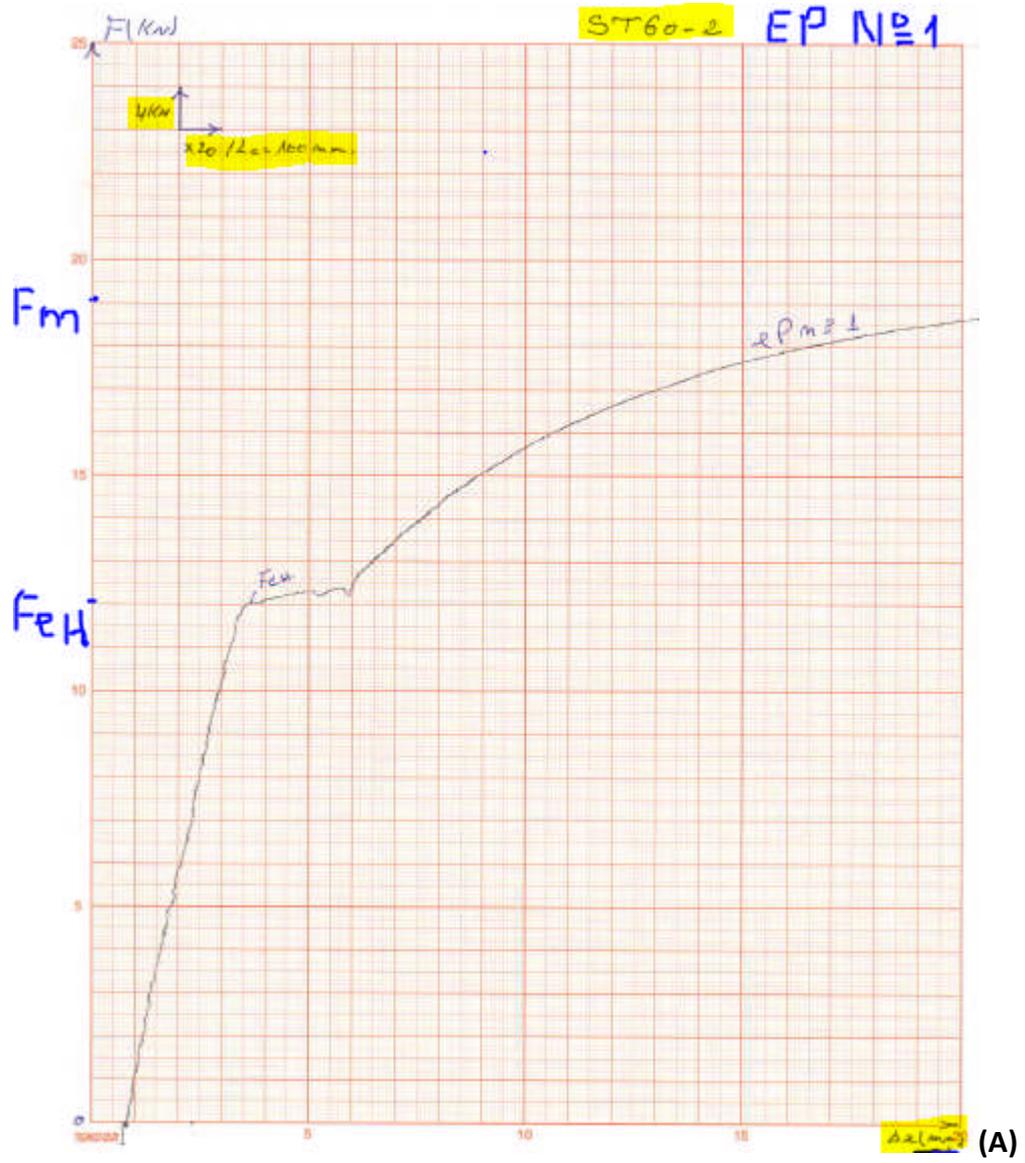
### **7. Les résultats de l'essai de traction pour les nuances d'aciers St60-2 et St52-3**

À base des courbes forces-déplacement obtenues après l'essai de traction, pour chaque éprouvette de chaque une des deux nuances d'aciers, on a calculé leurs différents paramètres, on appliquant les formules ci-après.

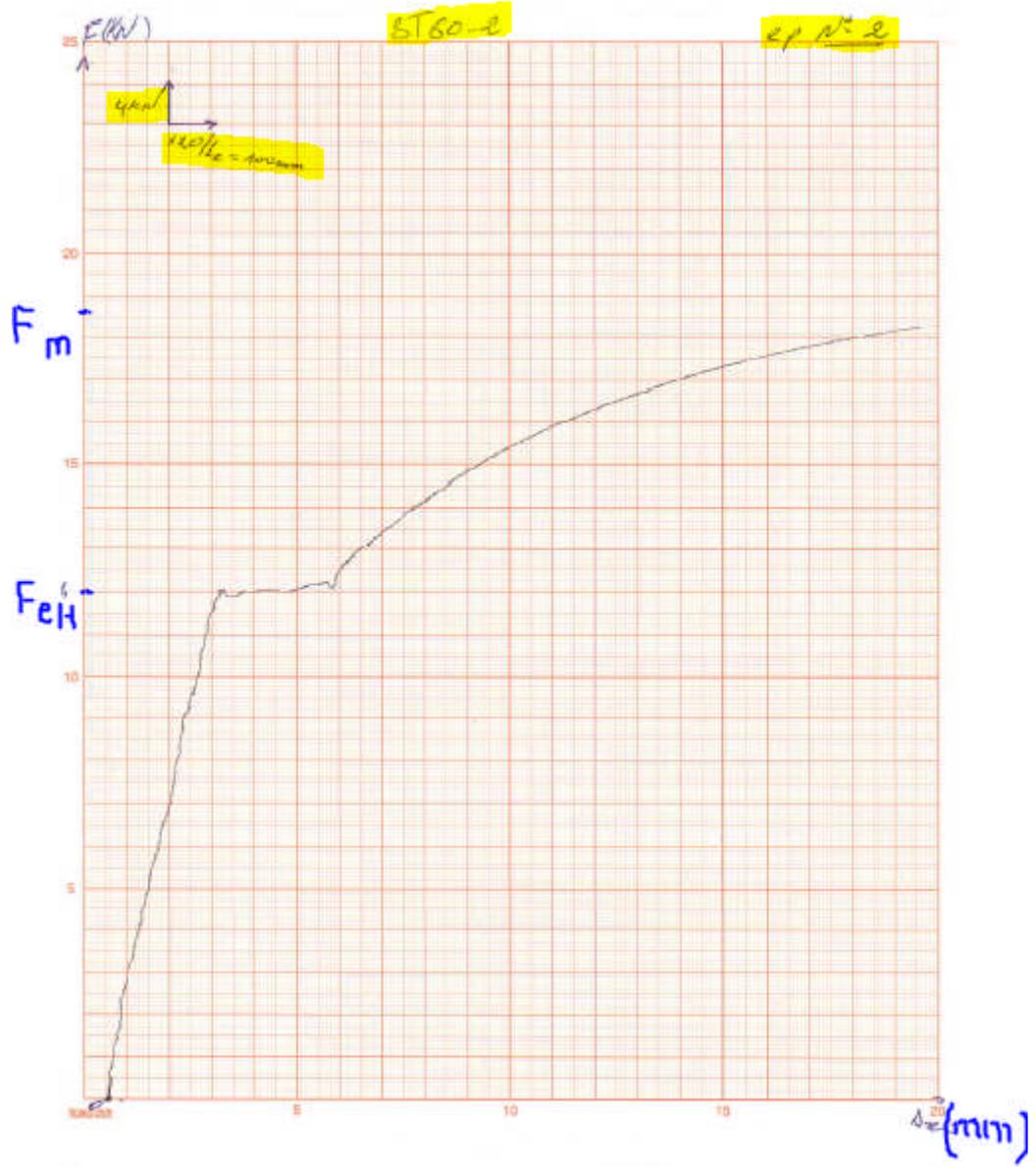
- La section initiale  $S_0 = \pi \cdot R^2$  [mm<sup>2</sup>]
- Le déplacement  $\Delta L = L - L_0$  [mm]
- L'allongement  $A\% = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$
- la contrainte maximale  $R_m = \frac{F_m}{S_0}$  [N/mm<sup>2</sup>]
- la limite élastique  $R_e = \frac{F_e}{S_0}$  [N/mm<sup>2</sup>]
- la déformation  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$  [%]
- le module d'élasticité (module de YOUNG)  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$  [N/mm<sup>2</sup>]

### 7.1 les courbes Forces-Déplacements de l'acier ST60-2 obtenues

Dans la figure ci-dessous on présente les courbes Force-Déplacement de l'acier **St60-2** obtenus



# Partie pratique



(B)

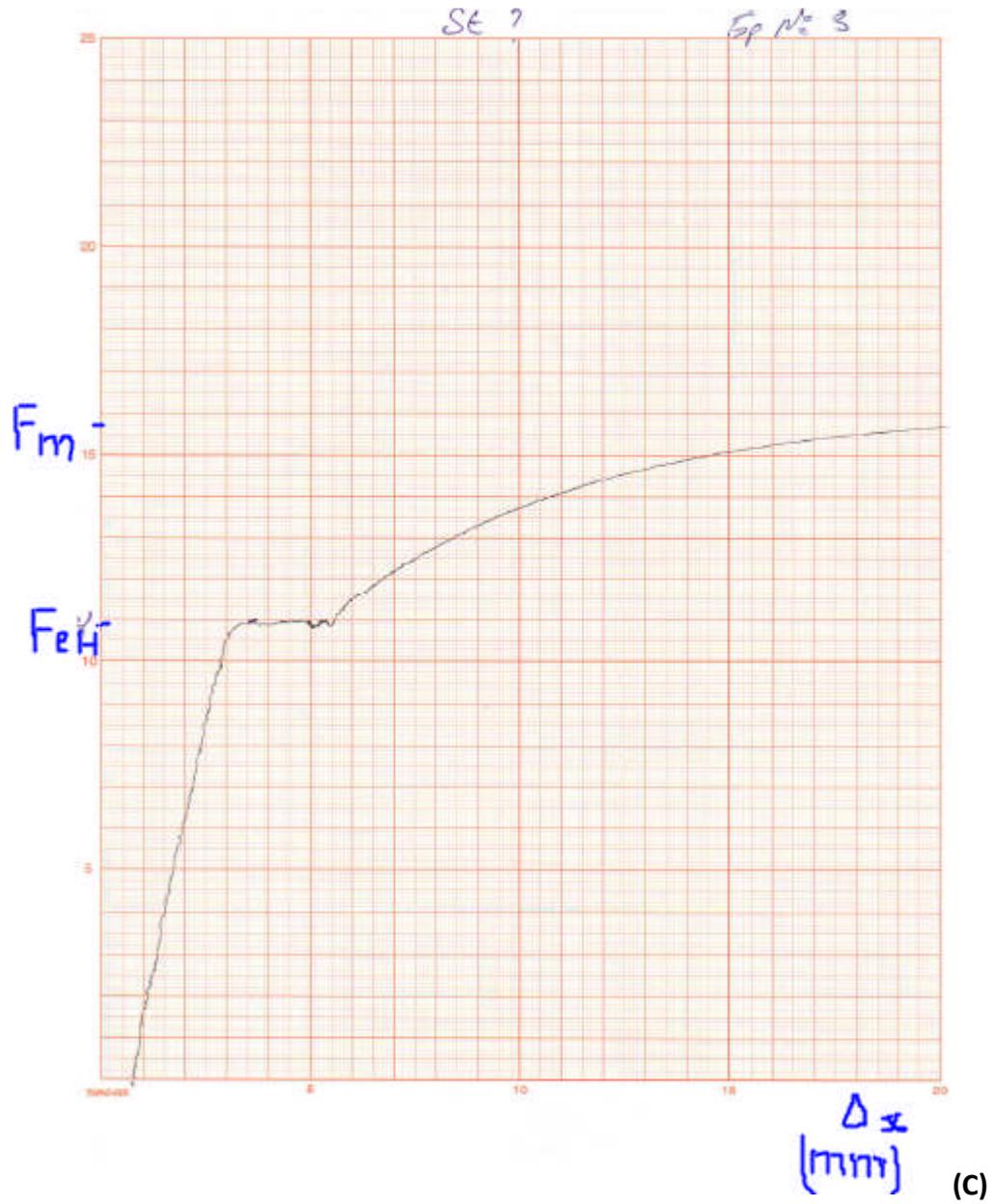


Figure 46 : graphes (A) (B) (C) des essais de traction pour l'acier St60-2

### 7.2 les résultats des calculs de l'acier St60-2

Les résultats des calculs des essais de traction pour l'acier **St60-2** sont donnés dans le tableau suivant

**Tableau N°18 : résultat de l'acier St60-2 (E335)**

Nuance	N° éprouvette	∅ (moyenne) (mm)	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	F <sub>m</sub> (KN)	F <sub>eh</sub> (KN)	A <sub>5</sub> (%)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>e</sub> (MPa)	E (MPa)
<b>St60-2</b>	1	12,115	115,27	76,43	48,2	20,83	663	418,1	141374,07
	2	12,019	113,45	75,48	48,2	26,66	665,3	424,8	156700
	3	12,056	114,155	63,47	43,78	35	556	383,5	233603,33

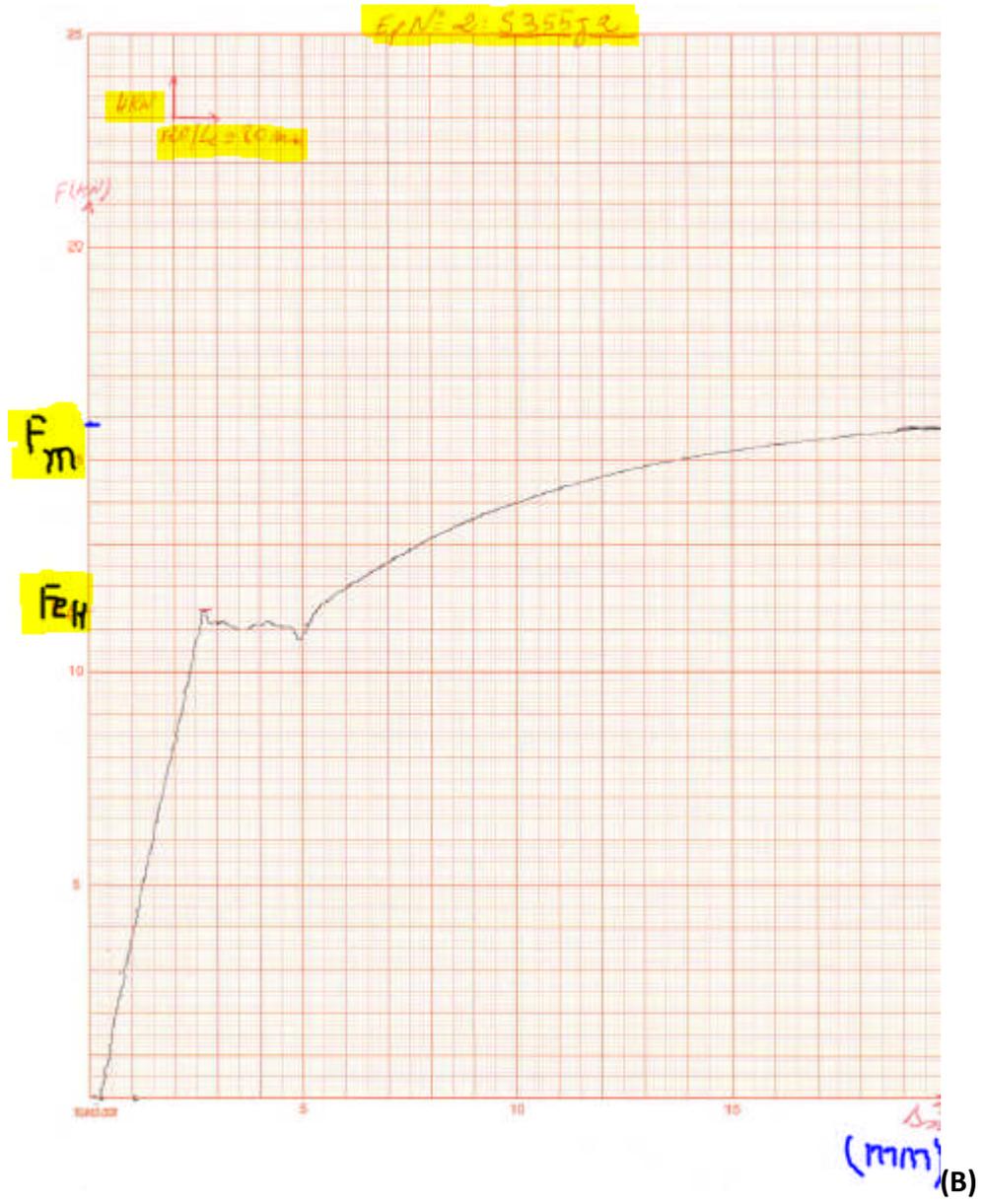
**Remarque :** l'éprouvette du troisième essai qui correspond à la courbe de la **figure 43(C)**, ne satisfais pas les caractéristiques mécaniques (**A%**, **E**, **R<sub>e</sub>**, **R<sub>m</sub>**) de l'acier **St60-2** mais de l'acier **St52-3**, qui peut être dus à l'erreur dans l'enlèvement des échantillons. Pour cela, on ne prend pas en considération ces résultats, dans les calculs qui suit.

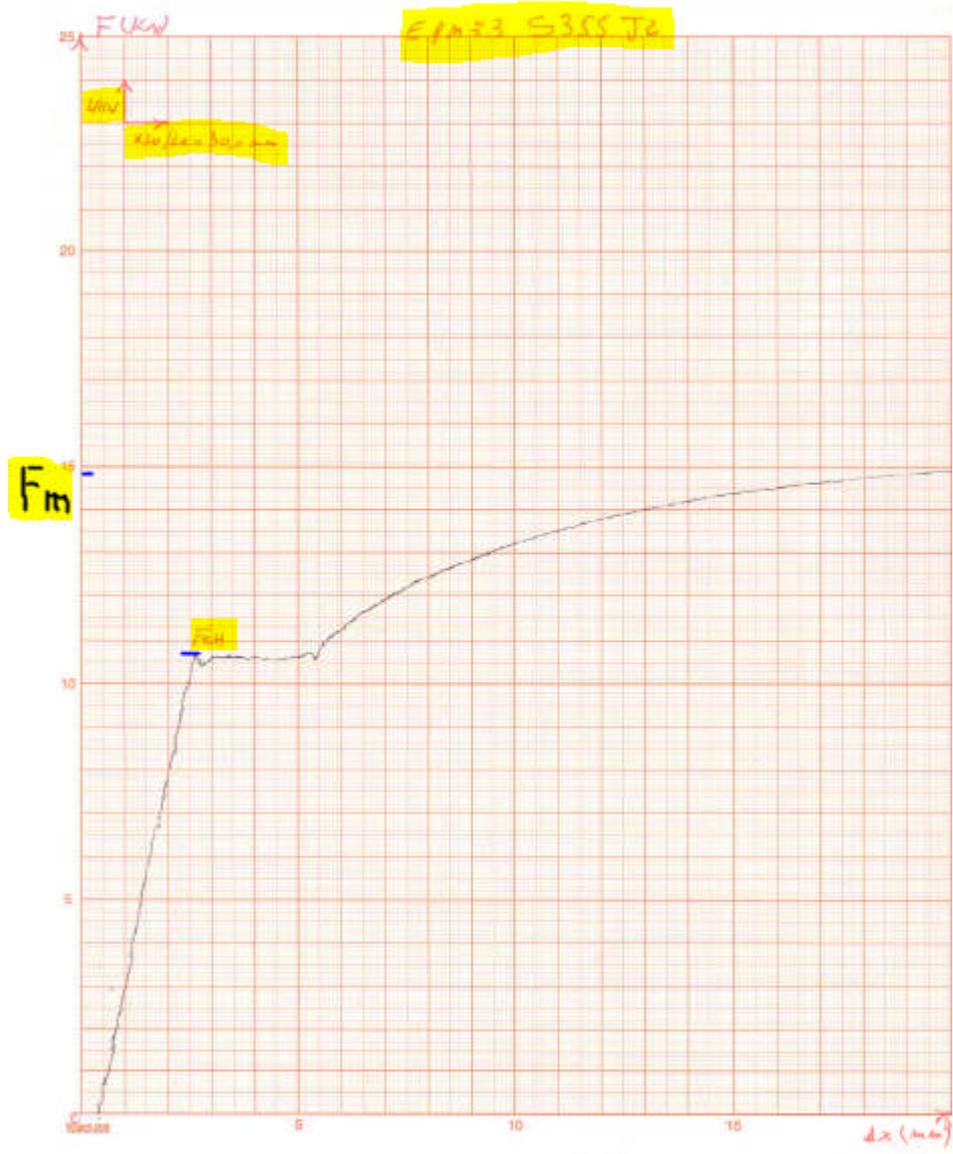
### 7.3 les courbes forces-déplacement de l'acier ST52-3 obtenus

Les courbes Force-Déplacement de l'acier **St52-3** obtenus sont donnés comme suit



# Partie pratique





(c)

Figure 54 : les courbes forces-déplacement de l'acier ST52-3

### 7.4 les résultats des calculs de l'acier ST52-3 (S355-j2)

Les résultats des calculs des essais de traction pour l'acier **St52-3** sont donnés dans le tableau N° 17 suivant

**Tableau N°19 : résultat de l'acier St52-3 (S355-j2)**

Nuance	N° éprouvettes	Ø moye (mm)	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	F <sub>m</sub> (KN)	F <sub>eh</sub> (KN)	A <sub>5</sub> (%)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>e</sub> (MPa)	E (MPa)
St52-3	1	12.24	123.80	64.05	46.29	35	517.36	373.90	209417.22
	2	12.12	121.43	63.48	45.72	35	552.77	376.51	219606
	3	11.82	115.64	59.85	42.37	25	517.55	366.39	224835

### 8. Conclusion partielle

Dans l'analyse des courbes obtenues des essais de traction, on remarque qu'on peut partager les allures en deux parties essentielles :

La première partie, les deux aciers ont un comportement élastique linéaire, qui veut dire qu'ils obéissent à la loi de Hooke. Cette partie est limitée par la force de la limite élastique **F<sub>eh</sub>**. Puis, dans une deuxième partie, un comportement plastique, où les deux aciers n'obéissent pas à la loi de Hooke. Entre ces deux parties une zone de transition, semblable aux aciers doux.

Le calcul des différents paramètres pour les deux nuances d'aciers, nous a révélé que, les propriétés mécanique de l'acier **St60-2**, telle que **R<sub>m</sub>** et **R<sub>e</sub>** sont nettement supérieures à celles de l'acier **St52-3**, par contre **E** et **A%**, de l'acier **St52-3** sont supérieures à celles de l'acier **St60-2**.

### II. l'essai de résilience

#### 1. Introduction

Les caractéristiques mécaniques usuelles, telles que  $E$ ,  $R_e$  et  $\sigma$  déduites de l'essai de traction peuvent-être insuffisantes, puisque des ruptures peuvent avoir lieu en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent l'alliage fragile.

Pour cela, le moyen le plus classique et le plus utilisé, pour caractériser la fragilisation d'un matériau est l'essai de résilience autrement dit, résistance aux chocs.

#### 2. Appareillage

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical au tour d'un axe (O), l'ensemble est appelé le pendule.

La chute du pendule avec une énergie emmagasinée  $W_0$ , est utilisé pour rompre l'éprouvette.



Figure 48 : machine d'essai de résilience (mouton pendule)

### 3. Données technique sur le mouton pendule

- Energie potentielle : max 50J, 25J, 15J, 7.5J
- Poids du pendule : 117 p, 234p, 467p, 934p
- Angule de chute : 160°
- Longueur du pendule : 225 mm
- Vitesse de percussion : 2.93 m/s

### 4. Préparation des éprouvettes

Trois échantillons sont prélevés de chaque barre de chaque matière, puis usinés et entaillé sur une fraise jusqu'à l'obtention de la forme représentée sur ci-dessous :



Figure 49 : Etapes de fabrication de l'éprouvette CHARPY V

Le tableau N°18 suivant, donne les dimensions de l'éprouvette de résilience selon la norme **NF A 03-161**

Tableau N°20 : dimensions de l'éprouvette de résilience (norme NF A 03-161)

L [mm]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	b [mm]	$\rho$ [mm]	$\theta^\circ$ (degrés)
55	10	10	2	8	0,25	45

### 5. Exécution de l'essai

Les éprouvettes sont mises dans un congélateur de laboratoire, après immersion de chaque une d'elles dans un récipient remplis d'alcool. On débute progressivement le refroidissement de la température ambiante, jusqu'à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Puis :

- ✓ Le couteau pendule est écarté de la verticale à une hauteur correspondante à une énergie de départ  $w_0$  égale à 50 Joules.
  - ✓ On libère le couteau. Dans sa chute, en passant à la verticale, il brise l'éprouvette.
  - ✓ Habituellement, on mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule, pour calculer l'énergie non absorbée  $w_1$ . On calcule la différence  $W_0 - W_1 = W$  [joules], pour avoir l'énergie absorbée. Ou  $W = P \times (h_0 - h_1)$  [J]
- Dans notre cas on lit directement sur l'appareil l'énergie absorbée. Puis on calcule la résilience par la loi :  $K = W/S$  [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ].



Figure 50 : images illustrant l'essai de résilience

### 6. Résultats de l'essai

Les résultats de l'essai de résilience sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°21: Résultats de l'essai de résilience pour les aciers St60-2 et St52-3

éprouvettes	St60-2		St52-3	
	W [j]	K [j/cm <sup>2</sup> ]	W [j]	K [j/cm <sup>2</sup> ]
1	19,5	24.37	>50	>62.5
2	19	23.75	>50	>62.5
3	18	22.5	>50	>62.5

### 7. Conclusion

Les résultats de l'essai de résilience effectué sur les deux nuances d'aciers, mettent en évidence la ductilité de l'acier **St52-3**, sa grande résistance aux Chocs à la température de -20°C, **K > 62,5 J/cm<sup>2</sup>**, et la fragilité de l'acier **St60-2** à la même température, qui donne une résilience de moyenne **23,54 J/cm<sup>2</sup>**.

### III. Essais de dureté

#### 1. Introduction

Le but de ces essais est de déterminer la dureté des deux aciers **St60-2** et **St52-3** afin de compléter la caractérisation mécanique. Connaissant la destination ultérieure des pièces à usiner à partir des deux aciers (pour arbre de moteur électrique), dont l'application ne nécessite pas un traitement, notre choix s'est porté sur la dureté **Brinell**.

#### 2. Principe de l'essai

Cet essai est réalisé conformément à la norme **DIN 30-351**.

Pour réaliser cet essai, on a utilisé comme pénétrateur une bille en acier trempé de diamètre  $\varnothing = 2,5 \text{ mm}$ . On applique la charge de **187,5 KgF** sur la bille, en utilisant la formule  $F/d^2 = 30$  pour les aciers.

On mesure ainsi les dimensions de l'empreinte imprimée, après cessation de la charge.

Puis la lecture des résultats sur le catalogue directement, on cherche la correspondance sur le tableau, entre le diamètre mesuré de l'empreinte et la dureté correspondante.



Figure 51 : *appareil de dureté*

### 3. Echantillon de l'essai

Pour les besoins de l'essai, on a utilisé des ronds d'aciers de diamètre  $\varnothing$  40mm et de longueur de 25mm pour le ST60-2 et de diamètre  $\varnothing$  50mm et de longueur 20mm pour le ST52-3.

Les ronds d'aciers sont découpés avec une scie mécanique puis, dressé et polis.



Figure 52 : échantillon utilisé pour le teste de dureté

### 4. Les résultats de l'essai de dureté Brinell pour St52-3 et St62-2

Les résultats de l'essai de dureté Brinell pour les aciers St52-3 et St62-2, sont regroupés dans le tableau ci-dessous

Tableau N°22 : Les résultats de l'essai de dureté Brinell pour St52-3 et St62-2

N° essai	diamètre ( $\varnothing$ ) de l'empreinte (mm)		équivalence en dureté (HB <sub>2.5/187.5</sub> )		Différence HBSt52–HB St60
	St52-3	St60-2	St52-3	St60-2	
1	1.16	1.05	167	207	40
2	1.19	1.07	158	198	40
3	1.18	1.09	161	191	30
4	1.18	1.09	161	191	30
5	1.18	1.06	161	202	41
6	1.17	1.10	164	187	23
Moyenne de l'équivalence			162	196	34

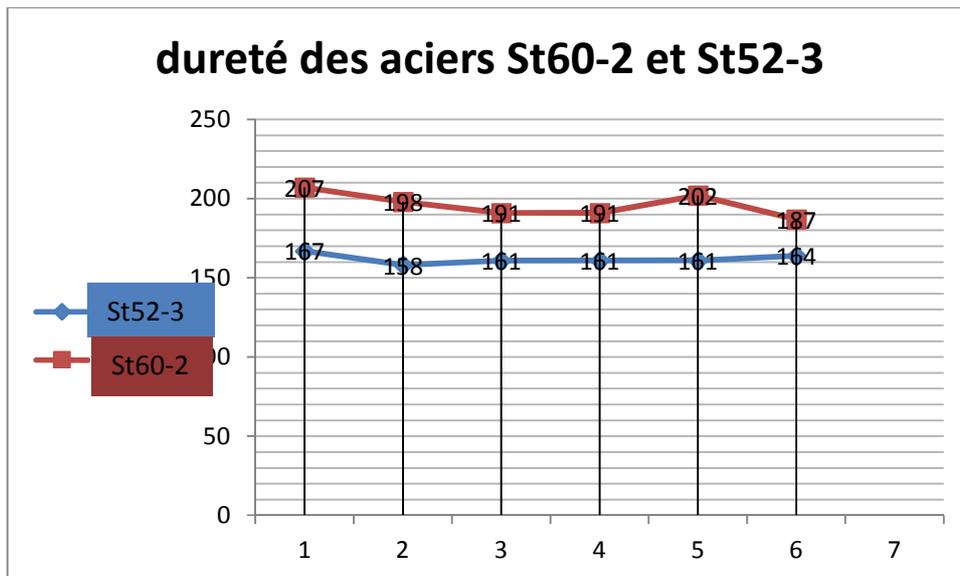


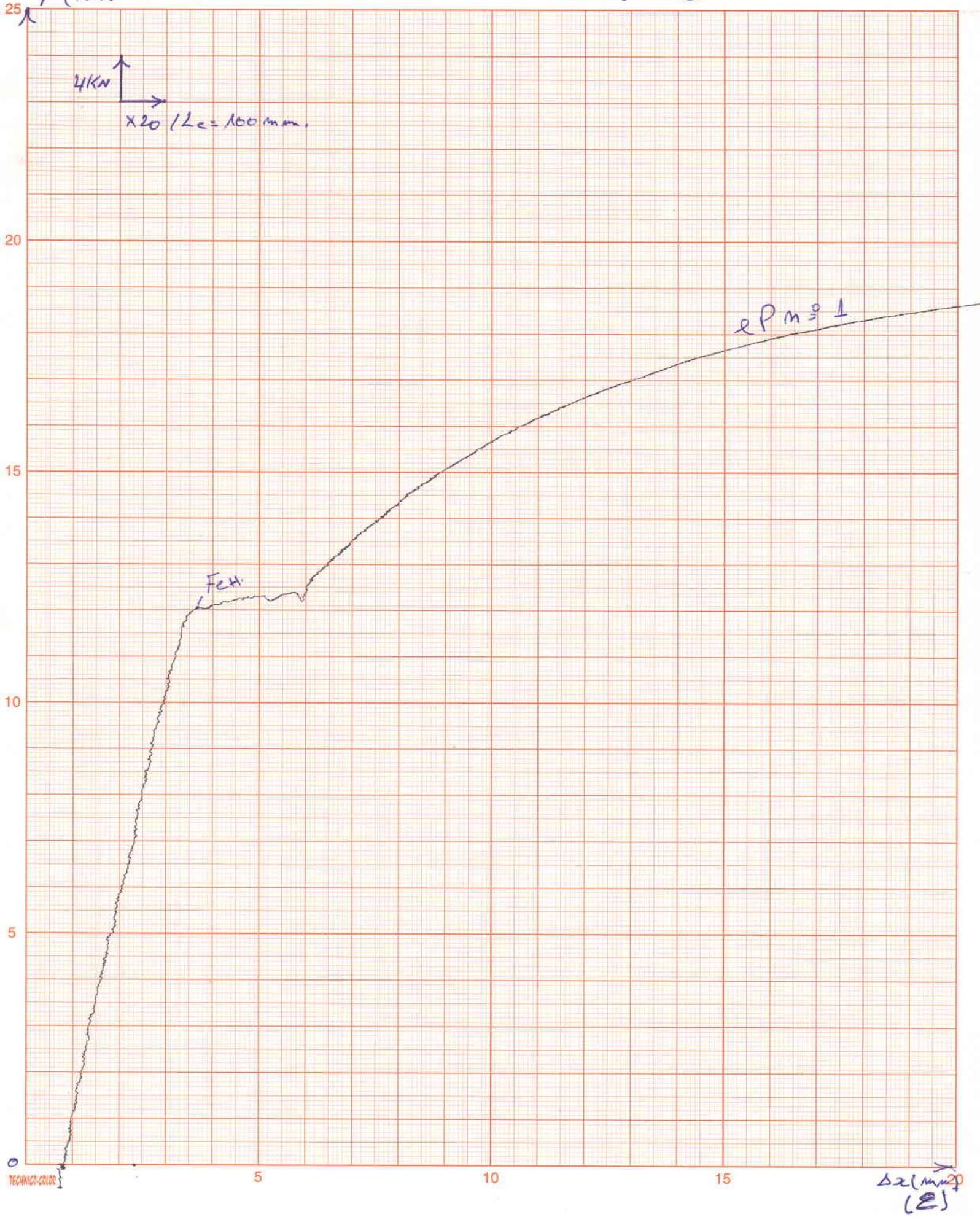
Figure 53 : graphes comparatifs de la dureté de nos aciers St60-2 et St52-3

## 5. Conclusion

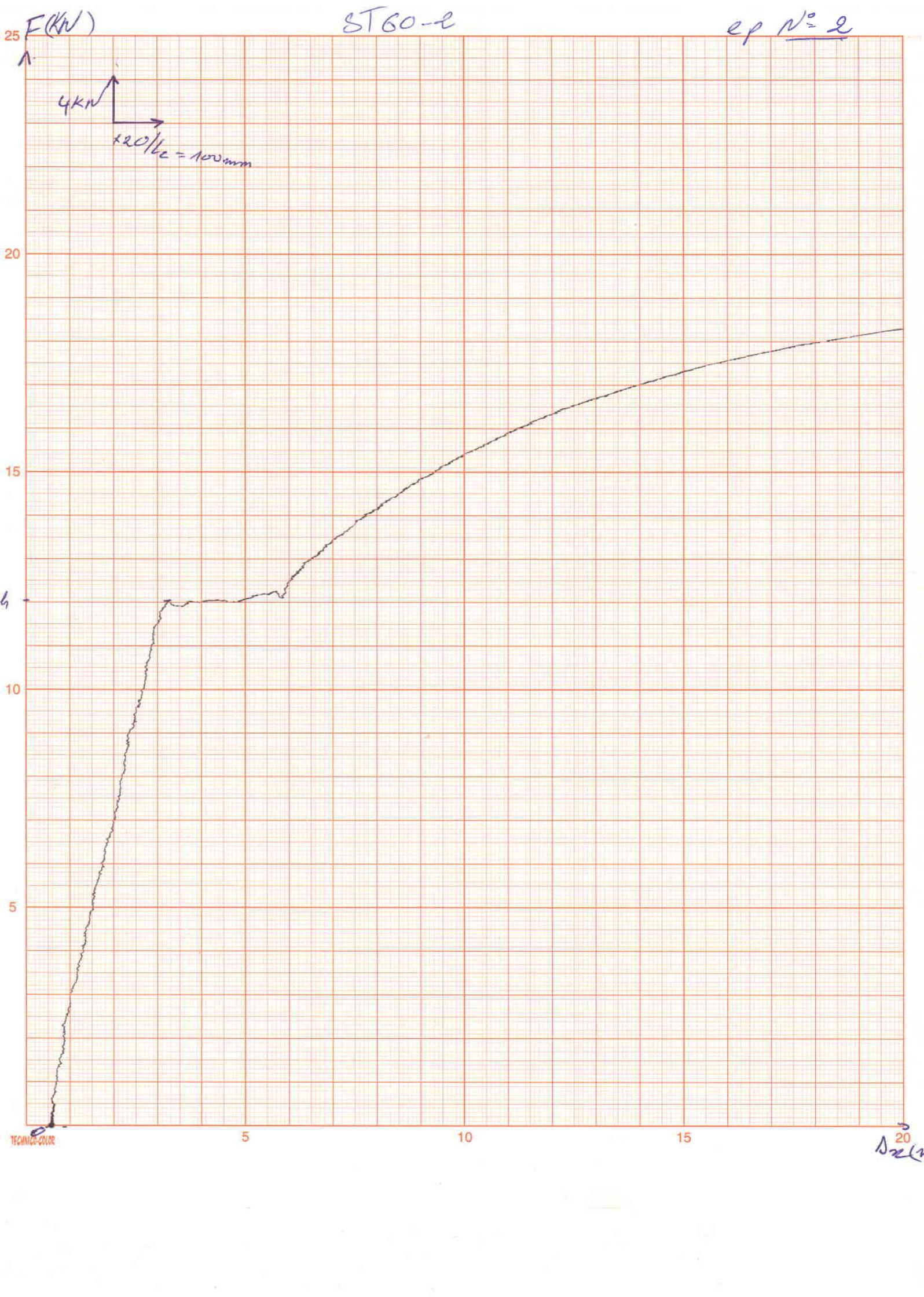
Les résultats de l'essai de dureté effectué sur les deux nuances d'aciers montrent que l'acier **St60-2** est le plus dure que l'acier **St52-3**. Avec un écart de 34HB pour les valeurs moyennes.

ST60-2

F (kN)

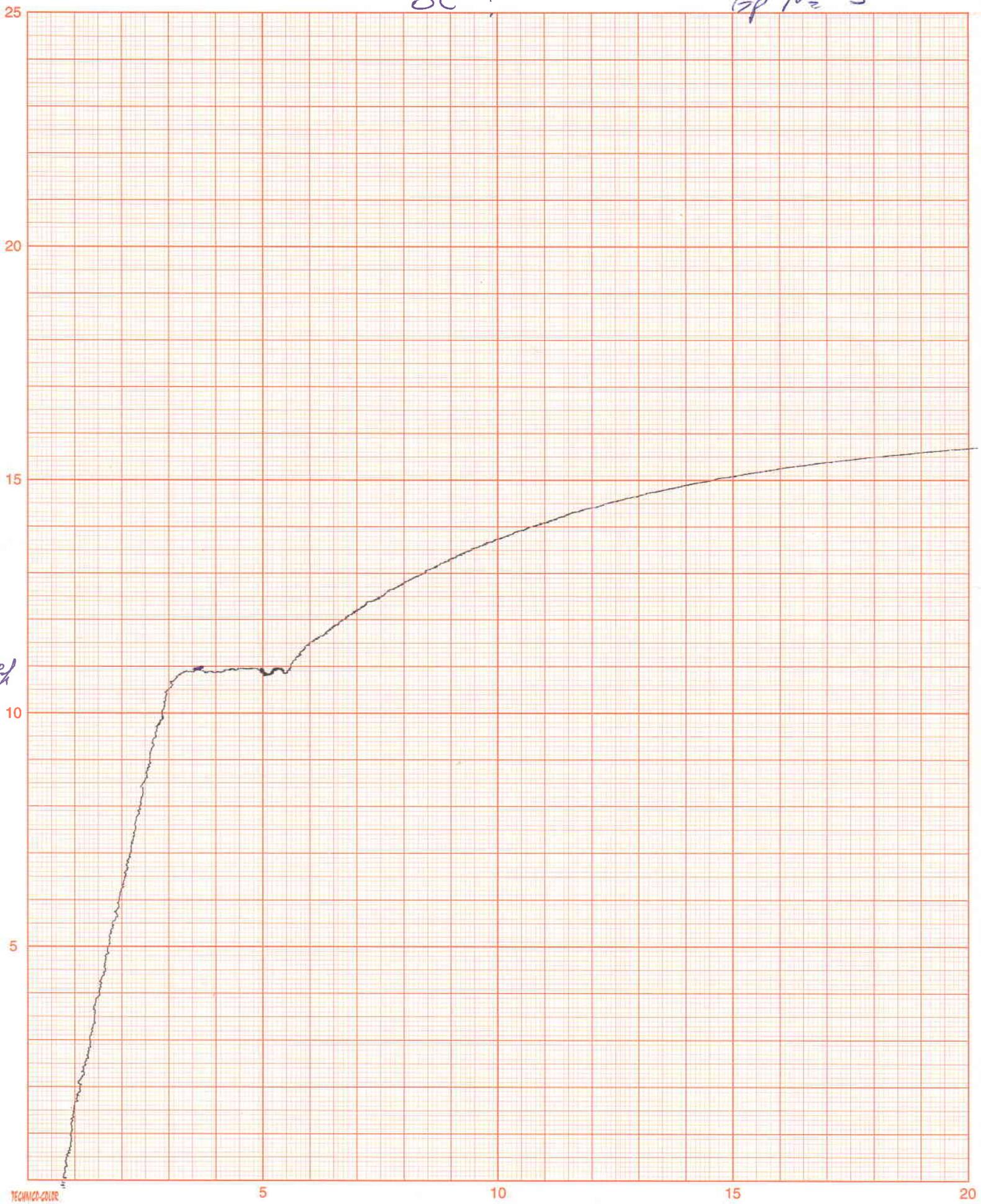


$\Delta z$  (mm)  
(2)

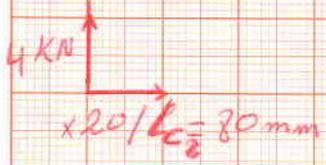


SE ?

Ep N<sup>o</sup> 3



Ep N° 1 S355 JR



F (kN)  
20



TECHNICO-COLOR

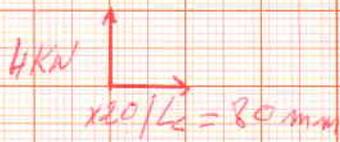
5

10

15

Δx (mm) 20

Ep N° 2: S355JR



F (kN)

$F_{2k}$



TECHNICO-COLOR

5

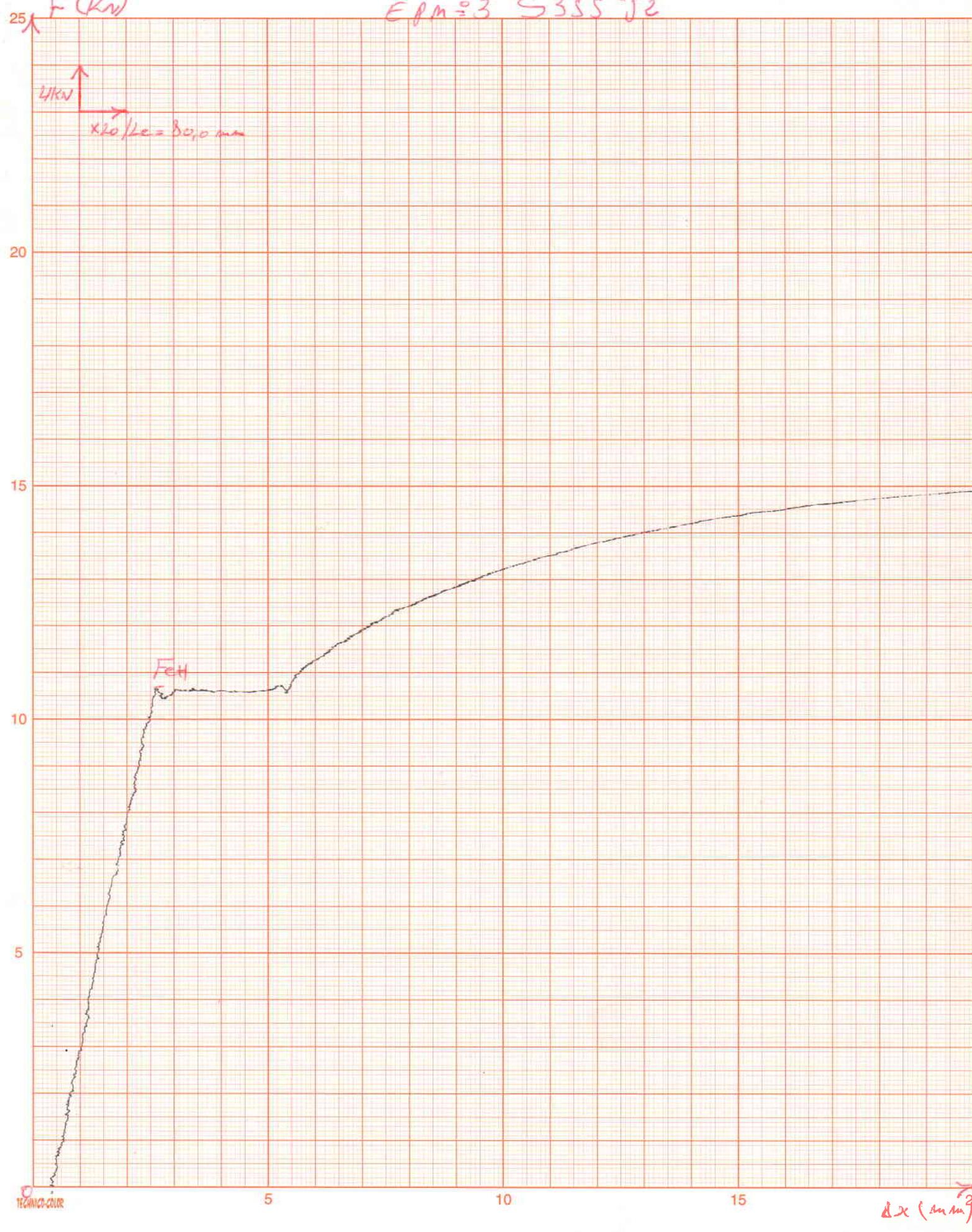
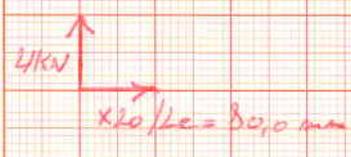
10

15

$\Delta L$  20

F (kN)

$E_{pm} = 3$  S355 J2



TECHNICO-COLOR

5

10

15

$\Delta x$  (mm)

## VI. vérification mécanique

### 1. introduction

Dans cette partie, on s'intéresse au bout d'arbre, le plus sollicité lors de la transmission. Le travail consiste à déterminer les diamètres minimums pour les deux nuances d'aciers, selon les efforts auxquels ils sont soumis et les propriétés mécaniques de chaque nuances, pour déterminé la quelles des nuances est convenable.

### 2. description de l'arbre

L'arbre est une barre mobile, généralement prismatique, qui transmet un couple de torsion. Pour notre cas, l'arbre est utilisé dans un moteur électrique asynchrone, il comporte :

- une partie centrale porte le paquet rotorique
- deux zones d'appuis pour roulement
- bout entrainant (doté de clavette) : c'est la partie extérieure de l'arbre, qui transmet le travail fournis par le moteur.

### 3. calcule de la résistance

#### 3.1. Moment de torsion $M_t$

La torsion est le mode de sollicitation la plus important dans la transmission de la puissance par un mouvement de rotation. Pour cette raison, la condition de résistance de l'arbre du moteur électrique est donnée par la formule ci-après :

$$\frac{\pi}{16} \times d^3 \geq \frac{M_t}{R_{pg}} \quad \text{----- (1)}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} d: \text{diamètre du bout d'arbre [mm]} \\ M_t: \text{moment de torsion [N.m]} \\ R_{pg}: \text{résistance pratique au} \\ \quad \text{glissement du matériau} \end{array} \right.$$

$$R_{pg} = \frac{R_{eg}}{s} \quad \text{-----(2)}$$

$$\text{Tel que : } \begin{cases} R_{eg} = 0,5 \text{ à } 0,8R_e \\ R_e \text{ la limite élastique du matériau} \\ s : \text{coefficient de sécurité} \end{cases}$$

### 3.2. Donné de l'entreprise

D'après le cahier des charges de l'entreprise (EI), on a :

- le couple  $M_t = 98 \text{ N.m}$   $\omega = 152.98 \text{ rad/s}$
- la puissance  $P = 15 \text{ Kw}$   $\omega = \pi.N/30$  [rad/s]
- le nombre de tours du moteur  $N = 1460 \text{ Trs/min}$
- le diamètre  $d = 42 \text{ mm}$
- le coefficient de sécurité  $s = 4$

### 4. application numérique

#### 4.1. Calcul du diamètre minimal de l'arbre pour l'acier ST60-2

- $R_{e\text{moy}} = 421.45 \text{ MPa}$  \*  $R_{eg} = 210.725 \text{ Mpa}$
- $R_{pg} = 52.68 \text{ MPa}$  \*  $d = 21.16 \text{ mm}$

Par mesures de sécurité, on prend le diamètre minimal  **$d = 22 \text{ mm}$**

#### 4.2. Calcule du diamètre minimal de l'arbre pour l'acier ST52-3

- $R_{e\text{moy}} = 374.26 \text{ MPa}$  \*  $R_{eg} = 187.13 \text{ Mpa}$
- $R_{pg} = 46.78 \text{ MPa}$  \*  **$d = 22,01 \text{ mm}$**

### Conclusion préliminaire

Vu le cahier des charges de l'entreprise, et le diamètre minimal calculé pour les deux nuances d'aciers, retrouvé presque égaux, et à la moitié du diamètre utilisé. On peut dire que, la substitution de l'acier **St60-2** par l'acier **St52-3**, est possible.

# Conclusion générale

Le travail que nous avons mené le long de ce projet, a été bénéfique, il nous a permis d'enrichir nos connaissances, dans le domaine de la construction mécanique, en général et la caractérisation mécanique, en particulier.

Pour le choix et l'emploi d'un matériau en construction mécanique, il faut une étude des différents paramètres, métallurgiques, mécaniques, chimiques... etc.

Les essais de traction que nous avons effectuée, ont donné les différentes caractéristiques mécaniques, pour les deux nuances d'aciers, qui montre, la ductilité de l'acier **St52-3**, confirmé par les essais de résilience qui évoquent, la fragilité de l'acier **St60-2** à une température de -20°C.

L'essai de dureté révèle, une dureté remarquablement supérieure de l'acier **St60-2**, prouvé par l'analyse chimique réalisé sur les deux nuances d'acier, qui atteste, le taux supérieur du carbone, pour l'acier **St60-2**.

Les observations au MEB et MO, nous indiquent que les deux aciers comportent de la ferrite et de la perlite, avec des grains de forme aléatoire. L'acier **St52-3** contient des carbures probablement, des carbures de chrome, pour confirmer la nature de c'est carbures, une analyse par diffraction au **rayons X**, et, un essai de microdureté sont conseillés.

En tenant compte de tous les résultats obtenus par les différents essais effectués, En particulier, les résultats de l'observation, microstructurale et de la résilience, nous poussent au choix judicieux de l'acier **St52-3**.

On peut conclure que l'usage des deux nuances d'aciers étudié, est possible pour les arbres des moteurs électriques, sauf que l'usage de l'acier **St60-2**, est déconseillé pour les moteurs électriques de grande puissance.

# Bibliographie

- [1] : Dr. Bendaoud- Université de Sidi Bel Abbès : *Généralités sur les machine électriques*
- [2] : J.P. Caron (E.N.S.E.M - I.N.P.L) : *Généralités sur les machine électriques*
- [3] : Théodore Wildi : électrotechnique 3<sup>eme</sup> édition
- [4] : Gabriel Cormier : Transformateur chapitre 8
- [5] : Hydro one : guide de références moteurs.
- [6] : INSTITUT CARDINAL MERCIER : les moteurs électriques
- [7] : Mouad oubidar : Machine synchrone /asynchrone : projet de fin d'étude en génie électromécanique
- [8] : acier de construction / technique de l'ingénieur
- [9] : ENSAM Paris, J. Verdu : CARACTERISTIQUES ET CHOIX DES MATERIAUX
- [10] : Air formation : édition octobre 2007
- [11] : Hanifa Marouf : caractérisation structurale et mécanique du joint soudé 2012
- [12] : EMILIEN : mémento pratique de forge a l'usage du coutelier 4/11/2006
- [13] : MATTHEY SA : Les matériaux ferreux
- [14] : Désignation des aciers, ressources des professeurs de l'académie de Nancy
- [15] : Sylvain Peruzzi : simulation numérique du comportement thermomécanique de pièces réfractaires de coulée continue
- [16] : Kereli kpopan : simulation numérique de la planéité des tôles métalliques formées par laminage.27/11/ 2014

- [17] : Roland FORTUNIER : Comportement Mécanique des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines
- [18] : Dominique Ottello : Technologie des matériaux et alliages particulièrement en aéronautique
- [19] : ESDEP : Caractéristiques des alliages Fer – Carbone
- [20] : Guillaume Sierra : étude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium
- [21] : OFPPT royaume du Maroc : résumé théorique et guide de travaux pratiques
- [22] : Henri Blerzy : la métallurgie du fer et de l'acier/ technique de l'ingénieur
- [23] : Guy MURRY : Transformations dans les aciers / technique de l'ingénieur
- [24] : Taamlallah Ouahiba : Effet des traitements mécanique de surface (TMS) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier 2012
- [25] : G. cailletaud : mécanique des matériaux solides 03 /2012
- [26] : Jean-Claude Charmet : Mécanique du solide et des matériaux Elasticité, Plasticité Rupture
- [27] : Marc Blétry : Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux 2006/2007
- [28] : Dominique FRANÇOIS : essais mécaniques des matériaux / Techniques de l'Ingénieur
- [29] : M. Walib : Résistance des matériaux 24/08/2012
- [30] : SETRA : guide du maitre d'œuvre 03/2001
- [31] : Akram Alhussin : thèse sur transport et stockage des dérives pétrolières 26/10/2010
- [32] : Dominique FRANÇOIS : Essais de rupture