

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.
Ministère De l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,

Faculté de Génie de la Construction,

Département Génie Mécanique.



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master Académique en
Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux.

Thème

*Caractérisation Physico-chimiques de
l'Aluminium extrait d'un Rotor à cage d'écureuil
destiné pour fabrication des moteurs asynchrones
fabriqués par l'Electro-Industries d'Azazga (E I
Azazga).*

Dirigé par : Mme: GHALIA.BAGUENANE

Réalisé par : CHIKHI kanza

Mme: NAOUAL.AZZOUG

AMRANI mourad

Promotion 2021/2022



Liste des figure

Liste des tableaux

Objectifs

-Introduction générale 1

Chapitre I: L'Aluminium

I-1-Généralités sur l'aluminium06

I-1-1-Historique.....06

I-1-2-Production d'aluminium 06

I-1-2-1-Production d'alumine.....07

I-1-2-2-Purification de l'aluminium..... 08

I-2-Principales caractéristiques de l'aluminium 08

I-2-1- Masse volumique08

I-2-2-Conductibilité électrique..... 09

I-2-3-Propriétés réfléchissantes 09

I-2-4-Ductilité, malléabilité 10

I-2-5-Recyclabilité 10

I-2-6-Résistance à la corrosion..... 10

I-3-Propriétés mécaniques..... 10

I-3-1-Module d'élasticité..... 10

I-3-2-Ténacité..... 11

I-4-Propriétés physique de l'aluminium..... 11

Chapitre II méthodes expérimentales :

Introduction 12

II-1-Le rotor..... 12

II-2-Processus de fabrication du rotor..... 13

II-2-1-Procédé de découpage..... 13

II-2-2-Compactage des tôles en paquet rotorique 16

II-2-3-Injection d'aluminium coulé.....	16
II-2-4- L'usinage de surface du rotor.....	18
II-2-5-Equilibrage.....	19
II-3-Etude du moule d'injection.....	19
II-3-1- Moule d'injection du rotor 130-4	20
II-3-2- Conclusion	22
II-4- Matériaux et solutions étudiés.....	22
II-4-1- Préparation des échantillons et des éprouvettes.	22
II-4-1-1-Echantillons.....	23
II-4-1-2-Eprouvettes.....	24
II-4-2-Les techniques expérimentales utilisées	25
II-4-2-1-La fraiseuse.....	25
II-4-2-2-Robot-fil.	26
II-4-2-3-Polisseuse.	27
II-4-2-4-Attaque chimique.	28
II-4-2-5- Microscope optique	28
II-4-2- 6- Duromètre.....	29
II-4-2-7- Machine de mesure de conductivité par courant de Foucault	32
II-4-2-8 Machine de mesure de conductivité par pont de résistance.....	33
II-4-2-9-Machine d'attraction.....	34
II-4-2-10- Microduromètre.	37
II-4-2-11- Spectroscopie d'émission optique.	38
II-4-2-12-Appareil de détermination CS.....	40
II-5- La métrologie.....	41

Chapitre III résultats et discussions

III-1- La composition chimique.	44
III-2-Détection du carbone / soufre	45

III-3-Observation Microscopique.....	45
III-4- Mesure de conductivité	47
III-4-1- Par courant du Foucault	48
III-4-2-Par mesure de résistance par pont	48
III-5- Mesure de la dureté.....	51
III-6- Essai de traction.....	53
III-5-7-Mesure de micro dureté.....	60
Conclusion générale.	61
Perspective	62
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste de figures

Figure I-1 : bauxite.....	6
Figure I.2 : L'alumine.....	7
Figure II-3 : tôle rotorique magnétique.....	13
Figure II-4 : rotor	14
Figure II-5 : encochage à la une.....	15
Figure II-6 : outil successif de découpage des tôles magnétique	15
Figure II- 7 : paquet de tôles rotoriques Et statoriques.....	16
Figure II-8 : aluminium coulé dans four de maintien	17
Figure II-9 : moule ouvert.....	18
Figure II- 10 : moule fermé prêt pour l'injection	18
Figure II-11 : rotor avant et rotor après usinage de surface.....	19
Figure II- 12 : anneau de moulage	20
Figure II- 13 : partie fixe de moule.....	20
Figure II- 14 : la présentation des événements d'air sous forme de rainure.....	21
Figure II-15 : les événements d'air endommagés par la graisse de démoulage solidifiée.....	21
Figure II-16 :coupe transversale d'un rotor	23
Figure II-17 : coupe de rotor.....	23
Figure II-18 :Anneaux et échantillons d'anneaux.....	24
Figure II- 19 : barresavant et après usinage.....	24
Figure II- 20 : arrachement des défauts contenus dans l'aluminium.....	25
Figure II-21 : fraiseuse.....	26
FigureII-22 : appareil de découpe la robot –fil 200.....	27
Figure II-23 : polisseuse électrique.....	27
FigureII-24 : le réactif de l'attaque chimique (le killer)	28
FigureII-25 : appareil de microscope optique.....	29
Figure II-26 : appareil de mesure de dureté duro-mètre.....	32

Figure II-27: sigma scope	33
Figure II- 28 : machine de mesure de résistivité	34
Figure II- 29 : Éprouvettes usinées de section transversale	35
Figure II- 30: machine de traction	35
Figure II-31 : courbe conventionnelle de traction contrainte-déformation.....	37
Figure II-32 : micro duromètre	38
Figure II-33 : appareil de spectrométrie d'émission optique.....	39
Figure II-34 : spectromètre d'émission optique.....	39
Figure II-35 : prélèvement des fragments d'aluminium	40
Figure II-36: CS 800 dual range carbone sulfure déterminateur.....	41
Figure II-37 : mesure avec palmaire.....	42
Figure II-38 : micromètre à profondeur (manuel et numérique).	42
Figure III-1: Observation microscopique Gx40.	46
Figure III-2 : observation microscopique Gx100	46
Figure III-3: observation microscopique Gx200.	47
Figure III-4 : observation microscopique Gx400.	47
Figure III-5: défaut apparus dans l'aluminium.....	52
Figure III-6 : Courbe de traction de l'éprouvette N°1.....	54
Figure III-7: Courbe de traction de l'éprouvette N°2.....	55
Figure III-8 : Courbe de traction de l'éprouvette N°3.....	55
Figure III-9: Courbe de traction de l'éprouvette N°4.....	56
Figure III-10 : Courbe de traction de l'éprouvette N°5.....	56
Figure III-11 : Courbe de traction de l'éprouvette N°6.....	57
Figure III-12 : mode de rupture des éprouvettes 5et7	58
Figure III-13: Courbe de traction de l'éprouvette N°8.....	58
Figure III-14: la rupture de l'éprouvette plus près	60
Figure III-15: empreinte de la micro dureté sur la phase claire.....	61

Figure III-16: poche de gaz occlue.....	62
Figure III-17 : l’empreinte de la bille sur la poche d’oxyde.....	62

Liste des tableaux

Tableau I.1: Propriétés mécaniques d'aluminium pur	10
Tableau II.1: les dimensions de la profondeur des événements d'air.	22
Tableau II.2: caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté	30
Tableau III.1: comparaison des valeurs de pourcentages des éléments chimiques et la norme.	44
Tableau III.2 : valeurs de conductivité électrique mesurées par courant de Foucault.	48
Tableau III.3 : tableau représentant les valeurs de la conductivité Électrique mesurée par pont	49
Tableau III.4 : mesure de dimension des diamètres de l'empreinte.....	52
Tableau III.5: valeurs de la dureté obtenue par l'essai.....	53
Tableau III.6: Valeurs des contraintes et allongements après rupture.	54
Tableau III.7 : comparaison des valeurs calculées et les valeurs de la norme 40501 partie 3 ...	59

Résumé

L'aluminium a prouvé son importance dans l'industrie grâce à sa densité légère et sa bonne conductivité électrique et thermique ; sa résistance à la corrosion grâce à la couche d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 qui la protège des facteurs extérieurs causant la dégradation de la matière.

Pour ces caractéristiques ; l'aluminium est choisi pour la fabrication du rotor à cage d'écureuil (qui représente la partie rotative dans un moteur asynchrone). Pour assurer la bonne conductivité électrique et la légèreté et aussi le facteur économique (il est moins cher que, cuivre, l'argent et le chrome... il est le métal idéal qui répond à la conformité de la fabrication de rotor de référence 130-4.

Nous avons réalisé une étude générale sur processus de fabrication d'un rotor 130-4 réalisé par injection d'aluminium pur à 99,5%.

Remerciement

Ce travail est fait par les grâces du bon dieu, sa volonté devine a décidé qu'il ait aujourd'hui

...

*Nous remercions chaleureusement Madame **BAGUENANE Ghalia** pour son encadrement accompagné d'aide et de soutien.*

*Un remerciement particulièrement à notre Co-encadreur à l'**ELECTRO INDUSTRIE D'AZAZGA** madame **AZZOUG Naoual** pour sa présence et son orientation au quotidien durant notre formation au sein de l'entreprise.*

*Nous adressons nos reconnaissances, nos gratitude, et nos grés pour Monsieur **BELABBAS Ferhat** l'ingénieur du laboratoire pour sa générosité, son temps et ses conseils si précieux*

Nous tenons à remercier :

- *Les gens de Laboratoire **SDM** :*
- *Monsieur **BEN NACER** Mouhand,*
- *Monsieur **BELABBAS KHELLAF**,*
Et l'ensemble du personnel de l'Electro-Industriel qui ont été une deuxième famille pour nous et pour leurs précieux accueil, conseils, et surtout leurs coordinations tout au long de réalisation de ce travail.

*Un grand merci pour Monsieur **BENALIA** Kamel avec qui nous avons partagé le parcours de la formation jour par jour.*

Nos remerciements les plus distingués pour les membres du Jury d'avoir accepté d'examiner notre travail, et de porter un plus pour ce travail par leurs propositions.

Dédicace

Maman ; tu as toujours rêvé de ce jour dont je terminerai mes études et que je sois à tes cotes pour me bénir et te poser mon diplôme entre tes mains, là où tu es je te dédie ce travail.

Pour mon père qui a été souvent présent pour combler ton absence, pour mes sœurs et mon frère, je vous remercie pour vos soutiens et encouragements ; je vous dédie ce travail.

Je le dédie pour mes amis, ma famille, spécialement SOUHILA Sahel.

Je le dédie spécialement pour mon binôme CHIKHI Kenza qui m'a accompagné durant ces années qui a partagé ensemble.

AMRANI Mourad

Dédicace

Je dédie ce travail pour maman ma source d'amour, mon père mon idole dans la vie, mon frère Boubekeur (Salim) la lumière de notre famille.

Mes sœurs Fayrouz, Souad, Mounia et Zahia je vous dédie ce travail accompagné de mon amour.

Pour mon cher amour RADJEF Cherif, je te remercie pour ta présence permanente et ton aide précieux, pour ton amour et ta compréhension.

Mes neveux et mes nièces qui sont mon comble dans la vie,

A Sofia, Nelya, Zakaria que le bon dieu illuminera vos chemins et vous procurera le bonheur et prospérité, pieuse pensée à votre maman Celia Assad.

CHIKHI KENZA

Objectif

L'objectif de ce travail est de mener une étude objective, générale et approfondie sur un rotor à cage d'écureuil destiné à la fabrication du moteur asynchrone et déterminer les caractéristiques Physico-chimiques et mécaniques de l'aluminium et le processus de fabrication de ce Rotor.

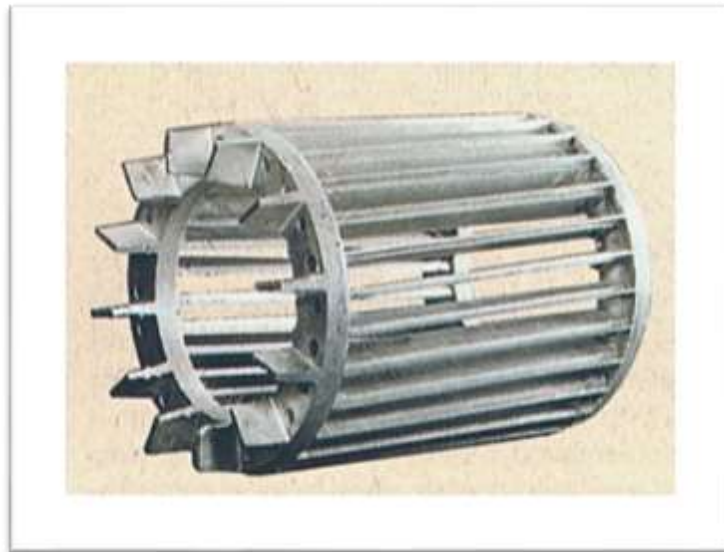
Cette étude se repose sur des normes et des standardisations qui devraient être respectées et strictement appliquées pour assurer une qualité meilleure et une durée de vie plus longue.

Une fois les résultats sont obtenus ; nous effectuons une évaluation pour la fiche du contrôle technique de l'aluminium **99, 9% H de** l'entreprise établie sous la Norme : (**DIN 1712 Edition Décembre 1976**), et à partir de cette évaluation nous définirons les facteurs qui ont influencé sur la qualité du rotor étudié

Et au final, nous proposons les perspectives et les issues pour rectifier, améliorer la qualité et le rendement du moteur asynchrone.

La découverte de l'aluminium en XIX siècle a été un tournant tranchant dans l'industrie des métaux; cette même découverte possédant des caractéristiques mécaniques et chimiques particulières qui lui confèrent la priorité dans des secteurs comme l'aéronautique et le transport et aussi dans notre quotidien (ustensiles de cuisines, emballages, carrosseries et pièces automobiles etc.) selon les optimisations recommandées pour résoudre des problèmes souvent rencontrés dans l'industrie étant la haute résistance à la corrosion et la bonne conductivité qu'elle soit électrique ou thermique ; l'aluminium est un métal non ferreux est favorable pour sa faible densité ce qui le rends un métal léger.

Pour l'étude PHYSICO-CHIMIQUES et mécaniques de l'aluminium pur 99,5% ; il nous a été proposé par l'entreprise de l'électro-industriel le thème de l'injection de l'aluminium pur pour fabriquer un rotor à cage d'écureuil destiné pour fabrication de moteur asynchrone.



On a reparti le travail en trois (03) chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux propriétés physico-chimiques et mécaniques de l'aluminium 99,5% telles que la conductivité électrique, la résistance à la corrosion...

Le deuxième chapitre a rassemblé les procédures expérimentales et la définition des machines et des produits utilisés pour réaliser les essais mécaniques déjà définis dans le premier chapitre qui sont :

- Le processus de fabrication d'un rotor.
- L'étude du moule d'injection.
- La préparation des échantillons.

- L'essai de la conductivité électrique.
- L'essai de la dureté.
- La microstructure (observation microscopique).
- L'essai de traction.
- La micro dureté.
- L'analyse de la composition chimique.
- L'analyse de la présence de carbone.

Le troisième chapitre est consacré à la discussion, à l'interprétation, et la comparaison des résultats obtenus lors des essais mécaniques avec les Normes.

Et, une conclusion qui nous mènera à proposer des solutions et des perspectives pour améliorer la qualité du produit et résoudre les problèmes rencontrés lors de notre étude.

Présentation de l'entreprise

Nous avons eu l'insigne honneur d'effectuer un stage pratique au sein de l'entreprise algérienne de l'électro-industrie de forme juridique : publique économique société par action SPA sise sur la route nationale N°12 azazga; cette entreprise est le leader dans le domaine de fabrication et commercialisation des moteurs électriques et de transformateurs de distribution et groupes électrogènes à l'échelle nationale.

Electro-industries est issue de la restructuration de l'entreprise mère connue sous le nom **enel**(entreprise nationale des industries électrotechniques)en 1999.

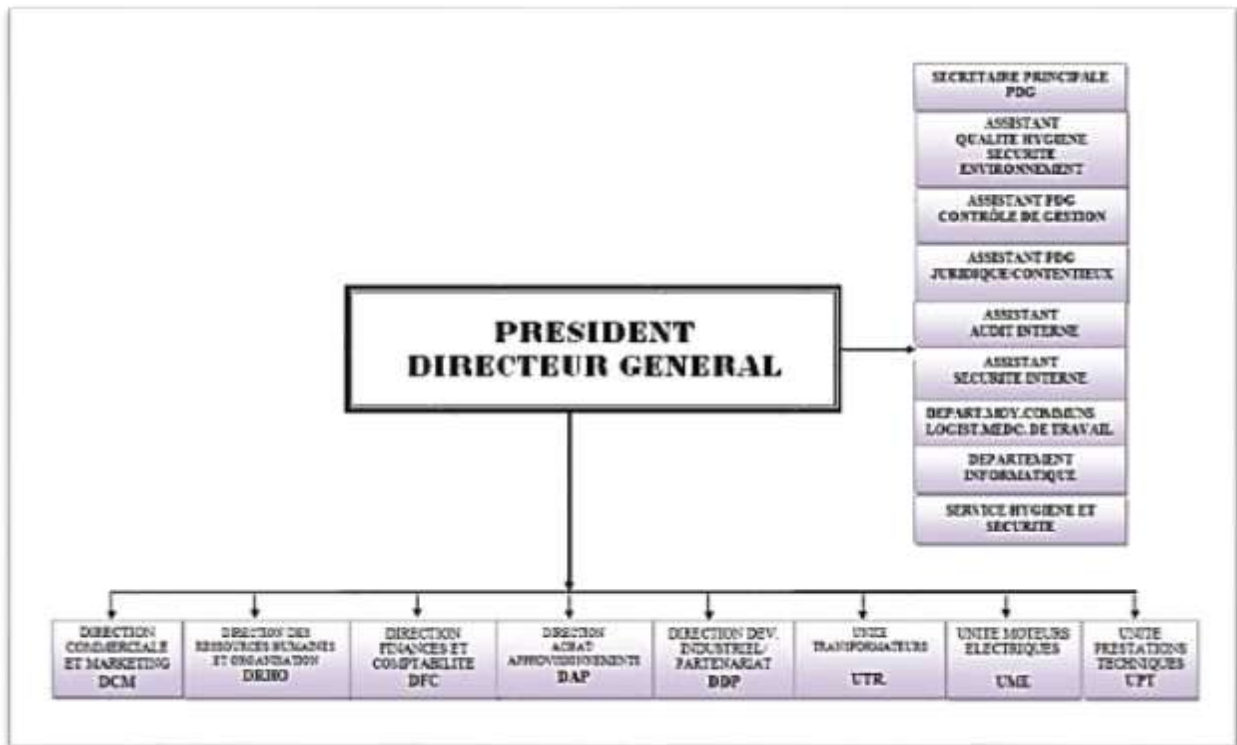
L'usine est mise à la production des transformateurs depuis 1985 ;une année après elle a commencé à produire des moteurs et alternateurs sous licence Siemens; aujourd'hui l'entreprise produit son propre label et son produit couvre jusqu'à 80% de demandes de transformateurs dont la puissance varient entre 50 et 2000KVA aux marchés et environs 30% de besoins de moteurs de 0,25 KW et 400KW ;

Cette usine est structurée sur deux unités :

- _ Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT.
- _ Unité de fabrication de Moteurs Electriques, Alternateurs et Prestation Techniques.

Et un siège d'administration ; les trois blocs sur un même site.

Les ressources humaines d'ELECTRO-INDUSTRIES constituent un facteur de réussite déterminant.



L'entreprise organisée en structures fonctionnelles et opérationnelles garde une flexibilité importante pour répondre au mieux à la fluctuation de l'environnement.

Les effectifs au nombre de 805 (juillet 2017) ont un taux d'encadrement de 15%.

Electro Industries SPA

- Electro Industries SPA
Route Nationale N12 AZAZGA BP 17
15300 TIZI OUZOU ALGERIE
- Téléphone : 213 26 14 99 71
- Fax : 213 26 14 98 00



Slogan de l'entreprise de l'électro-industriel

Chapitre I

L'aluminium

I-1- Généralités sur l'aluminium**I-1-1 Historique**

Le cuivre et le fer ont vu leurs gloires au vieux temps lointain en revanche l'aluminium est considérée une découverte tardive qui a pris naissance au croisement des deux révolutions industrielles au XIXe siècle ; L'aluminium a été connu pour la première fois par le chimiste français Sainte-Claire Deville en 1854 qui a réussi à prendre dans sa main un petit lingot réalisé par voie chimique.

On note que l'invention de l'électrolyse de l'aluminium était le grand point de son progression industriel.

I-1-2-Production d'aluminium

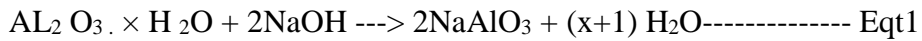
L'aluminium n'existe pas dans la nature sous sa forme pure mais plutôt il existe en forme de minerai composite appelée bauxite (Al_2O_3 , $Al(OH)_3$) qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium et être la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ $1000^\circ C$ dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone [1] .



Figure I-1 : bauxite

I-1-2-1-Production de l'alumine

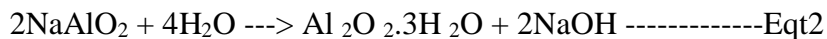
La bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression (30 atm) et de la température (200 à 240°C) l'alumine contenue dans la bauxite se transforme en une solution d'aluminate de sodium



Les autres composants (oxydes de fer et de silice) ou "boues rouges" sont retirés par décantation et filtration. Le fer précipite ainsi que le titanate de soude, la silice précipite également sous forme de silico-aluminate de soude.

Il reste un liquide clair qui est composé d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium.

La bauxite Cette dernière est obtenue est ensuite pompée dans des décomposeurs de 25 à 30m de haut dans lesquels on ajoute du trihydrate d'alumine pur très fin, qui sert à amorcer la réaction. Sous l'effet de l'agitation et du refroidissement graduels, le trihydrate d'alumine en solution précipite et forme d'autres cristaux. Ceux-ci sont ensuite séparés de la solution de soude caustique par sédimentation et filtration. La solution de soude caustique est renvoyée aux autoclaves pour être réutilisée. [2]



L'alumine Al_2O_3 est déshydratée par chauffage à 1100°C en vue d'éliminer l'eau combinée chimiquement (dans un four rotatif) et devient une poudre blanche qui titre à 99%.



Figure I.2: L'alumine.

I-1-2-2-Purification de l'alumine

(Procédé **Hall-Hérault**)

Le procédé le plus utilisé est le procédé "Hall-Hérault", du nom de leurs inventeurs, l'américain Charles Martin Hall et le français Paul Hérault. Il consiste à dissoudre l'alumine calcinée dans de la cryolite (Na_3AlF_6 , qui est un sel fondu, aluminofluorure de sodium). Le courant de l'électrolyse sert à la fusion du mélange entre 900 et 1000°C. L'alumine ne fondrait qu'au-dessus de 2000°C si elle n'était pas en présence de cryolite et de fluorure de calcium pour produire un kilo d'aluminium, il faut compter en moyenne 15 kWh. Le four servant à l'électrolyse est un four en acier revêtu de briques réfractaires dont la cuve est en charbon aggloméré constituant la cathode sur laquelle se dépose l'aluminium fondu et il y a un dégagement d'oxygène sur l'anode en coke de pétrole + brai qui est oxydé

I-2-Principales caractéristiques d'aluminium

L'aluminium dans son état pur possède une combinaison de propriétés mécaniques unique par rapport aux autres métaux qui en font un matériau remarquable :

I-2-1-Masse volumique

L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm³) ou du cuivre (8,96 g/cm³) [3]

Il se place encore mieux vis-à-vis des métaux non ferreux. Son poids inférieur permet des réductions importantes de la consommation d'énergie et des coûts liés au transport, à la fabrication, au montage, à la maintenance et à l'entretien.

I-1-2-Conductivité électrique :

La conductivité électrique peut se définir simplement par l'aptitude ou la capacité du métal à conduire un courant électrique.

Le cuivre est le conducteur métallique le plus courant est de 100% et il est devenu la norme International Annealed Copper Standard (IACS) a été adoptée en 1913 ; La conductivité de l'aluminium par rapport au cuivre est de 61 %, mais le poids de l'aluminium est 30 % inférieur. Cela signifie qu'un fil d'aluminium nu ne pèse que la moitié d'un fil de cuivre nu avec la même résistance électrique. L'aluminium est généralement moins coûteux, comparativement aux conducteurs en cuivre.

$$0,61 \times 58 = 35,38 (\text{m} / \Omega). [6]$$

Plus la conductivité d'une substance sera élevée, plus le courant la traversera facilement et plus la conductivité est basse, plus l'électricité aura du mal à passer.

I-2-3-Propriétés réfléchissantes :

L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie [7]

I-2-4-Ductilité, malléabilité

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées, une ductilité élevée ($A\% \approx 40\%$).

I-2-5-Recyclage

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire. [8]

Actuellement, environ 60 % de l'aluminium est recyclé à la fin de son cycle de vie.

I-2-6-Résistance à la corrosion

L'aluminium et ses alliages ont généralement une bonne tenue à la corrosion (atmosphérique, en milieu marin). L'aluminium est couramment utilisé par les architectes, ainsi que dans les bâtiments publics (La pyramide du Louvre « constituée de verre et de métal »).

Toute offre de nombreuses possibilités de formes et de traitements de surface, des structures de construction, transformation de l'aluminium nécessite beaucoup d'entretien et de la résistance au fil du temps. Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité a permis un développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment ; Les utilisateurs disposent ainsi :

- D'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare de trouver intacts des toitures, des bardages, des équipements de portes, des bateaux..., vieux de plusieurs décennies

- D'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à traitements de coloration.

A l'air libre, une couche d'alumine se forme presque instantanément à la surface de l'aluminium. Cette couche dispose d'une excellente résistance à la corrosion. Elle est assez résistante à la plupart des acides mais moins résistante aux alkalis. [4], [5]. L'aluminium à grains nanométriques résiste mieux à la corrosion en raison de la formation et la stabilité de la couche de passivation [6].

Hors que, la surface des joints de grains (défaut de dimension deux) qui dépendante de la taille des grains, avec la taille des particules intermétalliques (défaut de dimension trois) et leurs distributions, ont une influence sur la formation des piqûres, ainsi que sur la corrosion inter granulaire [7].

I-3-Propriétés mécaniques

Le module d'élasticité de l'aluminium pur est égal à 66,6 GPa et augmente en présence d'impuretés et d'éléments d'addition. D'un point de vue commercial, il est admis pour 69GPa. Dans le cas d'alliages, ce module est compris entre 69 et 72 GPa.

Il augmente sensiblement de 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18%. Le module de torsion est de 25 GPa pour l'aluminium pur ; il est de 26 GPa pour l'aluminium commercial.

Les caractéristiques mécaniques de traction varient en fonction de :

- Conditions de transformation et de moulage
- Sensibilité à la trempe.

Tableau (I.1) : Propriétés mécaniques d'aluminium pur [8]

Etat du métal	Charge de rupture à la traction	Allongements de rupture à la traction
Coulé	5 à 9 kg/mm ²	0 à 5%
Laminé et recuit	8 à 10 kg/mm ²	30 à 40%
Laminé et écroui	20 à 25 kg/mm ²	2 à 5%

I-3-1-Module d'élasticité

Le module d'élasticité de l'aluminium pur est égal à **66,6 GPa** et augmente en présence d'impuretés et d'éléments d'addition. D'un point de vue commercial, il est admis pour 69GPa. Dans le cas d'alliages, ce module est compris entre 69 et 72 GPa.

Il augmente sensiblement de **70 à 82 GPa** lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18%. Le module de torsion est de **25 GPa** pour l'aluminium pur ; il est de 26 GPa pour l'aluminium commercial.

Les caractéristiques mécaniques de traction varient en fonction de :

- Conditions de transformation et de moulage.
- Sensibilité à la trempe.
- Maintient à chaud.

I-3-2-La ténacité

La ténacité ou résistance résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante en particulier dans le cas des alliages à haute résistance car elle conditionne la fiabilité et la sécurité des structures. Celle –ci est bonne pour l'aluminium et ses alliages

I-4-Propriétés physique de l'aluminium

L'aluminium est un élément du troisième groupe de la classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26,98 g/mol et sa température de fusion est de 660°C. Il cristallise dans le système cubique à faces centrées (CFC), avec un paramètre de maille 0,404 nm

Les principales propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans le Tableau (I.2) : propriétés physiques de l'aluminium pur, [10]

Propriété	Unité	Valeur	Remarque
Numéro atomique		13	
Masse volumique ρ	Kg.m ⁻¹	2698	
Point de fusion	°C	660,45	Sous 1013. 10 ⁻³ bar
Point d'ébullition	°C	2056	Sous 1013. 10 ⁻³ bar

Pression de vapeur	Pa	$3,7 \cdot 10^{-3}$	à 927 °C
Energie interne massique ν	J.kg ⁻¹	$3,98 \cdot 10^3$	
Capacité thermique massique Cp	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	237	à 27 °C
Coefficient de dilatation linéique	10 ⁻⁵ .K ⁻¹	23,1	à 25°C
Résistivité électrique	10 ⁻⁹ .Ω.m	26,548	à 25°C
Susceptibilité magnétique K		$0,6 \cdot 10^3$	à 25°C

Chapitre II

Méthodes expérimentales

Introduction

Après avoir défini les propriétés physico-chimiques et mécaniques nous avons mené l'étude sur un rotor 130-4 réalisé d'aluminium pur, et l'étude de moule sous pression et les paramètres qui influencent sur le changement et la carence sur les propriétés mécaniques et physico-chimique.

II-1-Le rotor

Un rotor est la partie mobile (tournante) de moteur ou d'un mécanisme rotatif qui permet de mettre en rotation la charge mécanique, il n'est relié à aucune alimentation ; il est constitué principalement de :

- Un empilage de disques minces qui sont appelés éventuellement des tôles rotoriques clavetés sur l'arbre du rotor pour canaliser et faciliter le passage du flux magnétique.

Ces tôles rotoriques comportent des encoches dans les quelles l'aluminium soit injecté et les extrémités de cet empilage soit couronnées par la même matière en anneaux.



Figure II-3 : tôle rotorique magnétique.

- D'une cage d'écurieil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.



FigureII-5 : rotor

II-2-Processus de fabrication d'un rotor :

Annexe :(plan de fabrication rotor130-4)

(Plan de fabrication arbre 130-131-133)

La fabrication du rotor se réalise dans l'unité motrice asynchrone et génératrice électriques et cela en plusieurs étapes qu'on résume en :

II-2-1-Procédé de découpage :

C'est la première opération qui se réalise par des outils de forme et de découpage pour transformer les bobines tôles d'un alliage d'acier magnétique à grain nom orienté de référence (M800-50A) selon la norme NF EN 40106 en tôles rotoriques et statoriques.

L'entreprise possède 3 machines-outils de découpage et de d'encoche :

- Machine automatique :la pièce qui tourne et l'encoche s'empreinte selon la commande par logiciel.
- Machine Semi-automatique 1 :la tôle s'encoche à la fois à l'aide d'une matrice et poinçons.
- Machine semi-automatique 2 : la pièce tourne et le poinçon empreinte l'encoche a la une.



Figure II-6 : encochage à la une.

On place la bobine pour distribution à une vitesse déterminée, qui se déplace en intervalle pour ne pas avoir de retard entre les procédures, le pas d'avancement calculé est le diamètre de la pièce de différents types selon la commande lancée à la machine.

Pour avoir des pièces conformes la machine de découpage possède un système pour détecter la non-conformité.



Figure II-7 : outil successif de découpage des tôles magnétique

II-2-2-Compactage des tôles en paquet rotorique

C'est le procédé d'empilage des tôles rotoriques et les agraffer en les emmanchant autour d'un arbre qui a déjà subi des opérations d'usinage (voir l'annexe N ° jointe de plan de fabrication d'arbre) et prêt pour l'emmanchement, selon la longueur du paquet on définit le nombre de tôles :

Diamètre de tôle = 0,5 mm.



Figure II- 8: paquet de tôles rotoriques Et statoriques

II-2-3-Injection d'aluminium coulé

Le rotor (paquet rotorique et l'arbre) sera prêt pour l'injecter en aluminium pur :

- Grâce au four de fusion industriel, on met à la fusion des lingots d'aluminium pur à la température de fusion à 800°C puis le transporter vers des fours de maintien à une température de 650°C à l'aide d'une poche de maintien.

La procédure de dégazage est une étape d'une importance majeure mais qui a été éliminé pendant le processus de fabrication :

Le dégazage se fait pendant le transport de l'aluminium fondu dans des poches à partir du four de fusion vers le four de maintien. On met une pastille à base de chlore par immersion, cette pastille se dissous et il y aura création de gaz de chlore (Cl₂) avec les

bulles d'oxygène emprisonnées dans la coulée ,et l'apparence d'une couche flottante sur la surface de l'aluminium fondu de la scorie composée essentiellement des oxydes et sulfures ...qui sera extraire

C'est la méthode la plus fiable pour éliminer les impuretés et l'air de la coulée de l'aluminium.

Mais, malheureusement cette procédure de dégazage n'est pas prise en considération.

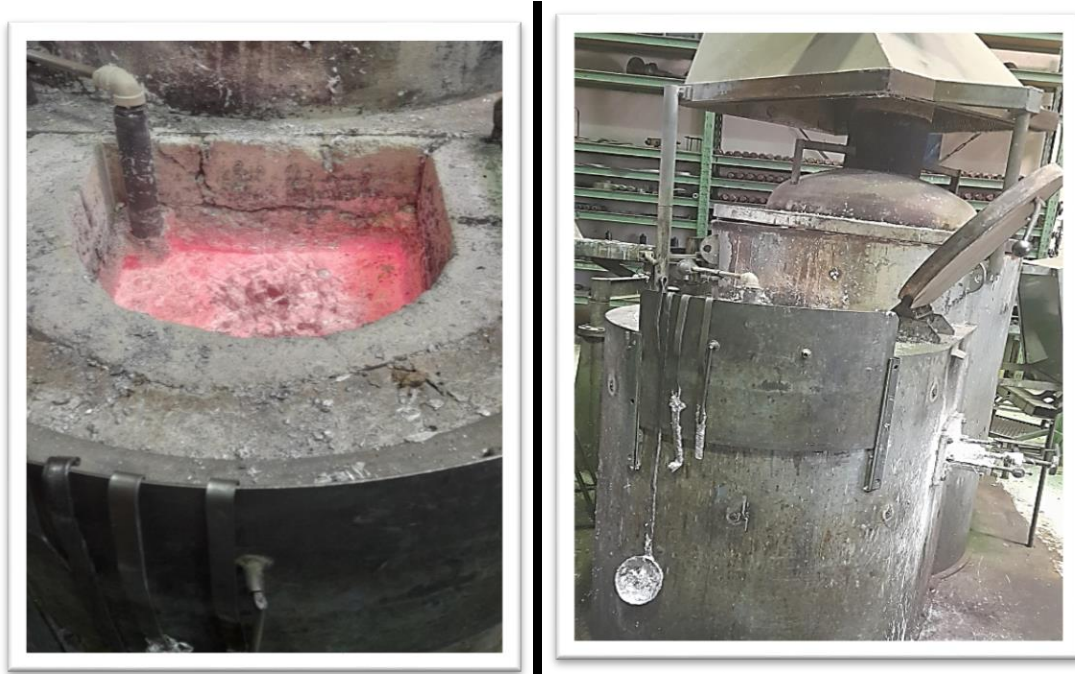


Figure II-9 : aluminium coulé dans four de maintien

- On prépare le moule pour l'opération en appliquant une graisse de démoulage (pâte de potillage) aux parois intérieures du moule pour permettre un démoulage limpide, on règle le moule à une pression d'injection 300 jusqu'à 400 bar pour permettre la pénétration de l'aluminium dans les encoches au même temps et avec une grande vitesse pour assurer une alimentation simultanée de la coulée dans les canaux secondaires du moule ;
- On place le rotor dans le moule et après fermeture de moule, la luche verse un dosage précis de l'aluminium coulé,
- On exécute le piston ; l'aluminium est déjà injecté.

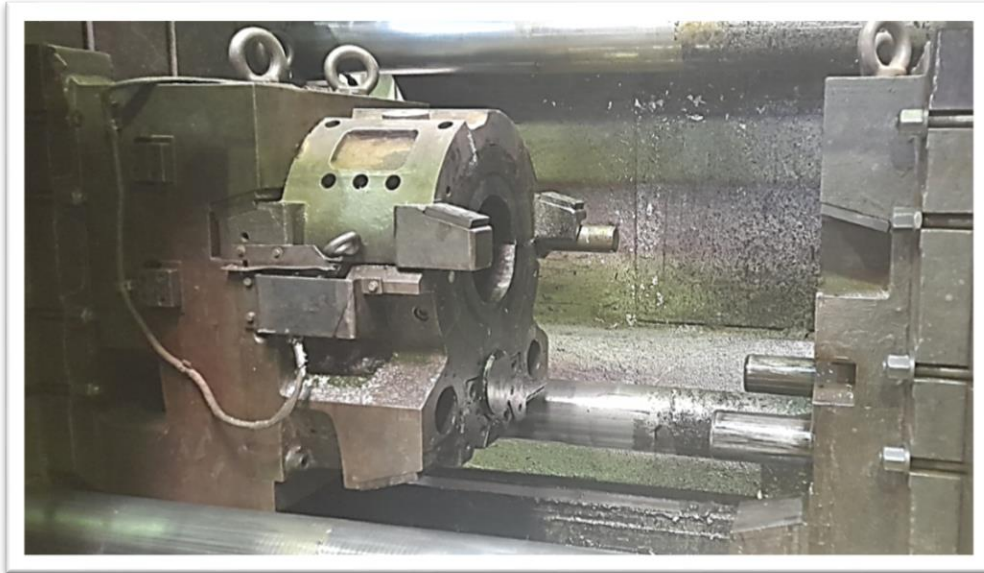


Figure II-10 : moule ouvert.

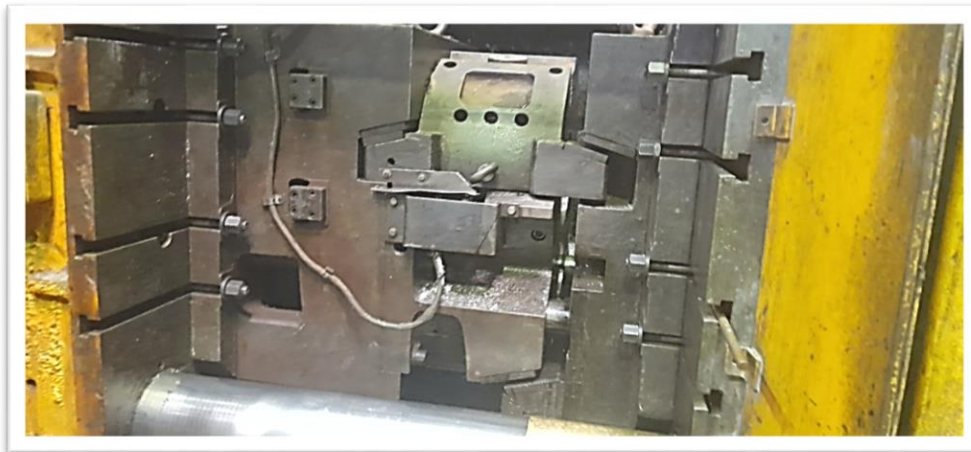


Figure II- 11 : moule fermé prêt pour l'injection

- **Ejection de rotor**

Après refroidissement du moule avec de l'huile lubrifiant de température de (100°C à 120°C), on récupère le rotor et on sépare la carotte d'injection du corps du rotor.

II-2-4-L'usinage de surface du rotor

Au cours de l'opération de découpage il a été pris en considération l'usinage de surface d'où il a été préservé une distance de 0,40 mm entre rotor et stator. Pour but d'être faire parfait (de point de vu électromagnétique) en assurant une cylindricité parfaite sur tout le long de cylindre du rotor.

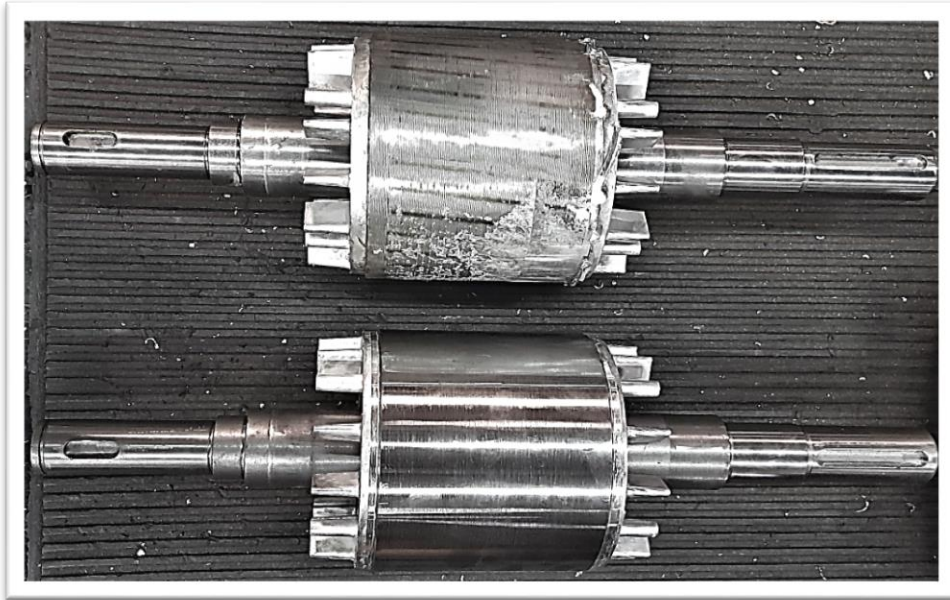


Figure II-12 : rotor avant et rotor après usinage de surface.

II-2-5-Equilibrage

C'est le rajout ou l'enlèvement de la matière en raison d'assurer une durée de vie longue pour les Motors en éliminant les vibrations et avoir une pièce conforme ; le rajout de la matière se fait en fixant des rondelles de la matière à l'aide d'un pistolet (compression de la matière).

Au final le bon rotor conforme sera peint en rouge pour raison de protection.

II-3-Etude de moule d'injection

En raison de mieux cerner les paramètres influençant sur la qualité des rotors ; on a effectué aussi une étude sur la technique de moulage sous pression

C'est un procédé de moulage permanent que les grandes entreprises utilisent pour la production de nombreuses séries et quantitatives pour les marchés, comme exemple l'électro-industriels qui a adopté ce procédé de moulage sous pression pour production des rotors :

Pour raison de sa rapidité et son facteur économique pour transformer les coulées (métaux fondus) en pièces selon les formes et les dimensions voulues ; ce procédé est d'une importance industrielle appréciable.

Les étapes de moulage sont déjà expliquées dans : **II-2-4-injection d'aluminium coulé.**

II-3-1-Le moule d'injection de rotor 130-4

Le staff de service de l'unité (2A), ont été accueillants et généreux avec nous et ils n'ont pas hésité à marquer leurs aides, et donc on a eu le privilège de jeter un œil sur les empreintes du moule d'injection d'un rotor 130-4 du plus près :

Qui est constitué d'un acier (X38 Cr MoV5) forgé à tenue à chaud qui est traité avec une trempe d'une dureté de 42 à 45 HRC et deux revenus ; de parties essentielles :

La partie fixe : c'est la partie liée à la canalisation d'alimentation principale située dans la partie fixe du moule, il contient des événements d'air

La partie mobile :

Qui contient aussi des événements d'air qui servent à évacuer tout l'air entre les deux parties du moule pour éliminer le problème de présences de vides et de pores à cause de ce retour d'air si ces mêmes événements d'air sont endommagés ou bloqués.



Figure II- 13 : anneau de moulage

(Partie fixe et mobile).



Figure II- 14 : partie fixe de moule.

Nous avons eu la chance de démonter et d'étudier ces empreintes de plus près pour vérifier l'état et le bon fonctionnement des événements d'air et on a pu obtenir ces images :



Figure II- 15 : la présentation des événements d'air sous forme de rainure.



Figure II-16: les événements d'air endommagés par la graisse de démoulage solidifiée.

On voit clairement les résidus des pattes de potiallge dans un état solidifié et cela est dû à la température élevée et permanente lors de son utilisation, et on remarque aussi l'infusion d'une quantité minimale de l'aluminium en coulée,

Les deux parties du moule possèdent des événements d'air qui servent à évacuer l'air pour que l'opération d'injection se fera sans problème de retour d'air qui forme des pores et des vides dans la matière, subséquemment à l'état des moules après démontage et après un nettoyage profond, on a mesuré les profondeurs de ces événements et les valeurs obtenues sont :

Tableau(II-1) : les dimensions de la profondeur des événements d'air.

0,01	0,01	0,03	0,06	0,035	0,015	0,03	0,02	0,015
------	------	------	-------------	-------	-------	------	------	-------

En comparant avec les cotations du plan **0,03±0,01 mm** donc ça varie **entre 0,02mm et 0,04mm** la plus part événements ne sont pas dans la norme.

II-3-2- Conclusion

Les événements d'air des moules d'injection jouent un rôle primordial en évacuant l'air pour but d'éliminer les pores et les vides, mais malheureusement cette norme n'a pas été respectée et c'est la raison principale de la présence abusée des vides et des pores.

II-4- Matériaux et solutions étudiés

II-4-1- Préparation des échantillons et des éprouvettes

La forme de l'encoche et ses dimensions nous a conduits à la norme iso 6892_1 :2009(F).

On réalise une coupe transversale sur un rotor, et on tire les tôles pour avoir une partie de cage en aluminium ; il faut noter que cette opération de séparer les tôles des encoches et très délicate cela est dû aux dimensions des encoches et à la rupture de barres



Figure II-17 : coupe transversale d'un rotor



Figure II-18 : coupe de rotor

On a réussi à extraire 11 encoches d'un total de 28 dont on a perdu 3 pendant l'usinage ; ce qui implique que l'étude expérimentale sera réalisée sur 8 barres de cage et des échantillons des bases :

II-4-1-1-Les échantillons

Les échantillons sont coupés de la base de la cage pour les essais de dureté, observation microscopique, composition chimique et micro dureté.

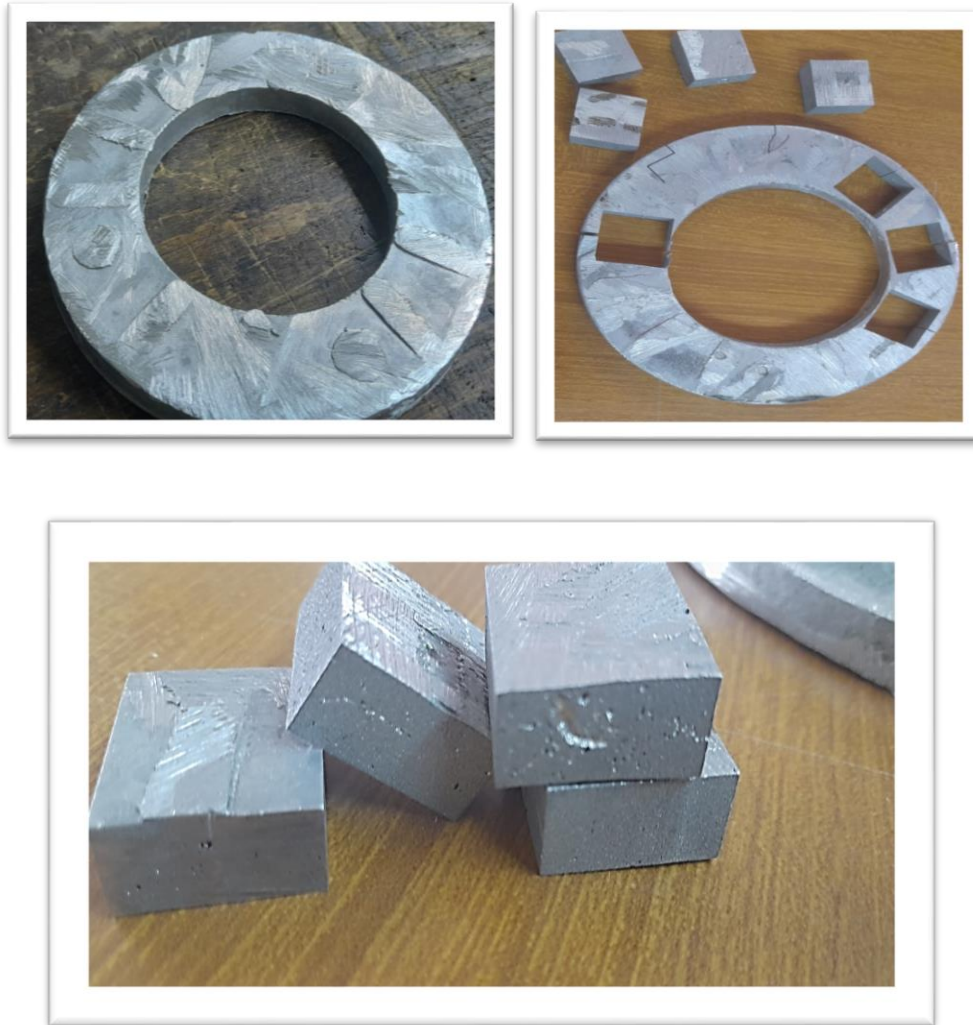


Figure II-19 : Anneaux et échantillons d’anneaux.

II-4-1-2-Les éprouvettes

Pour les essais de traction et les essais de conductivité électriques :



Figure II- 20: barres avant et après usinage.

Note :

On mentionne que pendant la préparation des échantillons il y a une présence importante des vides à l'intérieur de la matière injectée, la figure ci-dessous montre l'arrachement de miettes de la tôle qui se sont intrus dans l'aluminium coulé.



Figure II- 2: arrachement des défauts contenus dans l'aluminium.

II-4-2-Techniques expérimentales utilisées :

II-4-2-1- Fraiseuse :

Le fraisage est un procédé de fabrication, et surfaçage en bout à partir d'un mouvement rotatif d'une fraise selon un axe longitudinal pour réaliser un éprouvette parallélépipède :

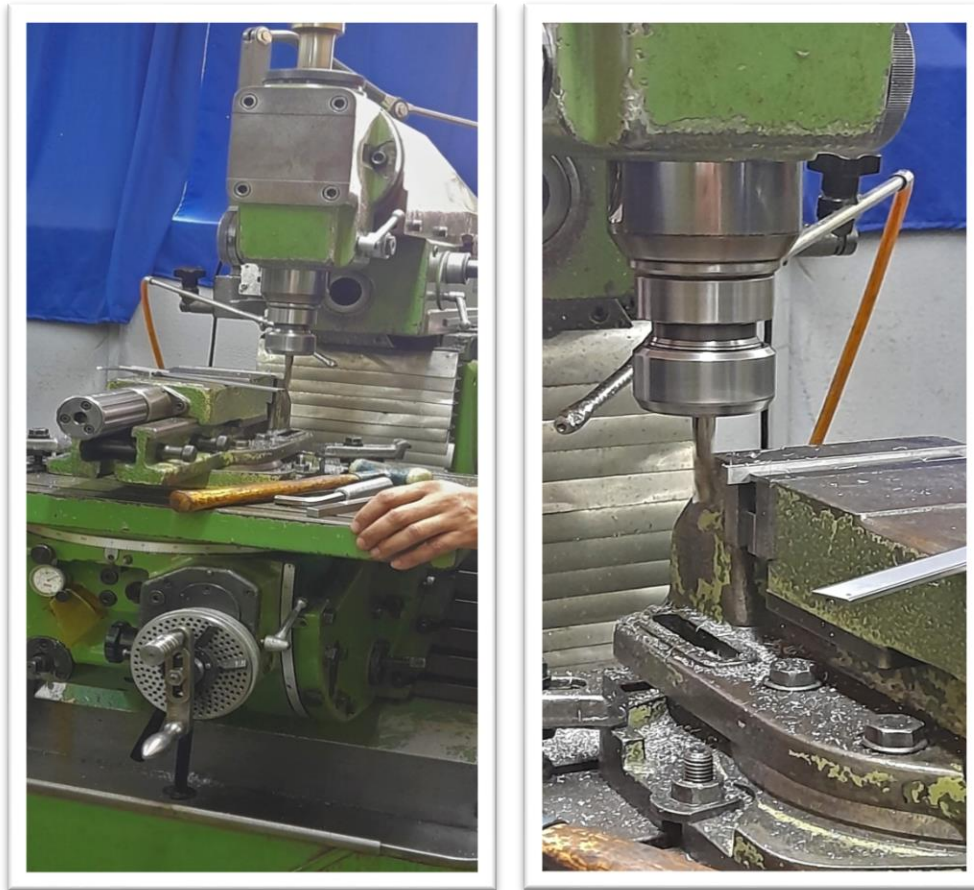


Figure II-22 : fraiseuse.

II-4-2-2-Robot-fil (électro –érosion) :

C'est un appareil d'usinage ; ce procédé fonctionne à l'aide d'une électrode fil en cuivre enrobé en tantale alimenté d'un courant électrique émergé dans de l'eau distillée) qui produit en contact avec la surface une étincelle très puissante qui a la capacité d'arracher une petite matière par décharge électrique (le fil traverse la matière et la coupe selon le programme donné au logiciel).



Figure II-23 : appareil de découpe la robot –fil 200.

II-4-2-3-Polisseuse :

Après avoir coupé les échantillons, on réalise un polissage mécanique pour but de finition des surfaces à l'aide de deux machines polisseuses, au sein du laboratoire SDM à l'université MOULOUD MAAMERI, et des papiers abrasifs de plus en plus fin en commençant par le grain 240 en descendant jusqu'à arriver au grain 2500 (p240- p400- p800 – p1000- p2000- p2500) ; et cela pour avoir un résultat d'état de surface lisse avec des reflets :

Les deux polisseuses ont deux gradients de vitesse :

- 150 tours/mins.
- 300 tours/mins.



Figure II-24: polisseuse électrique

Note :

Pendant le polissage on a remarqué présence d'une odeur indésirable qui ressemble fortement à l'odeur de la graisse de démoulage utilisée pour faciliter le démoulage du rotor, ce que signifie la présence de la pâte de potillage en quantité considérable.

II-4-2-4- Attaque chimique

On attaque l'échantillon chimiquement pour but de distinguer les différentes phases de métal, et de révéler les joins des grains et pouvoir les distinguer sous L'observation optique, on mit des gouttes de produit appelé killer de composition chimique suivante :

1% HF + 0,5 % HCL +2,5 % HNO₃

ON laisse agir sur l'échantillon pendant 15 minutes puis on rince et on fait sécher : l'échantillon est prêt pour l'observer sous microscope optique.



Figure II-25 : le réactif de l'attaque chimique (le killer)

II-4-2-5- Microscope optique

C'est un appareil de résolution microscopique qui nous permet de déterminer les phases structurales et la texture granulaire (leurs tailles, leurs formes et leurs distribution) de l'échantillon étudié, aussi on peut détecter les défauts de la structure (pores, vides fissures...). On mentionne aussi qu'il a plusieurs grossissements

($\times 40$ – $\times 100$ – $\times 200$ - $\times 400$).

Principe :

Le microscope optique fonctionne à la base de la diffraction de la lumière il est doté de deux lentilles.

Il est lié à un ordinateur sur lequel on reçoit les images et les interpréter.



Figure II-26 : appareil de microscope optique.

II-4-2-6-Duro mètre

C'est La machine de mesure de dureté de **DIA –testor 2Rc** se trouve au laboratoire physique de l'entreprise électro-industriel ; par définition la dureté d'un métal est la force de résistance mécanique qu'il manifeste contre une pénétration d'un autre métal plus dur que lui.

Un même principe pour plusieurs types d'essai de dureté qui sont couramment utilisés ; on mentionne que la différence réside dans la forme de pénétrateur ainsi que la valeur de charge appliquée.

Ces types sont :

1) L'essai de Brinell(HB) :

On l'applique sur des matériaux doux ou mi-durs, la bille correspondante à cet essai est en acier trempé.

2) L'essai de Rockwell :

Deux sortes de billes sont utilisées :

Cône de diamant avec un angle de sommet de 120°.c'est l'essai de dureté cône de diamant Rockwell (HRC ou HRA).

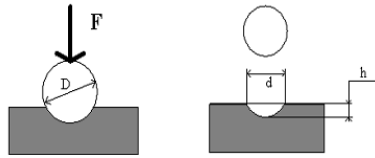
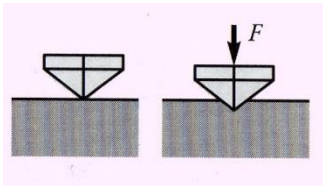
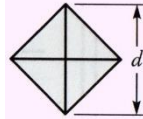
Bille d'acier trempé de diamètre 1/8 ou 1/6 de pouces. (L'essai Rockwell HRB).

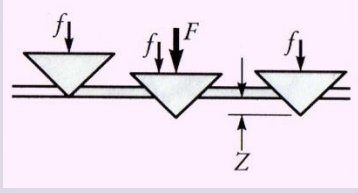
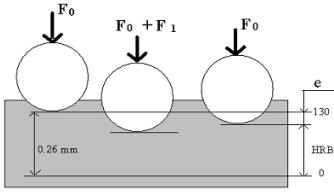
L'essai est utilisé pour les métaux en aciers trempés et pour les aciers durs.

3) L'essai de dureté Vickers :

Le pénétrateur de l'essai de dureté Vickers est en diamant de forme pyramidale d'une base carrée dont l'angle au sommet est de 136°.

Tableau (II-2): caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté [4] [2]

Méthodes d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètres mesurés	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure ($\leq 10\text{mm}$ de diamètre)	250 à 3000Kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée ; angle entre les faces opposées	5 à 100 Kgf		Diagonale de l'empreinte (d) :	$HV = \frac{1,854F}{d^2}$ 

	136°				
Rockwell C	Cône de diamant au sommet de diamètre 120°	Pré charge fde 10Kgf ; F=150 Kgf		Profondeur de l'empreinte Z	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59mm de diamètre)	Pré charge fde 10Kgf ; F=100 Kgf		Profondeur de l'empreinte e	$HRB = f(e)$

Description de la machine

La machine de mesure de dureté est constituée de deux parties :

- La partie fixe est sous formes d'un plateau fixe sur lequel on pose l'échantillon
- La partie mobile : c'est la partie d'essai ou le pénétrateur qui est sensé à réaliser les trois essais, on trouve aussi un sélectionneur du poids qui se présente sous forme de disques.



Figure II-27 : appareil de mesure de dureté duro-mètre.

Principe

Le principe de mesure de la dureté est éventuellement le même pour les trois essais, il consiste à enfoncer un pénétrateur dans l'échantillon du métal étudié ; la dimension de l'empreinte et sa profondeur (selon le type de l'essai) détermine la valeur de la dureté.

II-4-2-7- appareil de mesure de conductivité électrique par courant de Foucault (SIGMASCOPE)

La méthode de mesure de la conductivité électrique par courant de Foucault est une méthode non destructive qui réalise des mesures ponctuelles et superficielles de profondeur d'environ 30 micro mètres, du coup elle ne prend pas en considération tous les défauts contenant dans la pièce.

Appareil

L'appareil utilisé pour mesurer la conductivité par courant de Foucault est le Sigma scope ; c'est un conductimètre électrique pour les métaux non ferreux ; il se repose sur le principe de la conductivité électrique à l'aide de courant de Foucault électromagnétique pour détecter et quantifier les défauts de surface et sous les surfaces de profondeur de 30 micromètres environ.

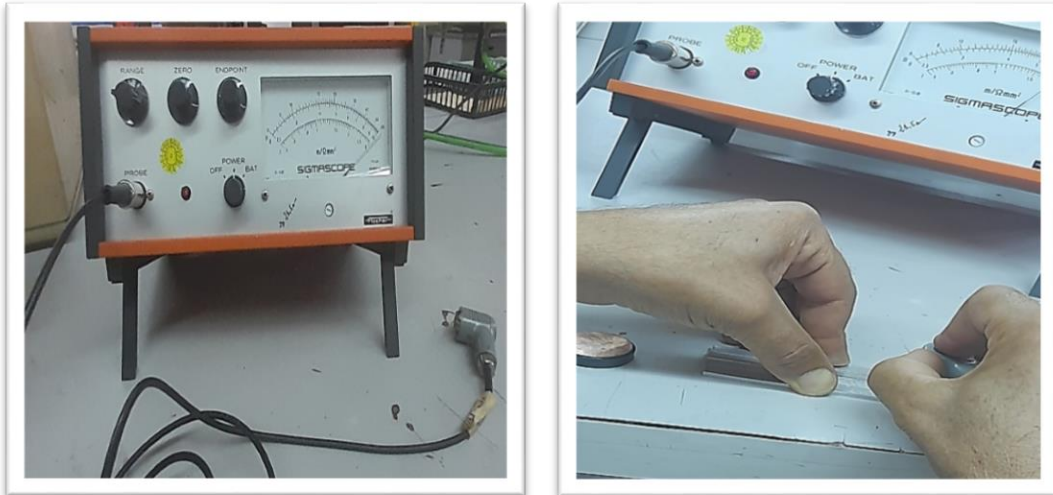


Figure II-28 : sigma scope

II-4-2-8- appareil de mesure de résistivité électrique par méthode du pont de Wheatstone résistance

Pour arriver la conductivité électrique avec cette méthode, on mesure d'abord la résistivité électrique puis on calcule la conductivité électrique sachant que les deux mesures sont inversement proportionnelles :

La résistance (en ohms Ω) de l'échantillon rectiligne de longueur L (en mètres) et de section droite d'aire S (en mètres carrés), faite d'un matériau de résistivité ρ (en ohms mètres), vaut : $R = \rho \times \frac{L}{S}$ c'est la loi de Pouillet [13]

La résistivité est la grandeur inverse de la conductivité (symbole : σ) : $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

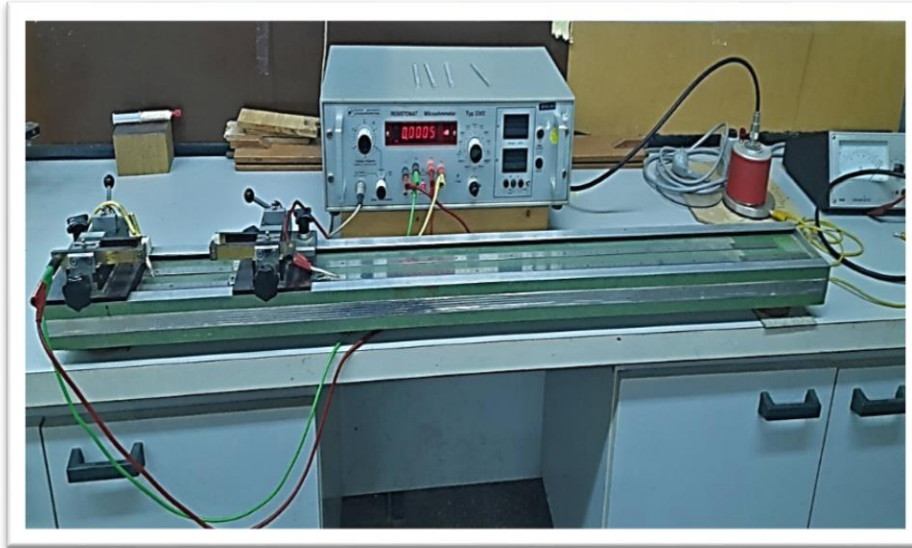


Figure II- 29 : machine de mesure de résistivité

Principe de la machine

On place l'échantillon entre les pincettes conductrices et on alimente la machine avec un courant électrique, le courant traverse l'échantillon tandis que l'écran affiche la résistivité du matériau étudié.

II-4-2-9-La machine de traction

(Annexe NF EN ISO 6892-1)

L'essai d'attraction a été réalisé au laboratoire de physico-chimie de l'enel, cette usine contient une machine de traction qui supporte une charge de 100kN. Le principe de cette machine est de placer l'éprouvette normalisée entre les deux mors de la machine de traction, on règle le capteur de déformation à 00,

On applique progressivement une force de traction croissante entre 00 jusqu'à la force de la rupture de l'éprouvette.

Après rupture la machine enregistre un graphe de l'allongement après rupture en fonction de la force appliquée.



Figure II- 30 : Éprouvettes usinées de section transversale

Rectangulaire (voir Annexes B et D) 2009



Figure II- 31 : machine de traction

Cet essai est d'une importance primordiale car il permet de définir les différentes caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés et prévenir leurs comportements lors de sollicitation.

Parmi ces caractéristiques on mentionne :

Résistance élastique : est défini comme l'intensité de la force à u point donné :

$$R_E = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{Mpa})$$

Résistance à la rupture :
$$R_r = \frac{F_r}{S_0} \quad \left(\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{Mpa} \right)$$

Coefficient d'allongement :
$$A\% = \frac{L_c - L_0}{L_0} \times 100$$

{ L_0 : est la longueur initiale entre repères
 { L_c : est la longueur ultime entre repères après rupture.

Déformation :
$$\varepsilon = \frac{L_c - L_0}{L_0} .$$

Module de Young : c'est le module d'élasticité $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$; **La courbe de traction conventionnelle des matériaux ductiles :**

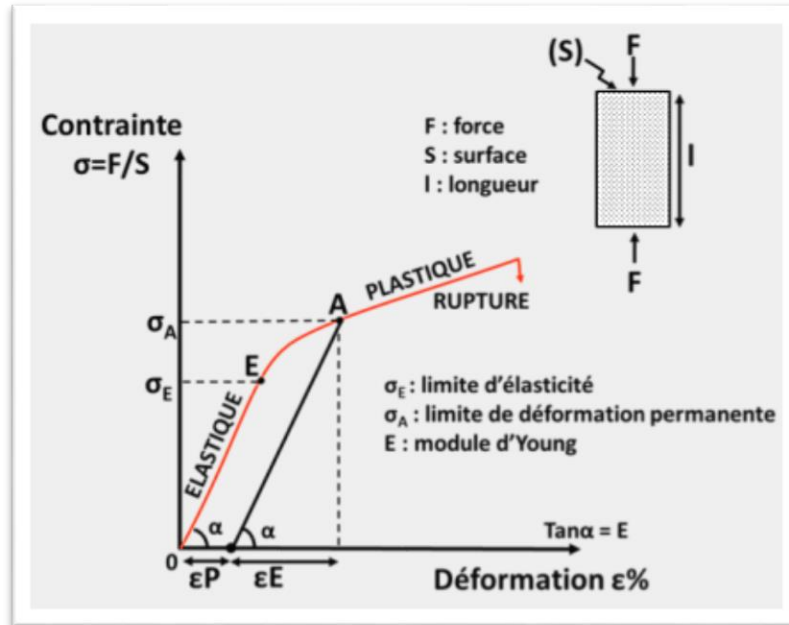


Figure II-32 : courbe conventionnelle de traction contrainte-déformation.

II-4-2-10-Micro duromètre

Le micro duromètre de Vickers est une machine qui consiste à mesurer la dureté de différentes phases qui constitue le matériau, c'est une mesure qui se fait donc à l'échelle microscopique, éventuellement cet appareil est doté d'un microscope optique pour afin de détecter la phase, une fois la zone est localisée, on appuis sur le bouton START pour que la lentille cède et le pénétrateur la remplace pour cible la phase et marque l'empreinte et le diamètre de cette dernière permette de calculer la valeur de la micro dureté , le calcul sera fait par un logiciel (programme) déjà installé sur le micro duromètre .



Figure II-33: micro duromètre

II-4-2-11-Spectromètre d'émission optique

Cet appareil détermine la composition chimique et la concentration de la substance à analyser du matériau mis à étudié, il définit les éléments chimiques contribuant à sa microstructure,

Principe de la machine

Le principe de cet essai est d'effectuer une excitation des atomes par bombardement de l'énergie ultraviolet (UV) émis par l'électrode de la sonde sous forme d'un arc électrique et projetée sur l'échantillon ; tandis que les atomes excités seront portés thermiquement à des températures très élevées qui retournent à des niveaux plus bas en libèrent des radiations (d'une orbite électronique à une autre plus petite) , une énergie qui sera quantifié par sa longueur d'onde :

$$\Delta E = h\nu$$

h : constante de Planck.

ν : la fréquence du photon émis .

Chaque longueur d'onde est caractéristique à un élément du tableau périodique ou un alliage déjà mesuré par cet appareil est enregistré.

On mesure ensuite l'intensité de ces radiations émises. L'intensité est proportionnelle à la concentration ($I_e = k \cdot L_e$, I_e : est l'intensité lumineuse émise,

K : est un coefficient propre à chaque élément.

Cette formule n'est valable ici encore que pour les faibles concentrations et en l'absence d'auto-absorption ou d'ionisation. La mesure de la concentration se fait, tout comme en absorption, à l'aide d'une courbe d'étalonnage.



Figure II-34 : appareil de spectrométrie d'émission optique.

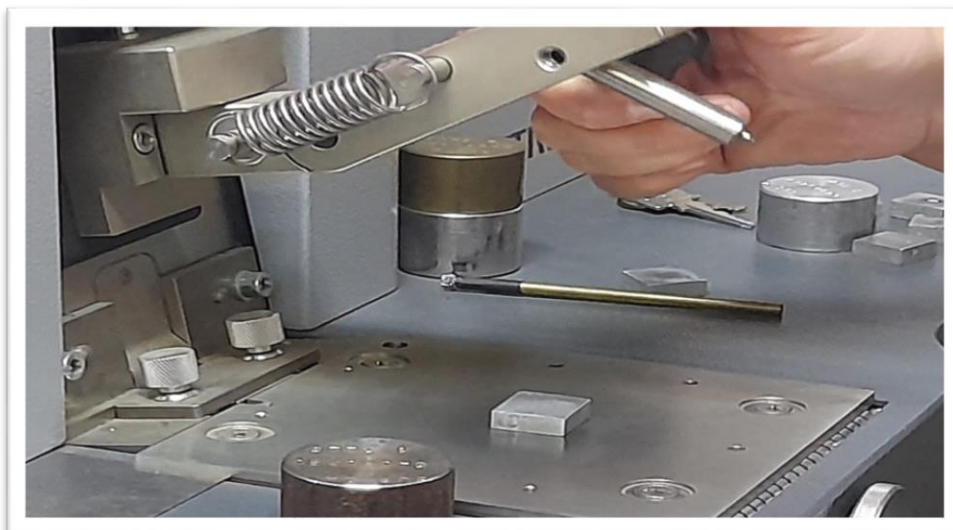


Figure II-35 : spectromètre d'émission optique.

II-4-2-12-appareil de détermination CS (carbone et soufre)

Pour affirmer l'hypothèse de présence de carbone (pâte de potillage) ,nous avons opté pour un essai chimique de détection de carbone /sulfate au sein de laboratoire de l'électro-industriel ,

Le principe de la machine :

Le principe de mesure est basé sur la combustion de l'échantillon et sur la mesure des gaz dégagés pendant la combustion par absorption infrarouge. Chaque gaz absorbe de la lumière infrarouge selon une longueur d'ondes ; pour cela cet appareil est mené d'une lampe infrarouge qui sera chauffée électriquement émetts une radiation infrarouge qui traverse une cuve très étroite de mesure dans lesquels les gaz traversent et absorbent une partie de la lumière infrarouge et en sortant de la cuve la

Le forme de l'échantillon pour cet essai n'est pas exigé (poudres, copeaux, fragments, et des fois liquide ...).



Figure II-36 : prélévement des fragments d'aluminium

On a préparé les échantillons à l'aide d'une perceuse pour avoir de la matière sur le long et le fond du notre barre et anneau :



Figure II-37 : CS 800 dual range carbone sulfure determinator.

On met l'échantillon à l'intérieur une bobine du circuit oscillant par le piédestal, on induit avec une quantité de Tungstène qui a pour rôle d'accélérer la fusion de l'aluminium comme suit :

1,5g d'aluminium + / 0,2g Tungstène pour une durée de 50 seconde

Pendant combustion (le carbone et le soufre contenu dans l'aluminium se transforment en gaz CO_2 et SO_2 (la combustion se fait sous courant de l'oxygène pour permettre la transformation en gaz de carbone et soufre).

Les signaux venant des cellules sont spécifiques et correspondent à la concentration de CO_2 et SO_2 dans le mélange de gaz ils sont linéaires et intégrés électroniquement, divisés par le poids de l'échantillon et affichés sous forme de pourcentage.

II-5-la métrologie

La métrologie par définition est l'ensemble des outils et des moyens techniques utilisés pour la mesure de dimension des pièces mécaniques (contrôle dimensionnel).quelle soit une mesure de longueur ou de profondeur ou d'angularité .

Les procédés mécaniques d'usinage ne sont pas précis qu'une pièce ne peut être réalisée de façon rigoureusement conforme aux dimensions fixées au préalable.

Les outils de la métrologie ont fait partie de notre formation pratique et se résume en :

- **Le palmaire :**

Est un appareil de mesure de dimension gradué en millimètre et le dixième de millimètre,

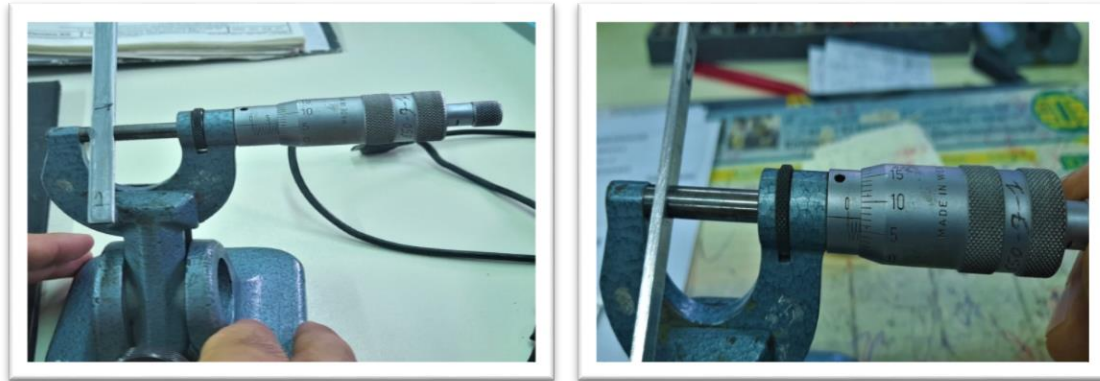


Figure II-38 : mesure avec palmaire.

- **Le micromètre à profondeur**

C'est un appareil de mesure de profondeur métrologique, il possède un pied qui sera introduit dans la profondeur voulu mesurée est la graduation verticale mesure en millimètre et l'autre graduation horizontale à la précédente mesure en dixième de millimètre, il y a deux sortes de ces micromètre l'un est manuel et le deuxième est numérique (il fait la lecture automatique et affiche la dimension sur le petit afficheur).

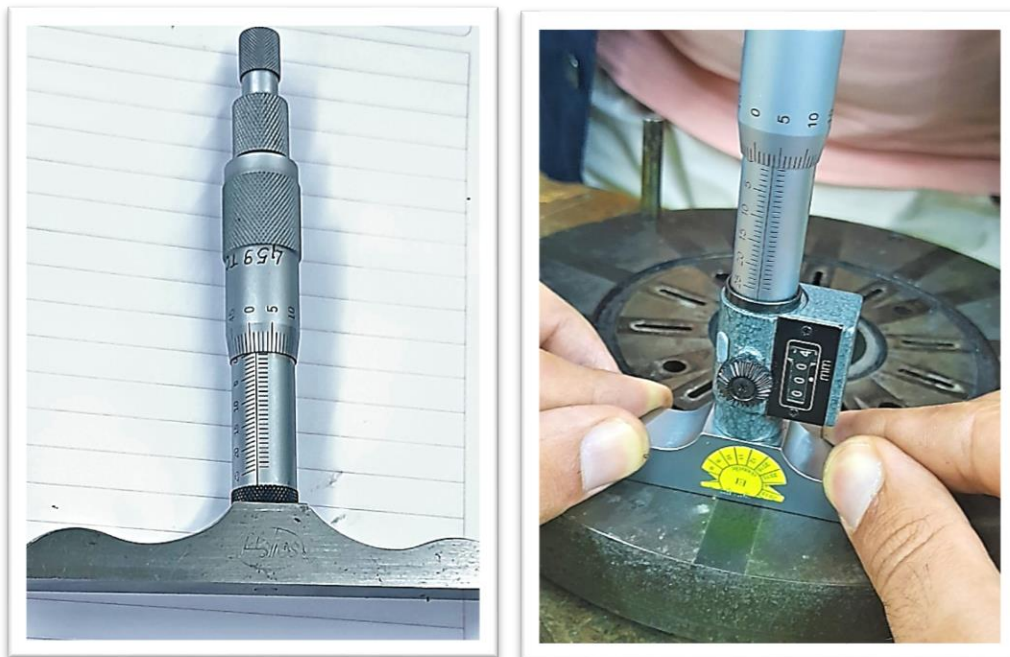


Figure II-39 : micromètre à profondeur (manuel et numérique).

On a utilisé les micromètres à profondeur pour vérifier la profondeur des événements de l'air dans le poinçon du moule d'injection qui mesure selon le plan schématique 0.03 mm avec une tolérance de ± 0.01 mm.

Chapitre III

Résultats et discussion

Introduction

L'aluminium pur est un métal qui a prouvé son importance dans l'industrie grâce à ses propriétés qui se résume en sa capacité de recyclage indéfini et sa faible densité ce qui le favorise pour sa légèreté ainsi que sa conductivité électrique, dans ce chapitre nous allons principalement compléter le chapitre précédent en discutant et comparons les résultats et mettre en évidence la solution que nous établirons en conclusion.

III-1- La composition chimique :

L'essai de la spectrométrie d'émission optique a révélé la concentration de la composition chimique de différents échantillons on la comparant avec **E-AL H** de L'annexe 1712 partie 3, tenant compte que cette aluminium est destiné pour usage électrique (le rôle de rotor dans le moteur est de conducteur électrique)sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau (III- 1) : comparaison des valeurs de pourcentages des éléments chimiques et la norme.

	Al%	Total (%) impuretés	Fer%	Cu%	Zn%	Si%	(Cr+Mn+Ti+V) %	Autres %
E-AL H	99,5	0,5	0,35	0 ,02	0 ,04	0,20	0,03	0,03
Notre analyse	98,9	1,1	0,261	0 ,006	0,0261	0,696	0 ,0221	0,0888

Discussion des résultats

On remarque que la concentration des éléments révélés par notre analyse et celle de la norme sont différentes tel que :

- La concentration d'aluminium devrait être égale à 99,5 % en revanche l'analyse chimique a révélé un taux de 98,9% avec une différence de 0 ,6 %,
- Le silicium apparait en valeur excessive qui égale à 0,696 % dépassant la valeur maximale autorisée par la norme %max =0 ,25%.
- La valeur maximale du Fer et du Zinc ainsi que le cuivre autorisées par la norme sont %max Fer=0,35%

%max Zn=0,04%

%max Cu=0,02%

Conclusion

Le test de la composition chimique a prouvé une différence de concentration des éléments, et cette différence influence sur les caractéristiques physico-chimiques voir mécaniques de notre métal pur.

III-2-Détection du carbone /soufre

Le test de détection de présence du carbone a révélé les résultats suivants :

Présence d'un taux du carbone dans l'anneau 0,03% et dans la barre 0,025%, ce qui signifie que la pâte de potillage s'est fondu dans la coulée de l'aluminium, sachant que cette graisse est de nature organique. Le taux de présence du soufre est de 0,014 dans l'anneau et 0,002% dans la barre.

Conclusion

Ces résultats attestent la présence du carbone et du soufre, ce qui confirme notre hypothèse de présence de pâte de potillage en quantité considérable qui est composé principalement du carbone. (Le soufre est inclus à partir de la paroi intérieure de la poche pour déplacement de la coulée d'aluminium du four de fusion jusqu'au four de maintien, cette paroi est constituée principalement de plâtre).

III-3-observation microscopique

L'observation microstructure nous a révélé la microstructure de l'aluminium pur en photos :

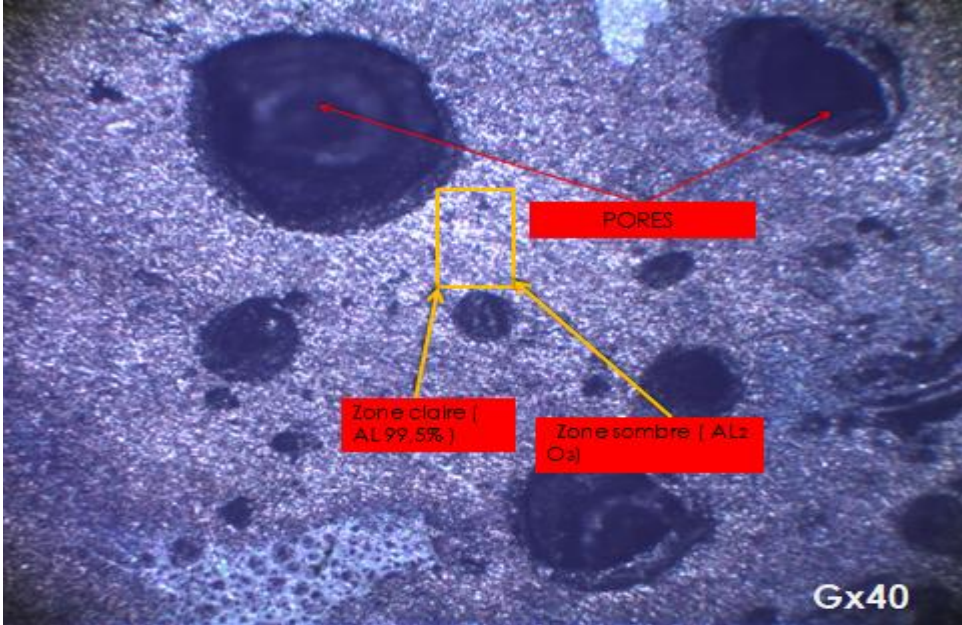


Figure III-1 : Observation microscopique Gx40.

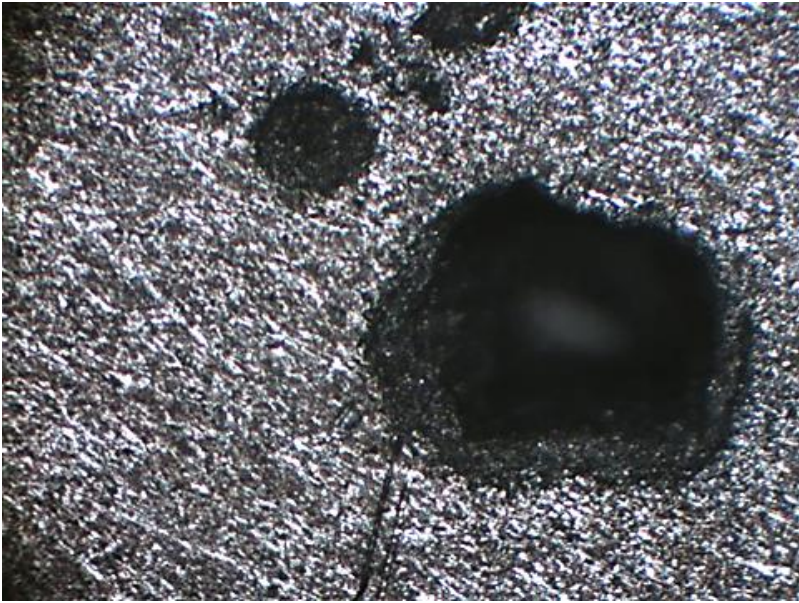


Figure III-2 : observation microscopique Gx100

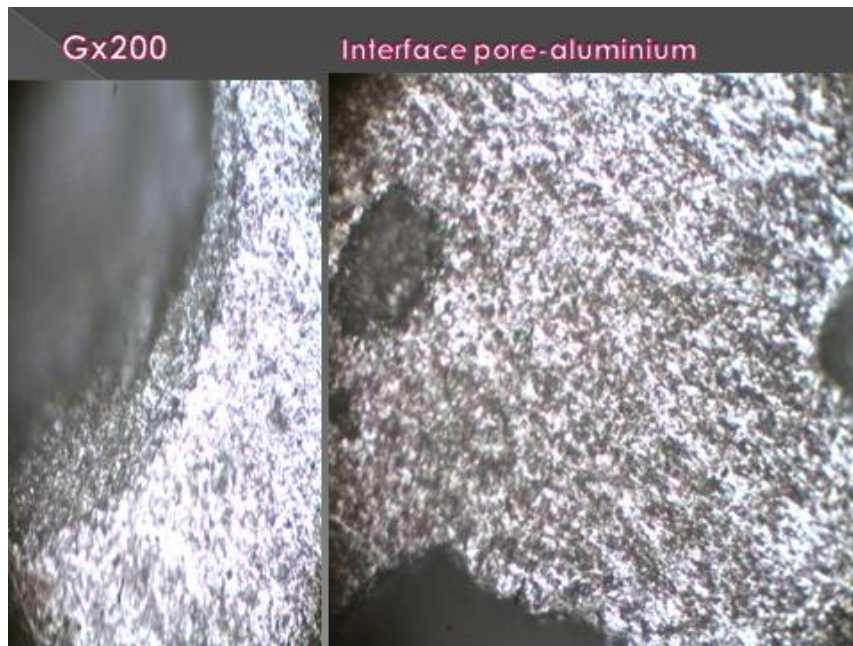


Figure III-3 : observation microscopique Gx200.

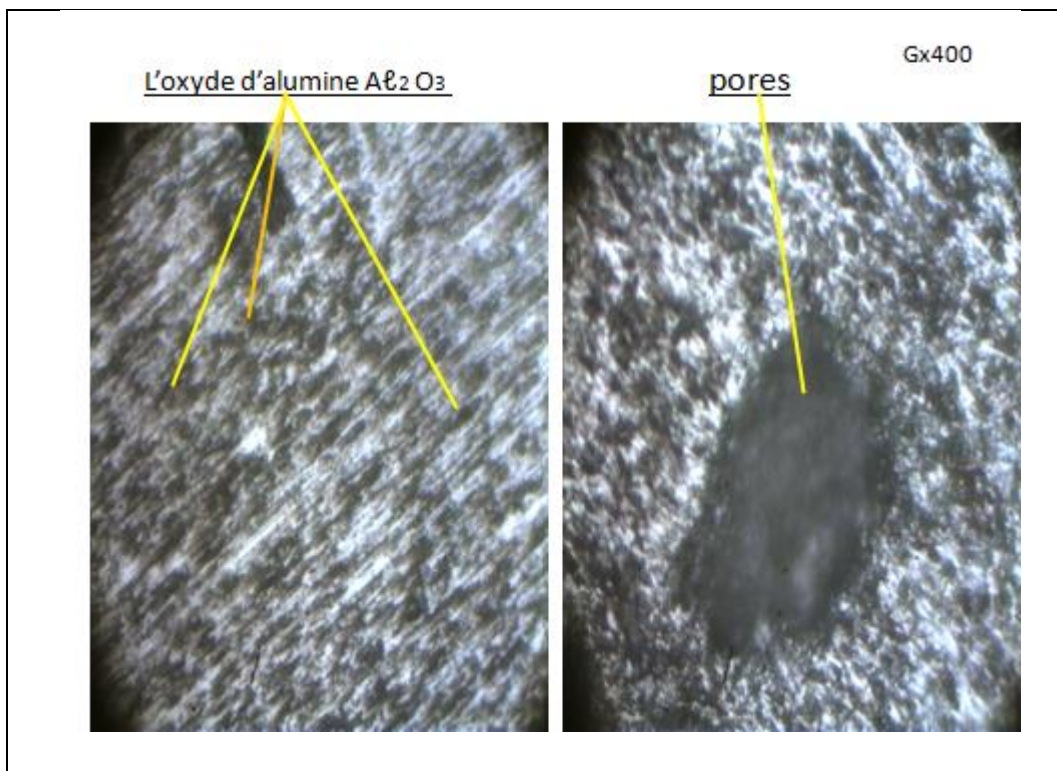


Figure III-4: Observation microscopique Gx400.

Interprétation des figures

L'observation microscopique révèle la microstructure de l'aluminium qui s'interprète par :

La zone claire à allure grise lumineuse est la monophasé de l'aluminium pur qui représente 98,9% du matériaux étudié, couvert d'une couche fine sombre de couleur pale qui est l'oxyde d'alumine (Al_2O_3) qui se forme dans l'immédiat par contact avec l'air qui se considère comme couche protectrice et dure contre les agents de corrosion extérieur.

On voit clairement de nombreux vides et pores qui contiennent des gaz occlus formés pendant l'injection et qui sont restés dans la matière à cause de la mauvaise évacuation d'air et des gaz et même de la quantité non contrôlée de pâte de potillage (graisse de démoulage).

III-4- Mesure de conductivité

La différence de La conductivité électrique entre les éprouvettes extraite d'un même rotor est due aux défauts existants dans la matière (vides, pores, matières intruses comme la pâte de potillage ...) qui jouent le rôle d'isolants électrique ce qui influence sur le rendement électrique de l'aluminium pur fabriqué en rotor.

On a mesuré la conductivité par deux méthodes pour y comparer et préciser le rendement de l'aluminium utilisé pour la fabrication de ce rotor :

III-241- Par courant de Foucault

Les valeurs obtenues lors de l'essai de mesure de conductivité électrique qu'on a réalisé au laboratoire sur les éprouvettes d'encoches ; sont dans le tableau suivant :

Tableau(III-2) : valeurs de conductivité électrique mesurées par courant de Foucault.

Eprouvette	Conductivité électrique (m/ Ω .mm ²)		
1	35	35	35
2	35	35	35,5
3	35	32,5	32
4	35,5	35	35,5
5	30	29	32
6	35	31	34
7	34,5	35	35
8	35	35,5	34,5

Discussion des résultats

La méthode de mesure de conductivité par courant de Foucault démontre que les éprouvettes contiennent des défauts et cela est expliqué par la différence de valeurs de conductivité mesurée sur la même barre (ex : éprouvette N°5 marque une valeur inférieure en comparaison avec les autres éprouvettes. Ainsi que pour l'éprouvette N°3 et l'éprouvette N°6 marquent des valeurs inférieures à la valeur normalisée de conductivité électrique d'aluminium qui est égale à 35,38.

III-4-2- Par mesure de résistance par ponts de Wheatstone

Cette méthode est plus rentable parce qu'elle tient à tous les défauts contenants sur toute la surface de l'éprouvette dont la longueur de mesure est de 100 mm de la section droite de l'éprouvette (mesure surfacique).

Les valeurs obtenues lors de l'essai sont mentionnées dans le tableau ainsi que la valeur calculée en moyenne des dimensions de l'éprouvette, la surface et la conductivité électriques calculée :

Tableau (III-3) : tableau représentant les valeurs de la conductivité électrique mesurée par pont .

	R (Ω)	b (mm)	e (mm)	Moye R (Ω)	Moye b (mm)	Moye e (mm)	S (mm ²)	Résistivité (Ω.mm ³ /m)	Conductivité Electrique (m / Ω.mm ²)
1ere	0,1496 0,1504	8,07 8,05 8,05 8,06 8,08	2,84 2,79 2,84 2,79 2,84	0,15	8,062	2,82	22,73	0,034095	29,32
2 ^{ème}		7,99	3,07						

	0,1376 0,1367	7,96 7,91 7,88 8,02	3,06 3,08 3,06 3,04	0,1371 3	7,952	3,062	24,3490	0,033394	29,94
3 ^{ème}	0,1446 0,1441	7,84 8,01 8,02 8,02 8,05	3,06 3,11 3,13 3,10 3,07	0,1443 5	7,982	3,098	24,4408	0,0352803	28,34
4 ^{ème}	0,144 0,1436	8,07 8,06 8,10 8,06 8,05	2,83- 2,79 2,78 2,85 2,86	0,1438	8,068	2,822	22,7678	0,0327401	30,54
5 ^{ème}	0,1562 0,1559	7,54 7,56 7,57 7,57 7,55	2,97 2,96 2,89 2,86 2,89	0,1560 5	7,558	2,914	22,024	0,0343684	29,09
6 ^{ème}	0,1343 0,1345	8,01 8,06 8,06 8,06 8,04	3,02 3,00 3,05 3,07 3,09	0,1344	8,042	3,046	24,4959	0,0329224	30,37
7 ^{ème}	0,1417 0,1412	8,16 8,19 8,09 8,04 8,04	3,05 3,01 3,03 3,03 3,08	0,1415	8,104	3,04	24,63616	0,0348601	28,69
8 ^{ème}	0,1536 0,1558	7,97 7,94 7,96 8,01	2,73 2,74 2,72 2,79	0,1557	7,982	2,76	22,0303 2	0,0343012	29,15

		8,03	2,82						
MOYENNE									29,43

Discussions des résultats

En comparaisons la moyenne de la conductivité électriques qui est égale à 29,43 et la Norme 40 501 partie 3 JOINTE EN ANNEXE (entre 30 et 34 ($m / \Omega \cdot mm^2$)) on constate une instabilité ainsi qu'une perturbation de la conductivité et cela est expliqué par une présence importante de vides qu'on détecte déjà à l'œil nu, et la présence de la pâte de potillage qui pendant l'injection s'est mijoté avec l'aluminium coulé ce qui a réduit la conductivité et tous ces défauts jouent un rôle des obstacles et d'isolants .

Conclusion

La conductivité électrique d l'aluminium calculée (comprise entre 28,34 et 30,54 $m / \Omega \cdot mm^2$) est inférieure à la valeur moyenne exigée par la Norme qui est compris entre (30 et 34 $m / \Omega \cdot mm^2$), et cette différence est causée par :

- La différence de la concentration de la composition chimique.
- Les défauts détectés qui jouent le rôle d'isolants électriques (vides, les tôles incluses dans l'aluminium liquide, la présence de la pâte de potillage en quantité considérable, les oxydes d'aluminium Al_2O_3).

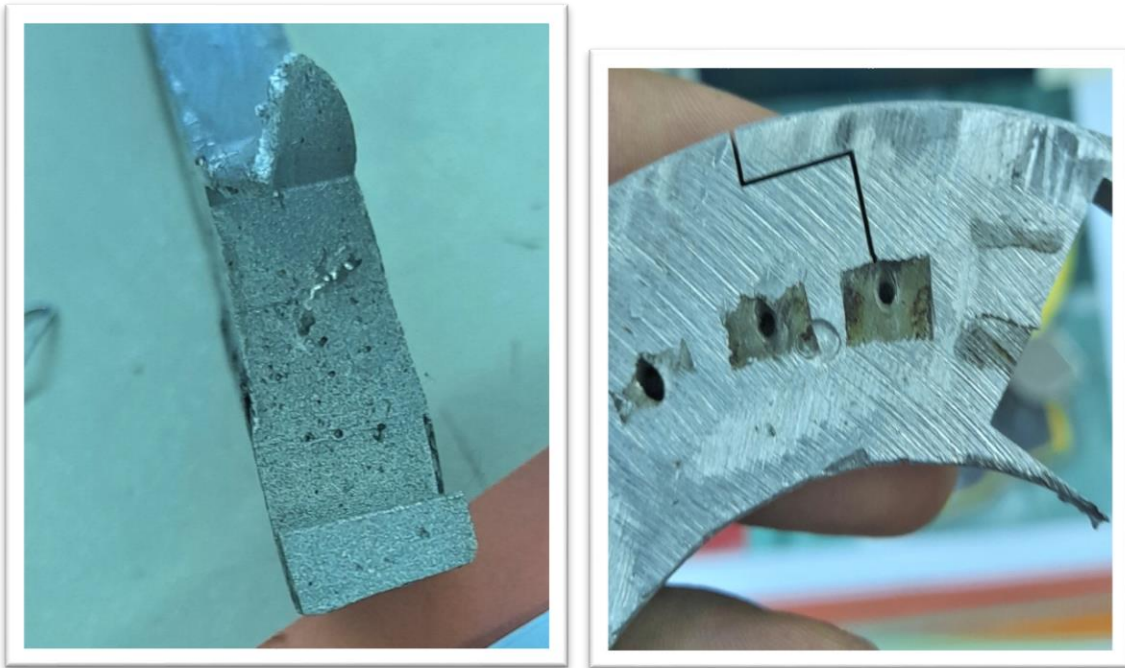


Figure III-5 : Les défauts apparus sur l’Anneau du circuit.

Remarque :

Dans la figure ci-dessus, on remarque que la ligne de coupe du fil de l’électroérosion a été freinée par des substances intruses isolantes, ce qui explique la carence de la conductivité électrique d’une partie par rapport à une autre.

III-5-Mesure de la dureté

On a réalisé un test de dureté pour 2 échantillons d’anneaux et 3 échantillons barres et on a obtenu les résultats suivants :

Essai : brinell avec une bille de diamètre D=2,5 mm.

La charge : F=31,25 Kg.

$$HB = \frac{F}{S}$$

$$S = \frac{\pi D}{2} \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Tableau (III-4) : mesure de dimensions des diamètres de l’empreinte dans les échantillons

Echantillon anneau (d mm)			échantillon barre (d mm)			
A1	A2	A3	B1	B2	B3	

1 ^{er} essai	1,35	1,27		1 ^{er} essai	1,2	1,16	1,19
2 ^{eme} essai	1,29	1,13		2 ^{eme} essai	1,16	1,17	1,16
3 ^{eme} essai	1,31	1,29		3 ^{eme} essai	1,21	1,20	1,18
Moyenne d _a	1,256	1,31		Moyenne d _b	1,19	1,17	1,18

Calcul de la dureté :

$$\text{Surface de l'anneau : } S_{\text{barre}} = \frac{3,14 \times 2,5}{2} \times (2,5 - \sqrt{(2,5)^2 - (1,256)^2})$$

$$S_{\text{barre}} = 1,182 \text{ mm}^2$$

$$HB_{\text{barre}} = \frac{31,25}{1,182} = 26,438 \text{ HB}$$

Les valeurs de duretés obtenues pour l'ensemble des échantillons sont figurées dans le tableau suivant :

Tableau(III-5) : valeurs de la dureté obtenues par l'essai.

Echantillon	Barre 1	Barre2	Barre3	Anneau 1	Anneau 2	Moyenne dureté (HB)
Dureté (HB)	26,44	27,4	26,9	21,1	23,4	25,05

Selon l'état métallurgique de l'aluminium (**fundu F : l'aluminium s'injecte après sa fusion**) on opte pour la norme **40 501 partie 3 (DIN 40 501 Teil 3)** pour l'aluminium destiné à usage électrique (rotor électrique) (**E-AL F7**) :

Cette norme indique que la dureté de l'aluminium E-AL F7 varie entre **20HB - 30 HB**

La dureté de l'aluminium étudié **25 HB** est incluse dans l'intervalle exigé par la norme.

Conclusion :

On conclue que l'ensemble de défauts détectés dans la matière étudiée n'ont pas d'influence sur la dureté de l'aluminium après le procédé thermique qu'il a subi (fusion et refroidissement).

III-6 Essai de traction :

L'essai de traction a été réalisé selon l'annexe B de la norme (NF EN ISO 6892-1 de l'essai de traction année 2009) sous température ambiante de 25°C.

Le tableau suivant montre l'évolution de la force de rupture et l'allongement de l'éprouvette **après** rupture ainsi que la résistance élastique et le module de Young calculés pour chacune des éprouvettes :

Tableau(III-6) : valeurs des contraintes et allongements après rupture

Eprouvette	Force de rupture (N)	Allongement d'éprouvette après rupture (mm)		S (mm ²)	R _m (N/mm ²)	R _{élastique} (N/mm ²)	E (GPa) (module de young)
1ere	1176	6%	53	22,73	51,737	42	96,8
2 ^{ème}	1498	6%	53	24,3490	61,522	46	139,65
3 ^{ème}	1345	2%	54	24 ,4408	55,03	45	136,37
4 ^{ème}	1387	7%	53,5	22,7678	60,919	46	105,47
5 ^{ème}	1172	6%	53	22,024	53,214	46	217,5
6 ^{ème}	1373	8%	53	24,4959	56,05	44	114,15
7 ^{ème}	1319	/	/	24,6361	53,539	/	/
8 ^{ème}	1148	4%	52	22,0303	52,11	38,13	108,95
Moyenne	/	5,57%	/	/	55,51	43,87	131,27

Courbes obtenues par la machine pour chaque éprouvette (f,l) sont converties par le programme l'Excel en (σ , \mathcal{E} %) :

Eprouvette n°1 :

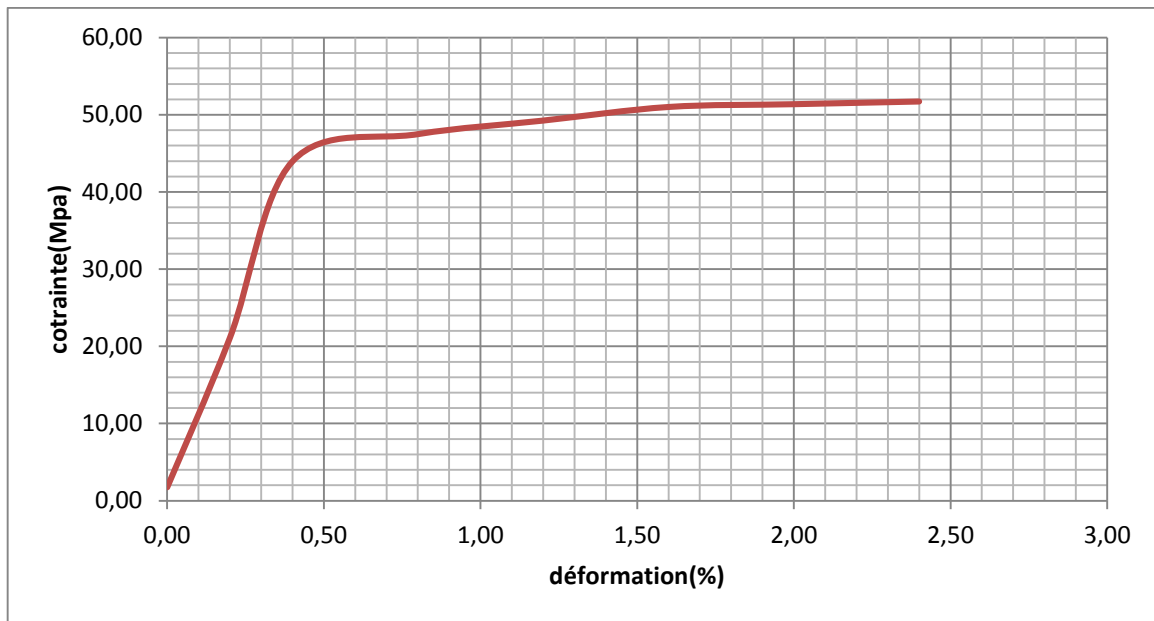


Figure III-6 : Courbe de traction de l'éprouvette N°1.

Eprouvette n°2

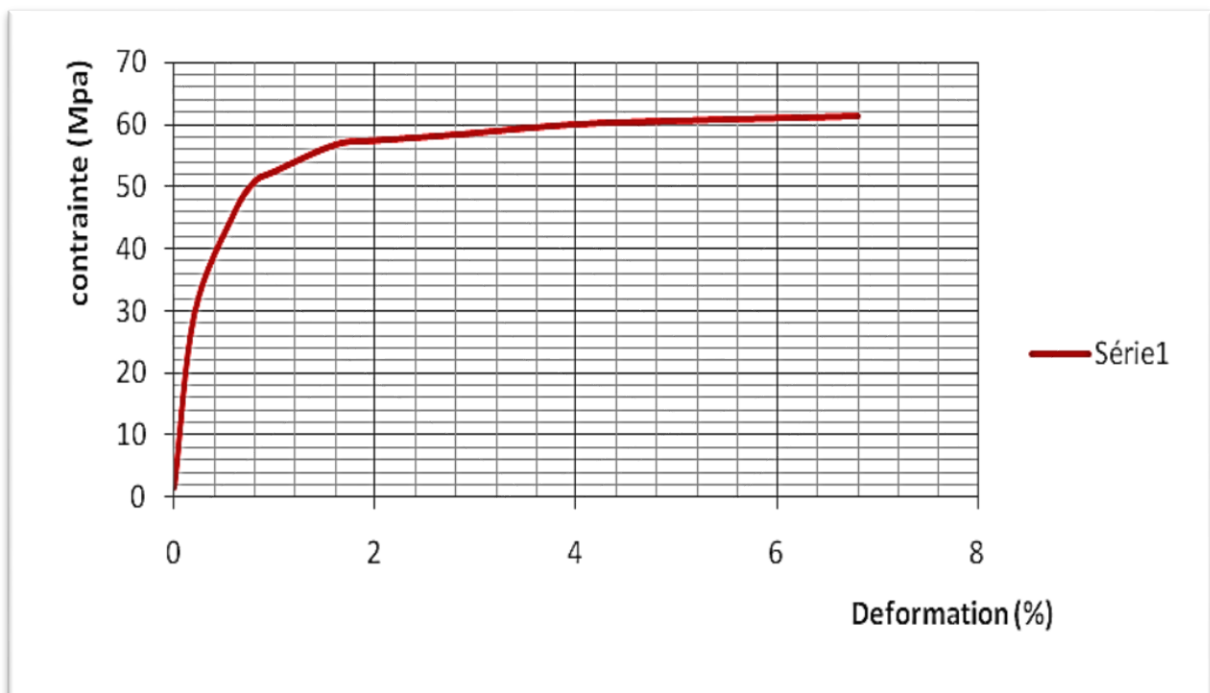


Figure III-7 : Courbe de traction de l'éprouvette N°2.

Eprouvette n° 3

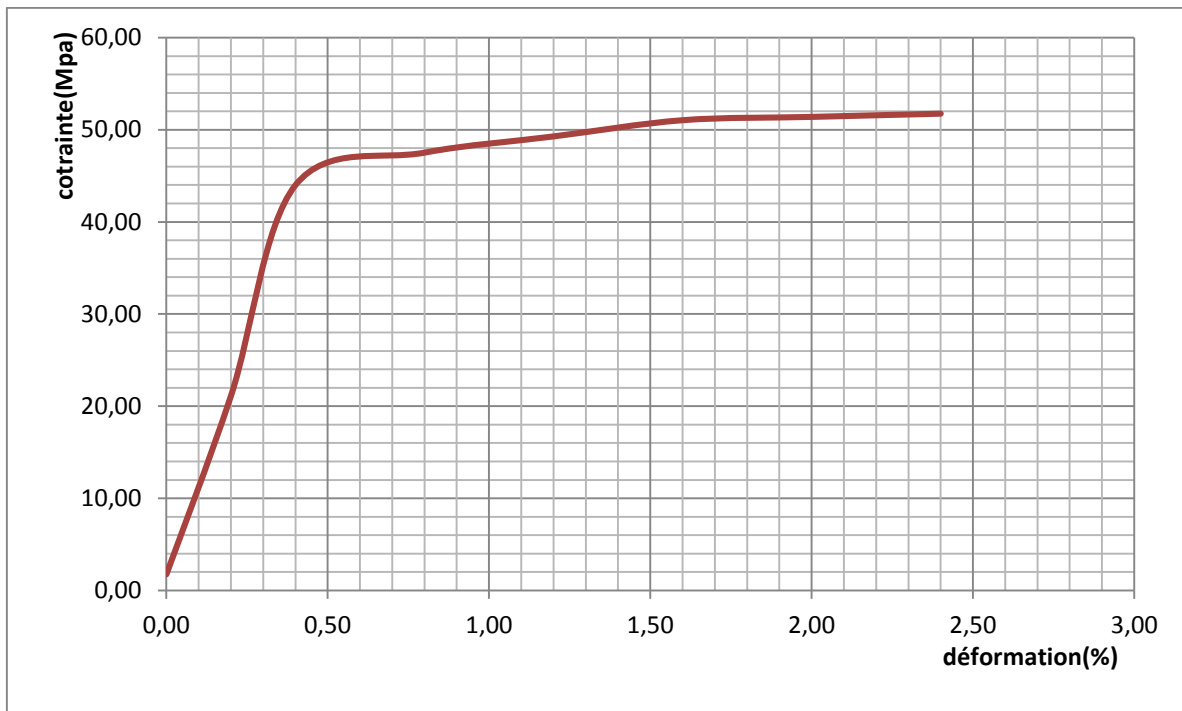


Figure III-8 : Courbe de traction de l'éprouvette N°3.

Eprouvette n°4

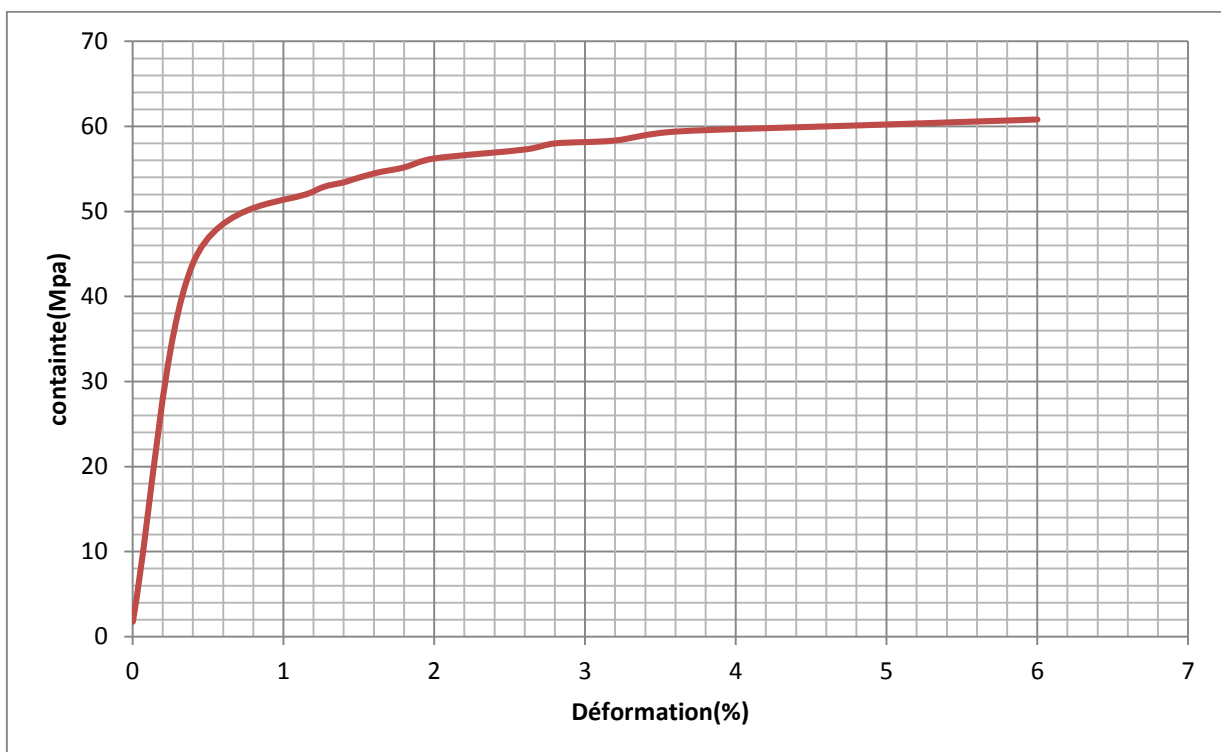


Figure III-9 : Courbe de traction de l'éprouvette N°4.

Eprouvette n°5

Remarque :

Pendant l'essai de traction de l'éprouvette, on a remarqué l'apparition de deux fissures de rupture, se sont les défauts internes qui se sont développés en fissures puis en rupture précipitée :

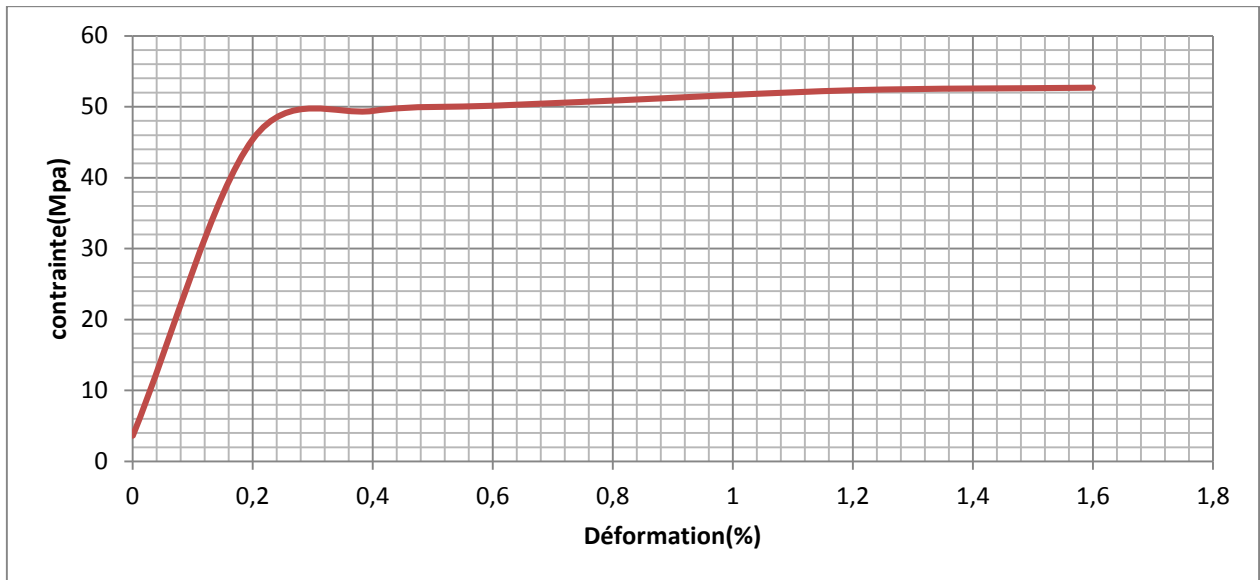


Figure III-10 : Courbe de traction de l'éprouvette N°5.

Eprouvette n°6

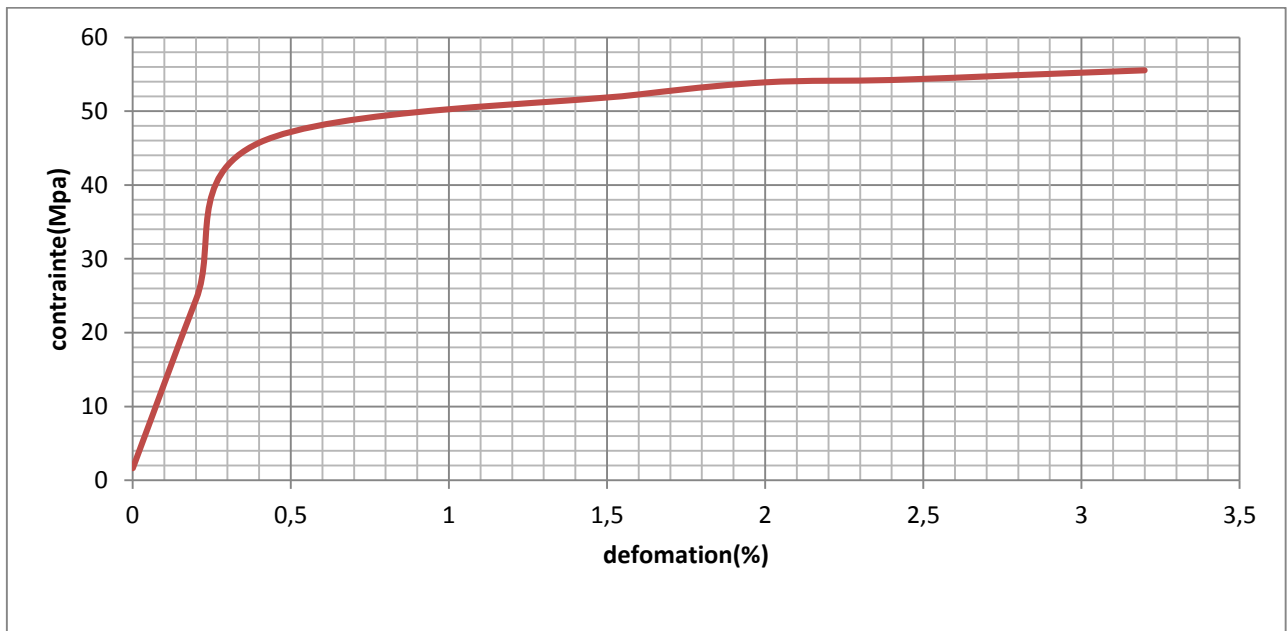


Figure III-11 : Courbe de traction de l'éprouvette N°6.

Eprouvette n°7

Cette éprouvette a marqué une rupture à l'extérieur de L_0 , pour cela le graphe enregistré n'est pas pris en considération (erroné).

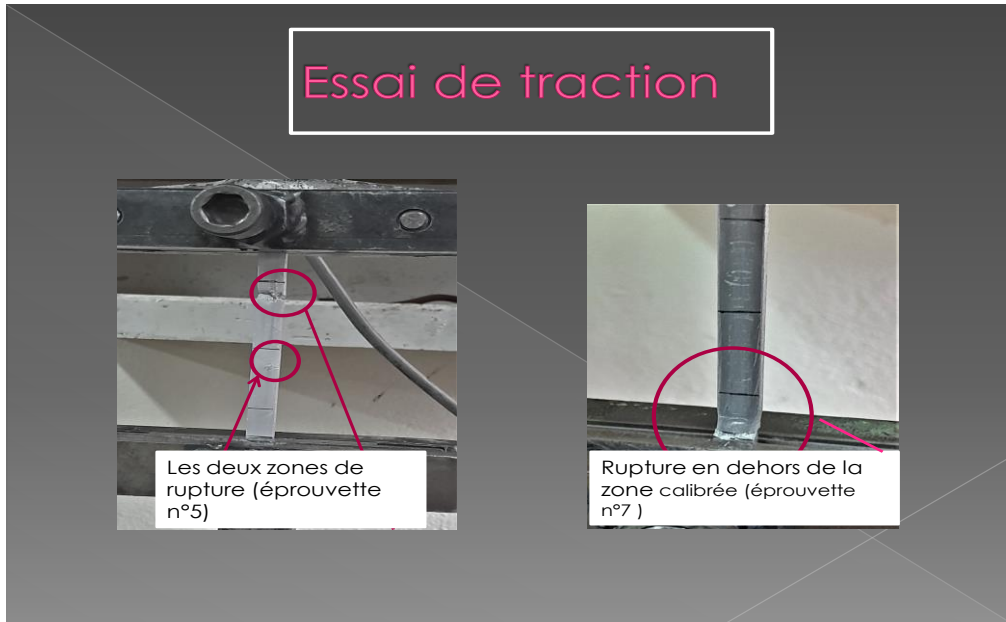


Figure III-12 : mode de rupture des éprouvettes 5 et 7.

Eprouvette n°8 :

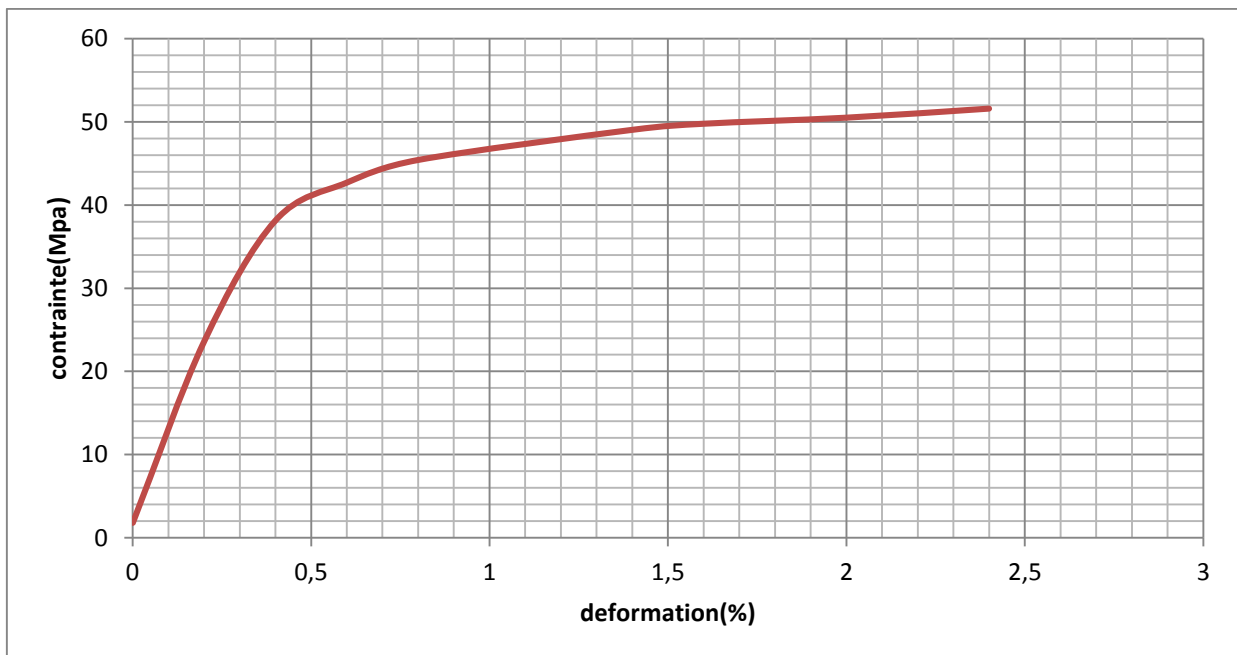


Figure III-13 : Courbe de traction de l'éprouvette N°8.

Remarque

Cette éprouvette a subi une rupture sur l'extrémité de la distance calibrée L_0 et cela est à cause de la présence d'un défaut d'une dimension importante qui a causé une rupture prématurée :

Discussions et analyse des courbes

(Annexe 40501 partie 03)

- Les courbes ont l'allure des courbes conventionnelles élasto-plastique de l'aluminium avec la (présence d'une zone élastique et une zone plastique).

Le tableau suivant montre la comparaison entre les valeurs des contraintes (élastique et maximale), le module de Young ainsi que l'allongement avec celle de la norme :

Tableau(III-7) : comparaison des valeurs calculées et la norme.

	R_{max} (MPa)	$R_{élastique}$ (MPa)	E (MPa)	A% (par seconde)
La norme	65 - 100	25 - 100	65 000	0,366
Résultats	55,51	43,87	131 ,27	5,57

Interprétations

- La contrainte maximale (contrainte de rupture) **55 ,51 MPa** est inférieure à celle de la Norme **[65-100] MPa**.
- La contrainte élastique **43,87MPa** est incluse dans l'intervalle de la Norme **[25-100] MPa**.
- Le module de Young **E=131,27 MPa** est remarquablement inférieur en comparaisant avec le module de young de la Norme **E=65 000 MPa**.

Conclusion

Les caractéristiques mécaniques discutées ci-dessus, ont montré une carence, et cela est expliqué par :

La différence de la composition chimique : la présence du carbone et du soufre qui ont fragilisé ces caractéristiques.

La présence excessive des pores et des vides macroscopiques qui favorisent la propagation de la rupture.

La technique de moulage et de refroidissement qui ne sont pas respectés (l'entretien périodique du moule, élimination de la phase de dégazage qui purifie la coulée des airs et des impuretés).

La rupture est de type prématuré et fragmentée :

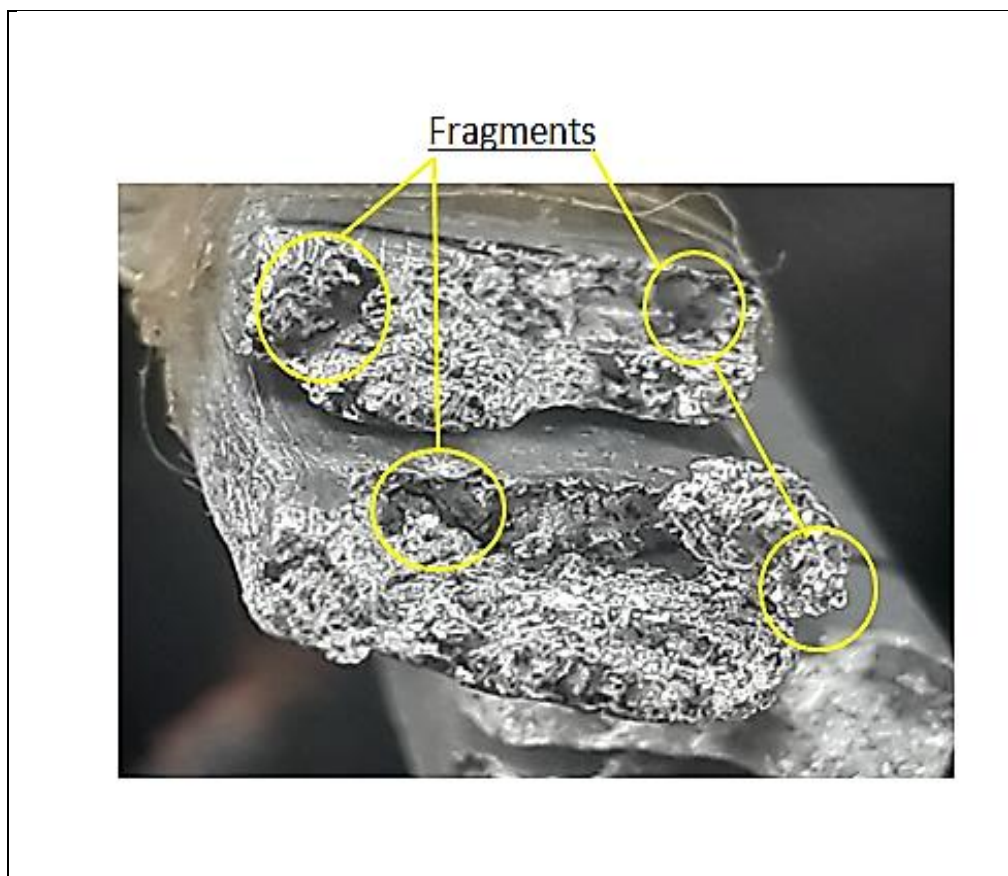


Figure III-14 : la rupture de l'éprouvette plus près

Conclusion

Le type de la rupture obtenue révèle que le refroidissement subi après injection est rapide, par conséquent la masse ne s'est pas solidifiée simultanément, ce qui a conduit à une solidification de la surface qui est en contact direct avec l'empreinte du moule qui contient les canaux de refroidissement à base de l'huile à une température comprise entre 100°C et 120°C, puis la pièce est retirée du moule pour qu'elle termine son refroidissement à l'air .et cela conduit à l' apparition des fragments (comme le montre la figure III-14.

III-7- Mesure de micro dreté :

Les paramètres ainsi que les résultats de la micro dreté sur la monophasé de l'aluminium sont :

Les paramètres de l'essai :	Les résultats :
L'essai HV (Vickers) 0,025 _____	2,04HV
0,025 _____	1,17HV { L1 = 196,79µm L2 = 200,13µm
0,025 _____	1,07HV { L1 = 209,7µm L2 = 209,7µm

Les images de la micro dreté :

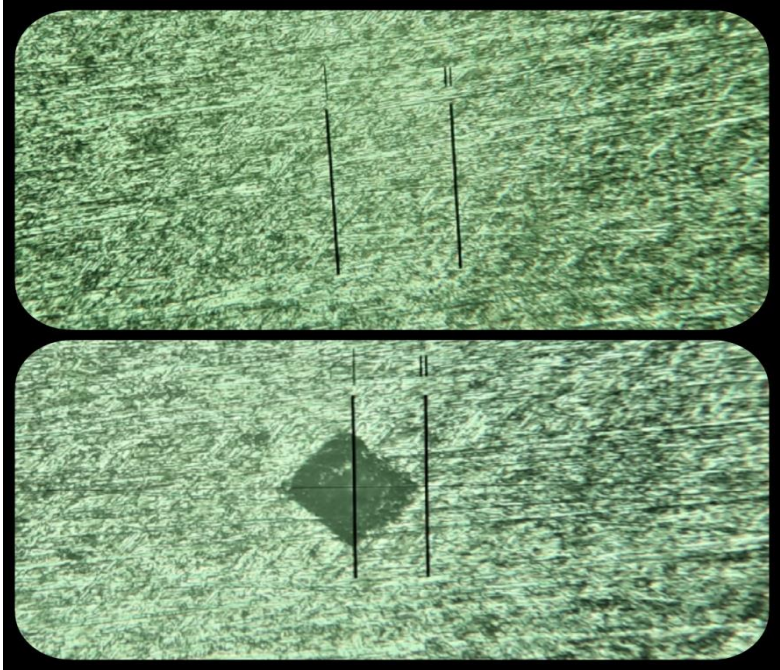


Figure III-15 : empreinte de la micro dureté sur la phase claire.

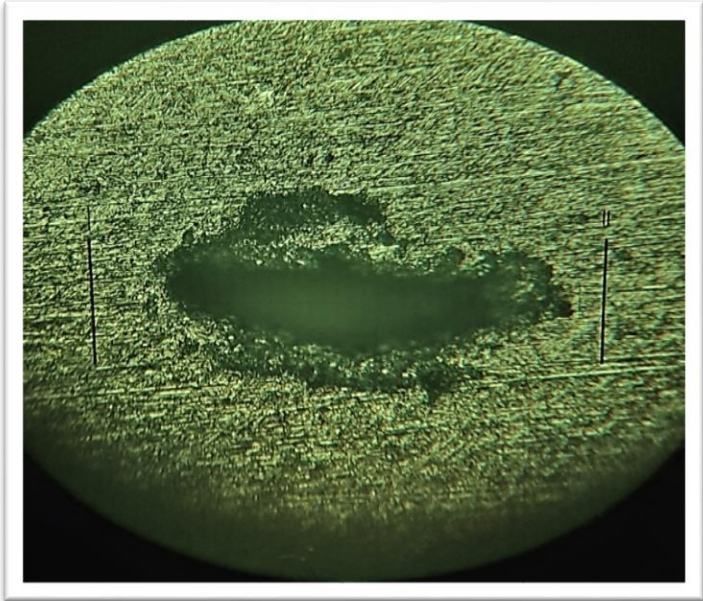


Figure III-16: poche de gaz occlue.

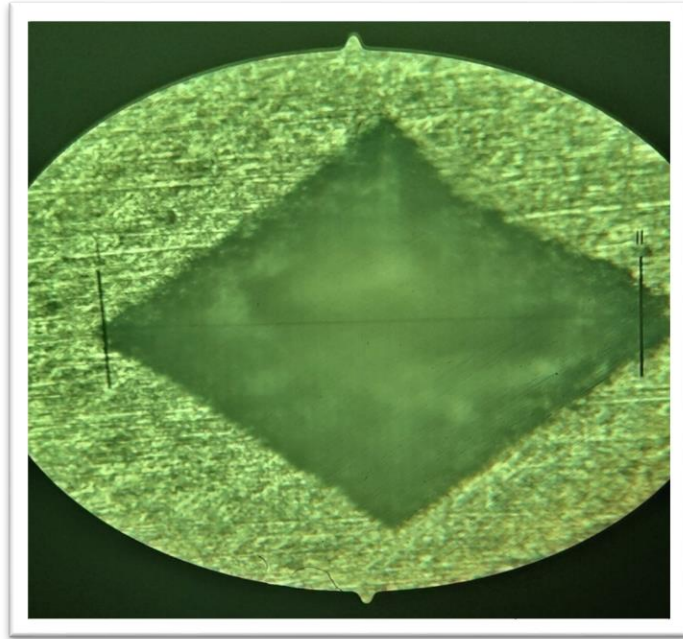


Figure III-17: l’empreinte de la bille sur la poche d’oxyde.

Le pénétrateur est plus grand que la surface de la phase foncée, d’où l’empreinte a touché la phase claire, ça implique l’incertitude de la mesure de micro dureté

L'entreprise de l'Electro-Industriel d'Azazga, nous a ouvert ses portes et a mis à notre disposition son staff, ses équipements pour concrétiser et modéliser l'ensemble des perspectives et des éventualités pour permettre le bon déroulement de notre stage. Le but de ce stage est la préparation de notre mémoire de fin d'étude qui est proposé par l'entreprise dont l'intitulé est :

Caractérisation Physico-Chimiques de l'Aluminium utilisé dans l'injection des Rotors à cage d'écureuil pour moteurs asynchrones fabriqués par l'Electro-Industries.

Afin de régler les problèmes que nous avons constatés sur le rendement et la qualité du rotor qui à son tour influencent sur celles du moteur électrique asynchrone.

Nous avons réalisé un ensemble d'essais pour préciser les facteurs internes dans la matière (la composition chimique, conductivité électrique, observation microscopique, la dureté...) et externes (processus de fabrication, le moulage...)

Les résultats de ces essais se résument :

- Pendant le suivi de processus de fabrication d'un rotor à cage d'écureuil :
 - L'absence de la procédure de dégazage de l'aluminium lors de la coulée, et cette procédure est très importante et elle doit être prise en considération (ce qui a provoqué la présence des gaz occlus et les oxydes).
- L'utilisation de la graisse de démoulage en quantité qui n'est pas normalisée est exagérée, ce qui provoque son incrustation dans l'aluminium liquide injectée.
- L'essai de la détermination de la présence du carbone et du soufre a confirmé leurs existences (0,02% du carbone, 0,015% du soufre).
- Les rainures d'évacuation de l'air pendant l'injection sont endommagées et bouchées à cause de la présence de la pâte de potillage qui s'est solidifiée à l'intérieur de ces rainures, ce qui implique qu'ils doivent réaliser des entretiens réguliers et rigoureux afin de diminuer le taux de la porosité formée dans le métal par l'air bloqué.
- La micrographie a révélé une mono phase claire lumineuse d'aluminium couverte d'une couche très fine de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), avec une répartition imposante des pores (gaz occlus) et les oxydes...
- La dureté de l'aluminium est raisonnable en la comparant avec la Norme 40501 partie3.
- Etant donné que ce rotor est destiné pour l'usage électrique (E-Al F7), la conductivité électrique est une caractéristique primordiale dans notre étude, l'essai de mesure de

conductivité électrique par pont a révélé une carence , la valeur obtenue(29, est inférieure (a la valeur imposée par la norme(entre 30 et 34 Ω .

- L'examen de la composition chimique a révélé une différence de taux de concentration des éléments, et l'aluminium est pur à 98,9%.
- Les contraintes maximales ainsi que le module de young et l'allongement ont diminué, la contrainte élastique est normalisée.

Perspectives :

Les résultats obtenus pour cette étude, nous mène à établir un ensemble de perspectives qui peuvent apporter une amélioration pour le produit étudié, et que nous espérons qu'elles soient prise en considération :

1. Changer de type d'aluminium selon son usage (destiné pour usage électrique) de *Al 99,5% H* pour l'aluminium *E-Al 99,5% H* selon la norme 1712 partie 1.
2. Rétablir la procédure de dégazage, et étudier et limiter la quantité de la graisse de démoulage, il faut prendre en considération la bonne qualité de cette graisse.
3. Effectuer un entretien obligatoire périodique pour les moules d'injection pour éviter l'obstruction des rainures d'évacuation de l'air.
4. Rétablir une nouvelle référence normalisée (fiche de contrôle technique).

- [1] www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin.
- [2] Gérard Hartmann, L'aluminium historique
- [3] HADJI Hicham & . MABROUKI Djelloul (EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETESMECANIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM) P17
- [4] Elena DIN-STIRBU, thèse de doctorat Université de Pitesti Roumanie. (2005)
- [5] C .Vargel, corrosion de l'aluminium, paris p501 (1999)
- [6]file:///C:/Users/user/Downloads/cuivre_vs_aluminium%20(5).pdf
- [7] I. Grinberg, *L'aluminium. Un si léger métal, Découvertes Gallimard, 2003.*
- [8] HADJI Hicham & . MABROUKI Djelloul (EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETESMECANIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM) P18
- [9] Gérard. Hartmann. L'Aluminium historique. Larousse des industries, 2004.
- [10] A. Hadouche. Mémoire de mastère. Université de Beskra (2014)
- [11] Elena DIN-STIRBU, thèse de doctorat Université de Pitesti Roumanie. (2005)
- [12]Tho. G. Thompson. Porous anodic alumina. Fabrication c haracterization and application. Thin solid. Films; 29(1-2) -192-201, 1997.

Annex1 : Fiche Technique Norme 1712 (Aluminium AL99H

Annexe2 : Article L'ALUMINIUMUM DAS LA CONSTRECTION DES MOTEURS

Annexe3 : normes européennes NF EN ISO 6892-1 (essai de traction).

Annexe 4 : Plan de fabrication Arbre 130 131 133

Annexe 5 : plan de fabrication rotor 130-4

Annexe 6 : plan schématique du rotor type 130-131-133

Annexe 7 : le rotor dans le moteur.

Annexe8 : plan schématique de l'empreinte de moule d'injection

Annexe9: NF EN ISO 6892-1

Annexe 10 : taux de la composition chimique .

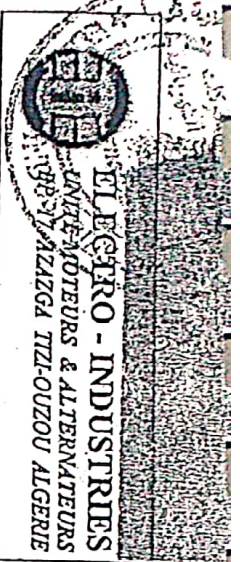
Annex11:Norme1712 Partie 1 (composition chimique de l'aluminium

Annexe 12: test de détection de présence de C/ S.

Annexe 13 : norme 40501 partie 3.

Annexe 14 : courbes de traction (f,L).

Annexe 15 : Electrical s teel losil , newcor, polycor.



DOCUMENT SYSTEME QUALITE
FICHE TECHNIQUE
ALUMINIUM AL 99,5

Edition du : 28.03.2005
Référence : FT 080
Page : 1/1

Extrait de la norme : DIN 1712 Edition Décembre 1976.

Désignation normalisée: Aluminium AL 99,5H

Exemple de commande : Aluminium AL99,5H DIN 1712 (avec analyse).

Matériau : Aluminium 99,5 %

CARACTERISTIQUES:

Identification	Designation	Conductivité électrique m / Ω.m ²	Caractéristiques mécaniques			Composition chimique en %				
			Résistance à la rupture daN / mm ²	Allongement à la rupture % min.	Dureté BRINELL HB	Al	Fe	Si	Zn	Cu
050-112-000	Aluminium AL 99,5H	30 - 34	14 - 18	4 - 5	75	99,5	0,35	0,25	0,05	0,02

MODE DE LIVRAISON:

Livrée en gueuses (lingots) de 4 Kg, en longueurs de 600 mm sur palettes en bois.
Poids brut max.: 500 Kg.

SORRAL
Siret 351 356 0719
47 Route de SAUIGNY
COLOMBIER
Tel: 04 78 88 81 81
Fax: 04 78 88 81 81

Valérie Max
IGUER
e M/10/16

Elaboré par : *APFEURS* Visa : *APFEURS*
Vérifiée par : DJ. BENTAHHA Visa : *Bentaha*

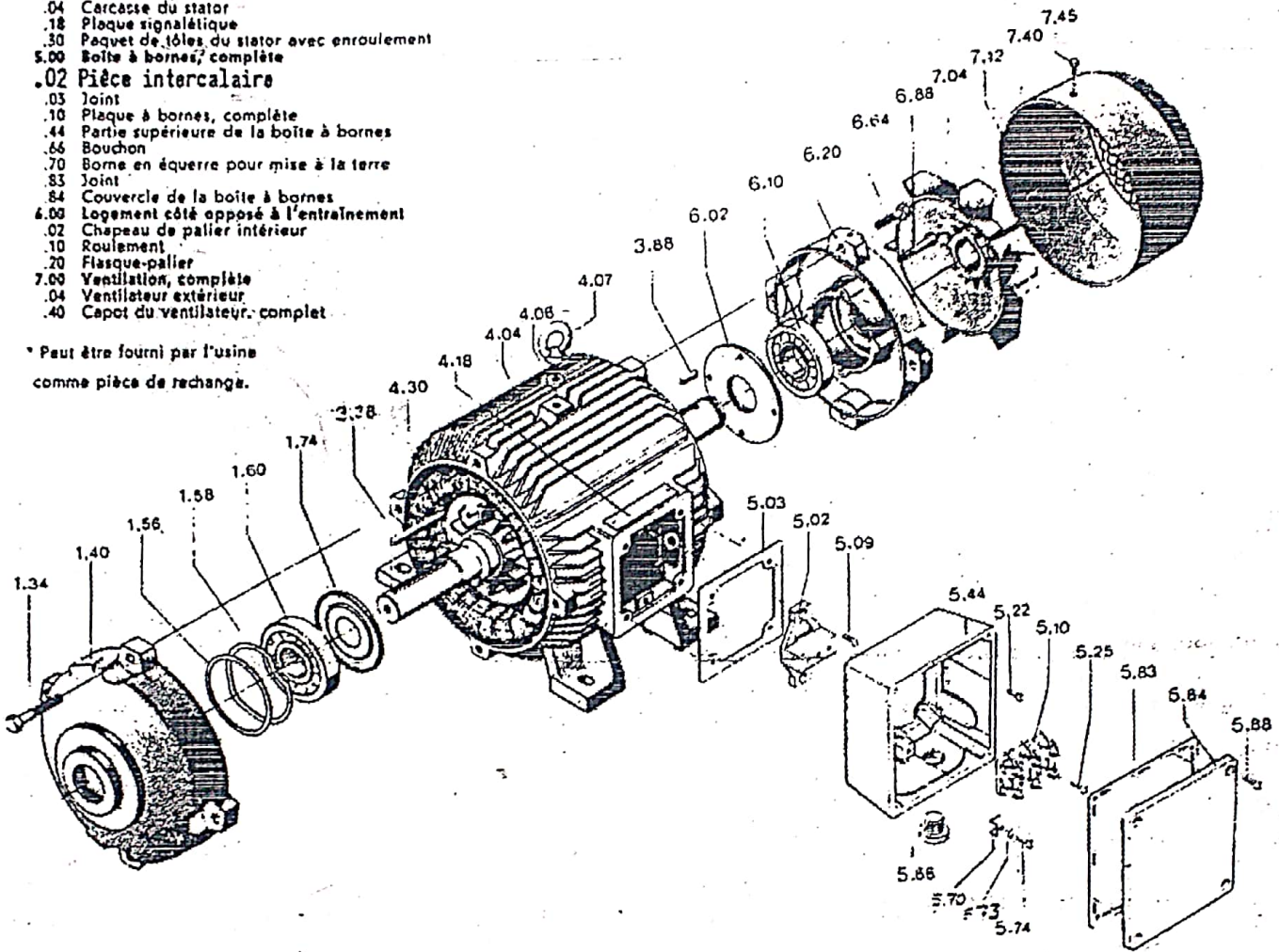
Le présent document est un document technique. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la Société est formellement interdite. Toute violation de ces dispositions est considérée comme une contrefaçon et sera poursuivie conformément aux dispositions de la loi sur le droit de propriété intellectuelle. Toute demande de renseignements doit être adressée au service client de la Société.

Pièces de rechange*

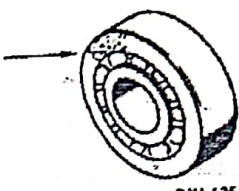
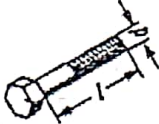

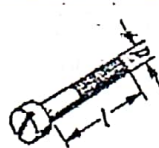



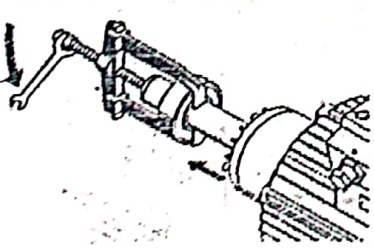
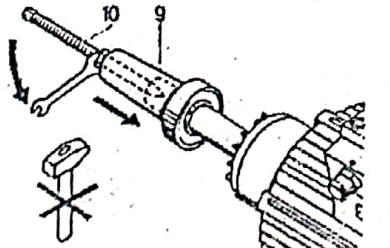

- 1.00 Logement côté entraînement
- .40 Flasque-palier
- .56 Rondelle de compensation
- .58 Rondelle élastique
- .60 Roulement
- .74 Bague Cox
- 5.00 Rotor, complet
- .88 Clavette pour ventilateur
- 4.00 Stator, complet
- .04 Carcasse du stator
- .18 Plaque signalétique
- .30 Paquet de tôles du stator avec enroulement
- 5.00 Boîte à bornes, complète
- .02 Pièce intercalaire
- .03 Joint
- .10 Plaque à bornes, complète
- .44 Partie supérieure de la boîte à bornes
- .66 Bouchon
- .70 Borne en équerre pour mise à la terre
- .83 Joint
- .84 Couvercle de la boîte à bornes
- 6.00 Logement côté opposé à l'entraînement
- .02 Chapeau de palier intérieur
- .10 Roulement
- .20 Flasque-palier
- 7.00 Ventilation, complète
- .04 Ventilateur extérieur
- .40 Capot du ventilateur, complet

* Peut être fourni par l'usine comme pièce de rechange.

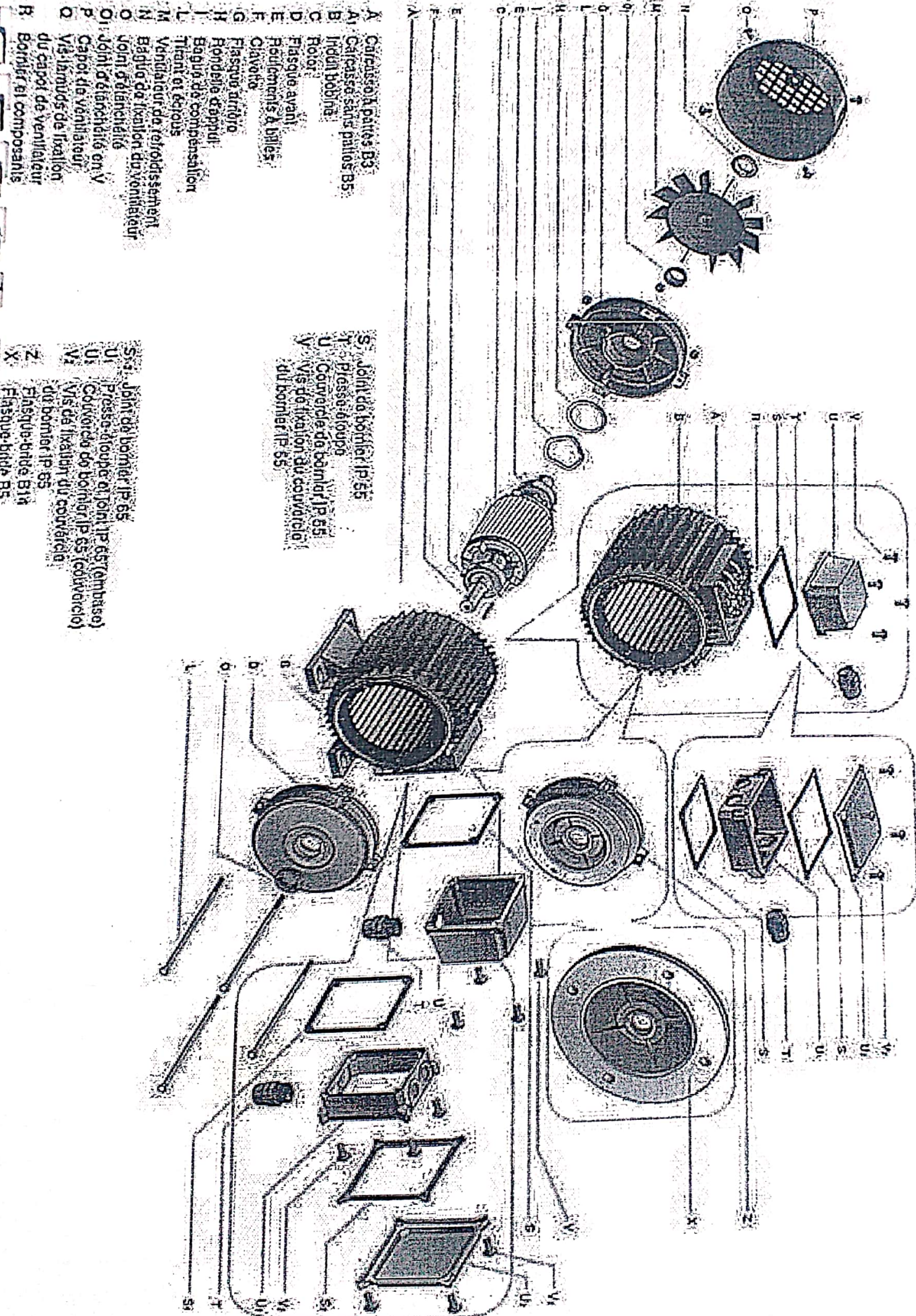
Raccordement à un conducteur



On se procurera dans le commerce les pièces normalisées au vu d'un échantillon.

Type de roulement:		1.34 6.44 6.88 7.45	DIN 933		4.07 DIN 580	
		5.09 5.22 5.25 5.74 5.88	DIN 84		4.06 DIN 125	
		5.73	DIN 127		7.12 DIN 471	
					3.38 DIN 6885	

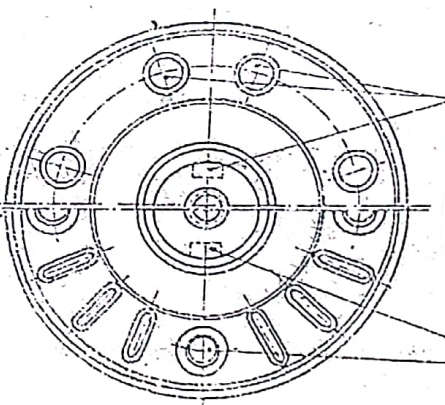
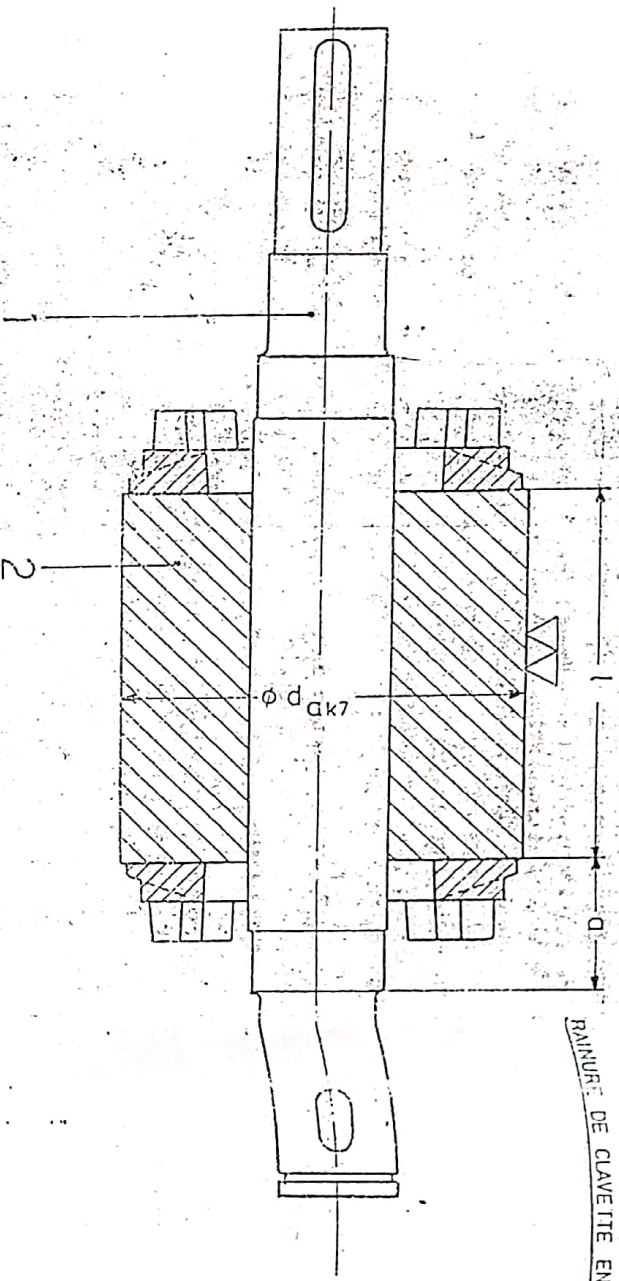
9 Douille d'emmanchement
10 Tige



- A Carcasse à pattes B3
- A1 Carcasse sans pattes B3
- B Induit bobiné
- C Rotor
- D Flasque avant
- E Roullements à billes
- F Clavette
- G Flasque arrière
- H Rondelle d'appui
- I Bague de compensation
- L Titrant et écrous
- M Ventilateur de refroidissement
- N Bague de fixation du ventilateur
- O Joint d'étanchéité
- O1 Joint d'étanchéité en V
- P Capot de ventilateur
- Q Vis-livrés de fixation
- R Ventilateur
- B1 Borner et composants

- S Joint de borner IP 65
- T Presse-étoupe
- U Couvrecil de borner IP 65
- V Vis de fixation du couvercle du borner IP 65

- S1 Joint de borner IP 65
- U1 Presse-étoupe et joint IP 65 (ambises)
- U2 Couvercle de borner IP 65 (couvercle)
- V1 Vis de fixation du couvercle du borner IP 65
- Z Flasque-bride B1a
- X Flasque-bride B5



TOLERANCES ET LEUR CONTROLE SELON EN 351.10
 CLASSE DE QUALITE 1

07	135	- 6	134	150	66,5
06	133	- 6	134	110	86,5
05	133	- 2	128,96	150	66,5
04	131	- 2	116,8	130	76,5
03	130	- 6	134	80	101,5
02	120	4	128,96	110	86,5
01	130	2	116,8	95	92
EXEC					

COTE	D'AJUSTEMENT	DIMENSIONS
134 k7		+0,043 +0,003
128,96 k7		+0,043 +0,003
116,8 k7		+0,003 +0,003

MOEUFICATIONS

DATE	NO 1	ECHELLE	1/1
DESIGNEUR	SMALL	DESIGNATION	ROTOR
CONTROLEUR	YAMAHA		

TYPE 130-131-133
 N° 880-150-0018A

A 94/031 26-2-84

Aluminium
Masseln

DIN
1712
Teil 1

Aluminium ingots
Aluminium lingots

Zusammenhang mit der von der International Organization for Standardization (ISO) herausgegebenen Empfehlung ISO/R 115, siehe Erläuterungen.

1 Geltungsbereich

Diese Norm gilt für Aluminium, das als Primärmetall oder bei der Raffinationselektrolyse gewonnen und vorzugsweise als Masse geliefert wird.

2 Bezeichnung

Bei der Bezeichnung von Aluminium sind die Kurzzeichen oder Werkstoffnummern nach der Tabelle dieser Norm zu verwenden.

Bezeichnung von Aluminium mit dem Kurzzeichen Al99,5H oder der Werkstoffnummer 3.0250:

Aluminium Al99,5H DIN 1712
oder Aluminium 3.0250 DIN 1712

Die Benennung und die DIN-Nummer können außerhalb des Bestellverkehrs zwischen Lieferer und Kunden weggelassen werden, wenn die Eindeutigkeit gewährt ist. Es genügen dann das Kurzzeichen oder die Werkstoffnummer allein, z. B. Al99,5H oder 3.0250.

3 Zusammensetzung

Der Gewichtsrechnung ist eine Dichte von 2,70 kg/dm³ zugrunde zu legen.

Tabelle. Zusammensetzung

Kurzzeichen	Werkstoffnummer	Total insgesamt	Zulässige Beimengungen ¹⁾ in Gew.-%							andere einzelne
			Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Ga	Cr+Mn+Ti+V	
Al99,99R	3.0400	0,010	0,006	0,005	0,003	0,005	0,002			0,001
Al99,9H	3.0300	0,10	0,050	0,040	0,005	0,030	0,005	0,030		0,010
Al99,8H	3.0280	0,20	0,15	0,15	0,01	0,04	0,02	0,03		0,02
Al99,7H	3.0270	0,30	0,20	0,25	0,01	0,04	0,02			0,03
Al99,5H	3.0250	0,50	0,25	0,35	0,02	0,05	0,02			0,03
E-Al ²⁾	3.0256	0,50	0,20	0,35	0,02	0,04			0,03	0,03

¹⁾ Soweit durch die üblichen Untersuchungsverfahren erfaßbar.

²⁾ Ausgangswerkstoff für die Herstellung von E-Al nach DIN 1712 Teil 3

4 Prüfung der Zusammensetzung

Schiedsanalysen bzw. Probenahme sind nach der neuesten Ausgabe der „Analyse der Metalle“ des Chemikerausschusses der Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute e.V., Band 1: „Schiedsverfahren“ bzw. Band 3: „Probenahme“ auszuführen (Berlin - Göttingen - Heidelberg; Springer-Verlag).

Auf jeden gefundenen Einzelwert ist die Rundungsregel nach DIN 1333 Teil 2 anzuwenden. Die gerundete Zahl darf die für die Zusammensetzung festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

Zur Analyse von Aluminium Al99,99R sind die Späne zuvor mit Salpetersäure zu reinigen.

5 Lieferart

Vorzugsweise Masseln (jeden Gewichts), daneben auch Granalien, Grieß.

Bestellbeispiel von 2 t Aluminium mit dem Kurzzeichen Al99,5H oder der Werkstoffnummer 3.0250 in Masseln:

2 t Aluminium Al99,5H DIN 1712 in Masseln
oder 2 t Aluminium 3.0250 DIN 1712 in Masseln

Erläuterungen Seite 2

Fachnormenausschuß Nichteisenmetalle (FNNE) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Siemens AG

Bezug dieses Normblattes von ZT TVN Verw Mch H oder Erl
Vervielfältigung lt. DNA-Merkblatt 3, Ziffer 1

421 01 01 01

Frühere Ausgaben:
 DIN 1712 Teil 1: 07.25, 12.37, 03.43,
 08.53, 10.61
 Teil 4: 12.53
 DIN

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

Änderung Dezember 1976:
 Inhalt vollständig überarbeitet, siehe Erläuterungen

Electro-Industrie
Laboratoire central

Aluminium Al 99.5 H
Anneau

12.10.22 14:25	/004	355.7 mg	0.0269 %C 1/2	0.0119 %S 3/1	050
12.10.22 14:31	/006	344.6 mg	0.0326 %C 1/2	0.0152 %S 3/1	050
12.10.22 14:34	/007	325.6 mg	0.0283 %C 1/2	0.0168 %S 3/1	050

moyenne pour C : 0,02927
écart type : 0,00297 / 10,10 %

moyenne pour S : 0,01463
écart type : 0,00250 / 17,10 %

Aluminium Al 99.5 H
Barre

12.10.22 14:48	/010	375.6 mg	0.0165 %C 1/2	0.0131 %S 3/1	050
12.10.22 14:50	/011	312.4 mg	0.0200 %C 1/2	0.0160 %S 3/1	050

moyenne pour C : 0,01825
écart type : 0,00247 / 13,60 %

moyenne pour S : 0,01455
écart type : 0,00205 / 14,10 %

Tableau B.1 — Dimensions des éprouvettes

Dimensions en millimètres

Type d'éprouvette	Largeur b_0	Longueur initiale entre repères L_0	Longueur calibrée L_c		Longueur libre entre mâchoires pour les éprouvettes à faces parallèles
			Minimum	Recommandée	
1	12,5 ± 1	50	57	75	87,5
2	20 ± 1	80	90	120	140
3	25 ± 1	50 ^a	60 ^a	—	Non définie

^a Les rapports L_0/b_0 et L_c/b_0 des éprouvettes de type 3 en comparaison des éprouvettes de types 1 et 2 sont très faibles. Il en résultera des caractéristiques, en particulier l'allongement après rupture (valeur absolue et intervalle de dispersion), mesurées avec cette éprouvette, différentes de celles obtenues avec les autres types d'éprouvette.

Tableau B.2 — Tolérances sur la largeur de l'éprouvette

Dimensions et tolérances en millimètres

Largeur nominale de l'éprouvette	Tolérance d'usinage ^a	Tolérance de forme ^b
12,5	± 0,05	0,06
20	± 0,10	0,12
25	± 0,10	0,12

^a Ces tolérances sont applicables lorsqu'on désire faire intervenir dans le calcul la valeur nominale de l'aire initiale de la section transversale, S_0 , sans avoir à mesurer cette section.

^b Écart maximal entre les mesures de la largeur déterminées tout au long de la partie calibrée, L_c , de l'éprouvette.

B.3 Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes doit être réalisée de manière à ne pas porter atteinte aux caractéristiques de l'échantillon. Les zones éventuellement écrouies par le découpage à la cisaille ou à la presse doivent être éliminées par usinage.

Ces éprouvettes sont préparées de manière prédominante à partir de tôles ou de bandes. Si possible, il convient d'éliminer les surfaces brutes de laminage.

NOTE La préparation de ces éprouvettes par poinçonnage peut entraîner des modifications significatives des caractéristiques du matériau, en particulier la limite apparente/conventionnelle d'élasticité (du fait de l'écrouissage). Il convient en général de préparer les matériaux qui présentent un fort écrouissage par fraisage, meulage, etc.

Pour les matériaux de très faible épaisseur, il est recommandé que des bandes de même largeur soient coupées et regroupées en un paquet avec des couches intermédiaires en papier résistant à l'huile de coupe. Il convient d'assembler chaque petit paquet de bandes à l'aide d'une bande plus épaisse de chaque côté avant de l'usiner à la dimension définitive de l'éprouvette.

La tolérance donnée dans le Tableau B.2, par exemple ± 0,05 mm pour une largeur nominale de 12,5 mm signifie qu'aucune éprouvette ne doit comporter une largeur en dehors des deux valeurs ci-après lorsqu'on désire faire intervenir dans le calcul la valeur nominale de l'aire initiale de la section transversale, S_0 , sans avoir à mesurer cette section:

$$12,5 \text{ mm} + 0,05 \text{ mm} = 12,55 \text{ mm}$$

$$12,5 \text{ mm} - 0,05 \text{ mm} = 12,45 \text{ mm}$$

Tableau 1 — Symboles et désignations (suite)

Symbole	Unité	Désignation
Vitesses		
$\dot{\epsilon}_{L_0}$	s ⁻¹	vitesse de déformation
$\dot{\epsilon}_{L_c}$	s ⁻¹	vitesse moyenne de déformation sur la longueur calibrée
\dot{R}	MPa s ⁻¹	vitesse de mise en charge
v_c	mm s ⁻¹	vitesse de séparation des traverses
Force		
F_m	N	force maximale
Limite apparente d'élasticité — Limite conventionnelle d'élasticité — Résistance à la traction		
E	MPa ^b	module d'élasticité
m	MPa	pente de la courbe contrainte/extension pour cent à un instant donné de l'essai
m_E	MPa	pente de la partie élastique de la courbe contrainte/extension pour cent ^c
R_{eH}	MPa	limite supérieure d'écoulement
R_{eL}	MPa	limite inférieure d'écoulement
R_m	MPa	résistance à la traction
R_p	MPa	limite conventionnelle d'élasticité pour une extension plastique
R_r	MPa	limite d'allongement rémanent spécifié
R_t	MPa	limite d'extension
<p>^a Le symbole T est utilisé dans les normes de produit de tube d'acier.</p> <p>^b 1 MPa = 1 N mm⁻².</p> <p>^c Dans la partie élastique de la courbe contrainte/déformation, la valeur de la pente peut ne pas nécessairement représenter le module d'élasticité. Cette valeur peut être très proche de la valeur du module d'élasticité si des conditions optimales (haute résolution, extensomètres assurant une moyenne sur deux faces, alignement parfait de l'éprouvette, etc.) sont utilisées.</p> <p>ATTENTION — Un facteur 100 est nécessaire si des valeurs en pourcentage sont utilisées.</p>		

5 Principe

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à une déformation due à une force de traction, généralement jusqu'à rupture, pour déterminer une ou plusieurs des caractéristiques mécaniques définies dans l'Article 3.

Sauf spécification contraire, l'essai est effectué à la température ambiante entre 10 °C et 35 °C. Les essais effectués dans des conditions surveillées doivent être réalisés à une température de 23 °C ± 5 °C.

6 Éprouvette

6.1 Forme et dimensions

6.1.1 Généralités

La forme et les dimensions des éprouvettes peuvent être imposées par la forme et les dimensions du produit métallique dans lequel les éprouvettes sont prélevées.

L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un échantillon prélevé dans le produit ou d'un flan embouti ou d'une pièce moulée. Cependant, les produits de section transversale constante (profilés, barres, fils, etc.) ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (c'est-à-dire pour les fontes et les alliages non ferreux) peuvent être soumis à essai sans être usinés.

La section transversale des éprouvettes peut être circulaire, carrée, rectangulaire, annulaire, ou dans des cas particuliers, une autre section transversale uniforme.

Les éprouvettes à utiliser de préférence présentent une relation directe entre la longueur initiale entre repères, L_0 , et l'aire initiale de la section transversale, S_0 , illustrée par l'équation $L_0 = k\sqrt{S_0}$, où k est un coefficient de proportionnalité; elles sont dénommées éprouvettes proportionnelles. La valeur k adoptée sur le plan international est 5,65. La longueur initiale entre repères ne doit pas être inférieure à 15 mm. Lorsque l'aire de la section transversale de l'éprouvette est trop faible pour que cette condition soit remplie avec la valeur 5,65 du coefficient k , on peut utiliser soit une valeur de k supérieure (de préférence 11,3), soit une éprouvette non proportionnelle.

NOTE En utilisant une longueur initiale entre repères inférieure à 20 mm, l'incertitude de mesure est accrue.

Dans le cas des éprouvettes non proportionnelles, la longueur initiale entre repères, L_0 , est prise indépendamment de l'aire initiale de la section transversale, S_0 .

Les tolérances dimensionnelles des éprouvettes doivent être en conformité avec les Annexes B à E (voir 6.2).

D'autres éprouvettes telles que celles spécifiées dans des normes de produit applicables ou des normes nationales, par exemple ISO 3183^[1] (API 5L), ISO 11960^[2] (API 5CT), ASTM A370^[6], ASTM E8M^[7], DIN 50125^[10], IACS W2^[13], et JIS Z2201^[14], peuvent être utilisées par accord avec le client.

6.1.2 Éprouvettes usinées

Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes d'amarrage et la longueur calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions du congé de raccordement sont importantes, et il est recommandé qu'elles soient définies dans la spécification du matériau lorsqu'elles ne sont pas données dans l'annexe appropriée (voir 6.2).

Les têtes d'amarrage peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine d'essai. L'axe de l'éprouvette doit coïncider avec l'axe d'application de la force.

La longueur calibrée, L_c , ou, dans le cas où l'éprouvette ne comporte pas de congés de raccordement, la longueur libre entre les mâchoires, doit toujours être supérieure à la longueur initiale entre repères, L_0 .

6.1.3 Éprouvettes non usinées

Dans le cas où l'éprouvette est constituée par un tronçon non usiné du produit ou un barreau d'essai non usiné, la longueur libre entre les mâchoires doit être suffisante pour que les repères soient à une distance raisonnable des mâchoires (voir Annexes B à E)



Les éprouvettes brutes de fonderie doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes d'amarrage et la longueur calibrée. Les dimensions de ce congé sont importantes et il est recommandé qu'elles soient définies dans la norme de produit. Les têtes d'amarrage peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine d'essai. La longueur calibrée, L_c , doit toujours être supérieure à la longueur initiale entre repères, L_0 .

6.2 Types

Les principaux types d'éprouvettes sont définis dans les Annexes B à E en fonction de la forme et du type de produit comme indiqué dans le Tableau 2. D'autres types d'éprouvette peuvent être spécifiés dans des normes de produit.

Tableau 2 — Principaux types d'éprouvettes en fonction du type de produit

Dimensions en millimètres

Typo de produit		Annexe correspondante
Tôles minces et fortes — Plats  Épaisseur a	Fils — Barres — Profilés  Diamètre ou côté	
$0,1 \leq a < 3$	—	B
—	< 4	C
$a \geq 3$	≥ 4	D
Tubes		E

6.3 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être prélevées et préparées conformément aux exigences des Normes internationales applicables relatives aux différents matériaux (par exemple ISO 377).

7 Détermination de l'aire initiale de la section transversale

Il convient de mesurer les dimensions pertinentes de l'éprouvette pour un nombre suffisant de sections transversales, perpendiculairement à l'axe longitudinal, dans la partie centrale de la longueur calibrée de l'éprouvette.

Un minimum de trois sections transversales est recommandé.

L'aire initiale de la section transversale, S_0 , est l'aire moyenne de la section transversale et doit être calculée à partir des mesures des dimensions appropriées.

L'exactitude du calcul dépend de la nature et du type de l'éprouvette. Les Annexes B à E décrivent des méthodes d'évaluation de S_0 pour différents types d'éprouvettes et contiennent des spécifications pour l'exactitude de mesure.

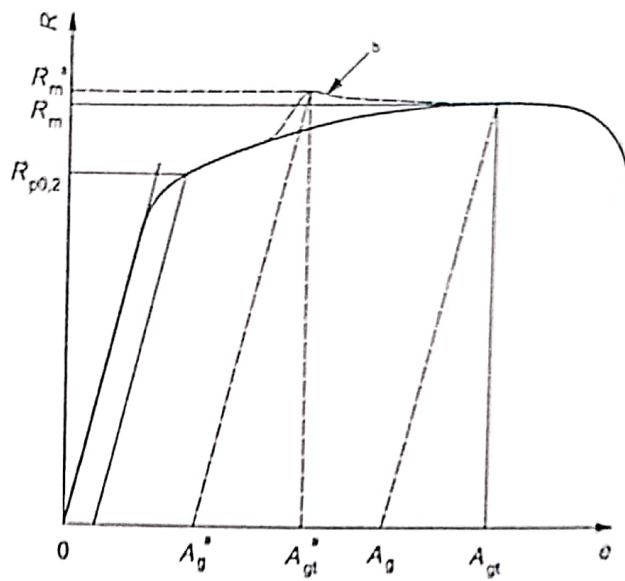
8 Marquage de la longueur initiale entre repères

Chaque extrémité de la longueur initiale entre repères doit être marquée au moyen de fines marques ou de traits de pointe sèche, mais pas avec des entailles qui pourraient causer une rupture prématurée.

Dans le cas des éprouvettes proportionnelles, la valeur calculée de la longueur initiale entre repères peut être arrondie au multiple de 5 mm le plus proche, pour autant que la différence entre la longueur entre repères calculée et la longueur entre repères marquée ne dépasse pas 10 % de L_0 . La longueur initiale entre repères est marquée avec une exactitude de ± 1 %.

Si la longueur calibrée, L_G , est très supérieure à la longueur initiale entre repères, comme par exemple dans le cas des éprouvettes non usinées, une série de longueurs entre repères chevauchantes peut être marquée.

Dans certains cas, il peut être utile de tracer sur la surface de l'éprouvette une ligne parallèle à l'axe longitudinal, le long de laquelle on marque les longueurs entre repères.



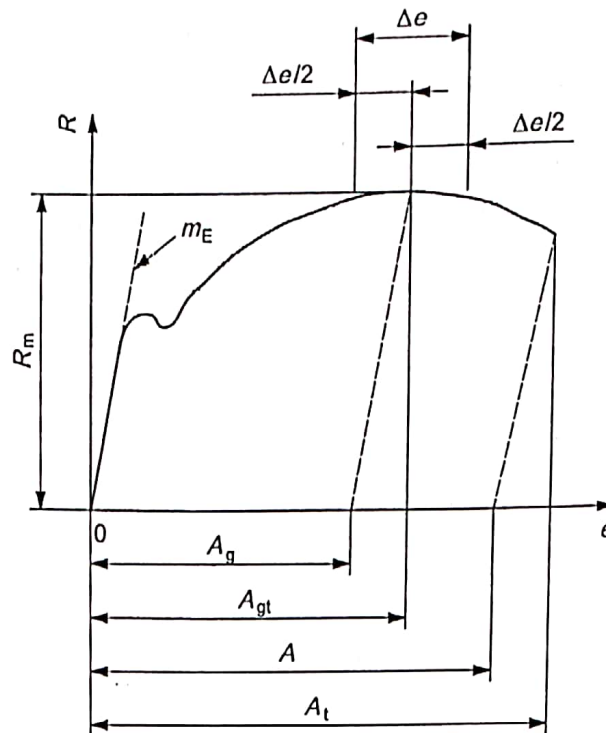
Légende

e extension pour cent
R force unitaire

- ^a Valeurs fausses résultant d'une augmentation soudaine de la vitesse de déformation.
- ^b Comportement contrainte-déformation, si la vitesse de déformation est augmentée soudainement.

NOTE Pour la définition des paramètres, se référer au Tableau 1.

Figure 10 — Illustration d'une discontinuité inadmissible dans la courbe contrainte-déformation



Légende

- A allongement pour cent après rupture (déterminé à partir du signal de l'extensomètre) ou directement sur l'éprouvette (voir 20.1))
- A_g extension plastique pour cent à la force maximale
- A_{gt} extension totale pour cent à la force maximale
- A_t extension totale pour cent à la rupture
- e extension pour cent
- m_E pente de la partie élastique de la courbe force unitaire/extension pour cent
- R force unitaire
- R_m résistance à la traction
- Δe étendue du plateau (pour la détermination de A_g , voir l'Article 17, pour la détermination de A_{gt} , voir l'Article 18)

Figure 1 — Définition des extensions

Nom unique	Standard type	Mode correction
rotor enel 2eme mesure		Aucune

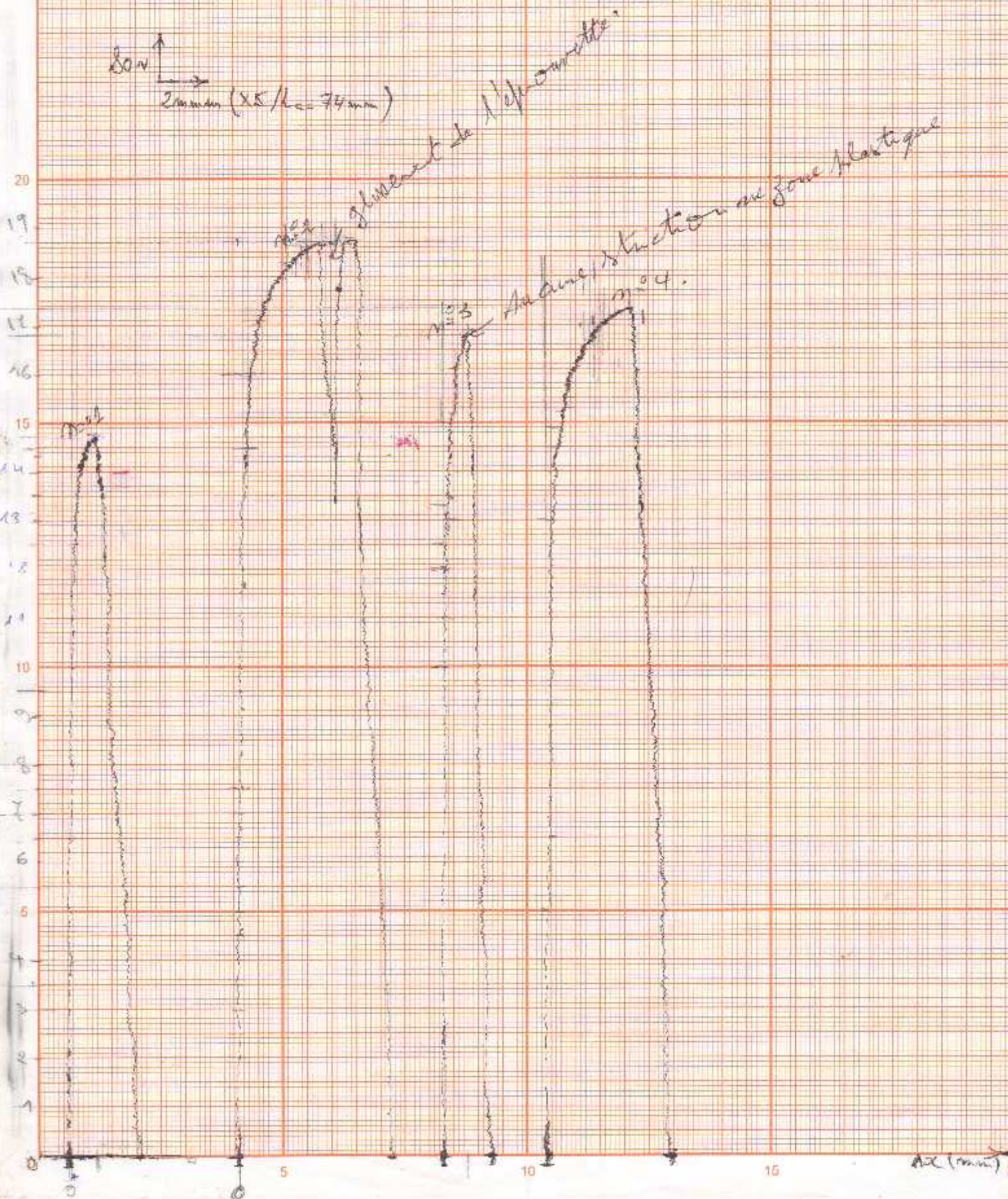
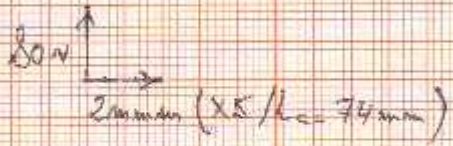
	Si Conc. [%]	Fe Conc. [%]	Cu Conc. [%]	Mn Conc. [%]	Mg Conc. [%]	Cr Conc. [%]	Ni Conc. [%]	Zn Conc. [%]	Ti Conc. [%]	Ag Conc. [%]	B Conc. [%]	Ba Conc. [%]	Be Conc. [%]
1	1,01	0,286	0,0068	0,0041	0,0040	0,0066	0,0075	0,0410	0,0065	<0,00010	0,0018	0,00036	0,00005
2	>0,808	0,380	0,0073	0,0118	0,0044	0,0131	0,0052	0,114	0,0042	<0,00010	0,0018	0,00020	<0,00005
<x>	0,909	0,333	0,0070	0,0080	0,0042	0,0099	0,0063	0,0774	0,0054	<0,00010	0,0018	0,00028	0,00005

	Bi Conc. [%]	Ca Conc. [%]	Cd Conc. [%]	Ce Conc. [%]	Co Conc. [%]	Ga Conc. [%]	Hg Conc. [%]	In Conc. [%]	La Conc. [%]	Li Conc. [%]	Mo Conc. [%]	Na Conc. [%]	P Conc. [%]
1	0,0054	0,0046	0,00092	0,0087	0,00060	0,0091	0,0021	0,0034	0,0012	<0,00010	0,0038	0,0052	>0,0100
2	0,0036	0,0041	0,00031	0,0064	0,0045	0,0072	<0,00100	0,0025	<0,00030	<0,00010	0,0035	0,0103	0,0075
<x>	0,0045	0,0044	0,00062	0,0075	0,0026	0,0081	0,0016	0,0030	0,00076	<0,00010	0,0037	0,0077	0,0087

	Pb Conc. [%]	Sb Conc. [%]	Sn Conc. [%]	Sr Conc. [%]	V Conc. [%]	Zr Conc. [%]	Sc Conc. [%]	Bg Conc. [%]	Al Conc. [%]
1	0,0119	0,0271	0,0053	<0,00010	0,0054	0,00089	<0,0500		98,5
2	0,0104	0,0251	0,0024	<0,00010	0,0075	0,00079	<0,0500		98,5
<x>	0,0111	0,0261	0,0039	<0,00010	0,0064	0,00084	<0,0500		98,5

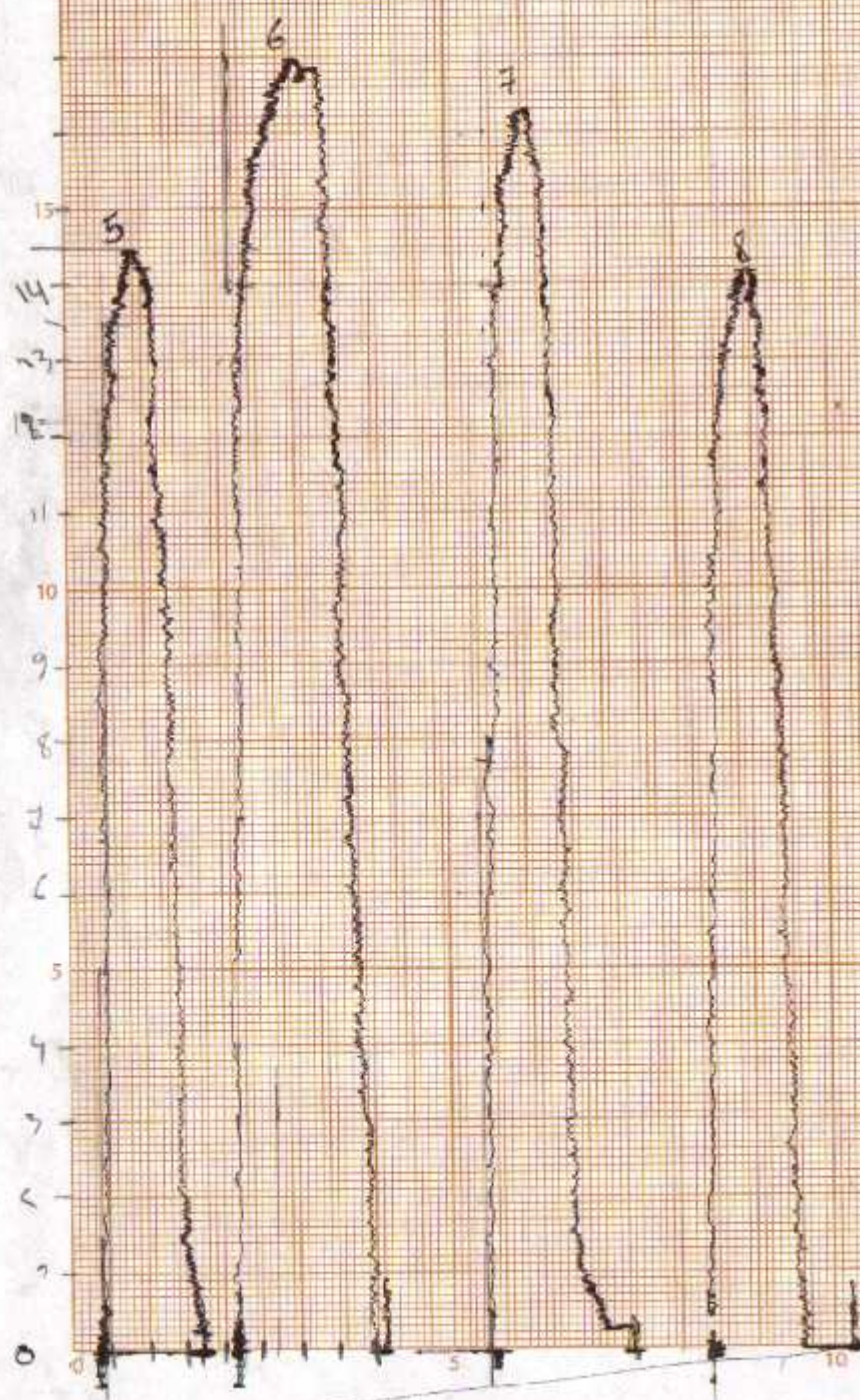
$T = 25^{\circ}C$

$F(N)$



Δx (mm)

$\lambda F(\mu V)$
 $80 \mu V$
 $2 \mu V (X5 / 20 = 74 \mu V)$



Des ruptures prématurées dans
 l'ensemble des cas.