

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Thèse

Présenté pour obtenir le Diplôme de Doctorat D- LMD

Spécialité : Génie Mécanique

Option : SDM

Thème

**ETUDE DE L'EFFET DES CONTRAINTES MECANQUES
INTERNES DANS Al et Cu SUR LES PROPRIETES DE LA
CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ET LA PERMEABILITE
MAGNETIQUE**

Présenté par Mr. BENHORMA MOHAMMED ELHADI

*Pr . Allaoui Omar
Pr . Ailam Elhadj
Dr.Zidelemal Sami
Dr.Bessissa Lakhdar
Pr. Hadjadj abdechafik
Pr.Benchatti Ahmed*

*Université de Laghouat
Université de Khemis Meliana
Université de Laghouat
Université de Djelfa
Université de Laghouat
Université de Laghouat*

*président
examinateur
examinateur
examinateur
encadreur
invité*

ANNEE UNIVERSITAIRE 2020/2021

A ma très chère mère

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement.

Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée.

Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

A mon très cher père

Toute l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour.

Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père.

J'implore Dieu, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

Aussi à mes chères sœurs Lina, Amani et Nour. Aussi Mes oncles Ahmed, Hamid, Chaoui et Taher pour leurs encouragement .

Aussi je dédie ce travail à ma patrie, et à tous ceux qui ont sacrifié pour l'Algérie ...

Remerciements

Le remerciement infini avant tous est à dieu le plus puissant qui m'a comblé des bienfaits de la Science.

Cette étude a été réalisée au Laboratoire de génie mécanique à l'université de Laghouat et laboratoire de génie électriques de l'Ecole militaire polytechnique d'Alger

Tout au long de ma thèse et jusqu'à la présentation finale, j'ai bénéficié de nombreux et divers appuis pour mener à bien ce travail. Un chaleureux remerciement à tous ceux qui m'ont permis d'aller au bout de l'aventure

Merci mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé et appuyé dans mes projet.

Ma Mère qui m'a aimée toujours avec leur Soins j'ai été toujours heureux grâce à elle. Mon Père qui m'a aidée avec tout leur possibilité et leur encouragement.

Mes très sincères remerciements à mon directeur de mémoire Mr.Hadjadj Abdechafik docteur à l'université de Laghouat pour leur disponibilité leur judicieux conseils et la rigueur scientifique qu'ils m'ont transmis ainsi que pour leurs qualités humaines.

En premier lieu, je tiens à remercier enseignant, M. le Prof. Sebaa Mohammed, pour m'avoir encouragé dans cette démarche de formation continue et m'avoir mis à disposition le temps nécessaire à sa réalisation.

Je désire aussi adresser mes remerciements les plus respectueux à Mr Chatti Ali ,Ghalem Ali , Aoussi Chaieb et Mr.Ouled Taher Mohammed qui m'ont formée, conseillée et permis d'avoir mes expériences . J'ai toujours eu du plaisir à travailler avec eux.

Je remercie enfin, l'ensemble des personnes du laboratoire de mécanique de pole universitaire Laghouat et Laboratoire de génie électrique de l'école militaire polytechniques à Alger. Mr.Ales ACHOUR m'a aidé tout au long de la réalisation de cette étude. A tous je leur adresse un amical Souvenir.

Ma reconnaissance va à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour que cette œuvre soit achevée ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Sommaire

Chapitre I : métallurgie

I.1 Aspect théorique	7
I.1.1 Le Cuivre	7
I.1.1.1 Structure cristalline.....	7
I.1.1.2 Propriétés mécaniques et physique.....	7
I.1.1.3 Propriétés électrique	8
I.1.2 Aluminium.....	9
I.1.2.1 Structure cristalline	10
I.1.2.2 Propriétés mécaniques et physique	10
I.1.2.3 Propriétés électriques.....	11
I. 2 Les défauts dans les solides	11
I. 2.1 Les contraintes Internes	11
I.2.2 Les défauts ponctuels.....	13
I. 2.3 Les lacunes.....	13
I. 2.4 Les interstitiels.....	13
I. 2.5 Les défauts linéaires.....	14
I. 2.6 Description géométrique de dislocation.....	16
I. 2.7 Dislocations coins.....	17
I. 2.8 Dislocations vis.....	17
I. 2.9 Vecteur de Burgers	18

Chapitre II : blindage électromagnétique

II.1 Introduction.....	21
II.3 Aspects fondamentaux de la CEM.....	21
II.3.1 L'émission.....	22
II.3.2 L'immunité.....	22

II.3.3 Types de couplage.....	22
II.3.3.1 Les couplages par conduction.....	22
II.3.3.2 Les couplages par rayonnement.....	22
II.4 Rappels de notion électromagnétiques.....	23
II.4.1 Onde électromagnétiques.....	23
II.4.2 Impédance d'onde électromagnétique.....	24
II.5 Blindage électromagnétique "EM"	25
II.7 Principe de Fonctionnement d'un blindage EM.....	25
II.7.1 A haute fréquence.....	25
II.7.2 A basse fréquence.....	26
II.8 Différents types de blindage.....	26
II.8.1 Blindage magnétique.	26
II.8.2 Blindage électrique.....	26
II.8.3 Blindage composite.....	26
II.9 Modélisation de la réflexion d'OEM sur la première interface d'un blindage.....	27
II.10 Efficacité d'un blindage électromagnétique.....	29
II.11 Calcule analytique de l'efficacité de blindage.....	32
II.11.1 Champ électrique.....	33
II.11.2 Champ magnétique	35
II.12 Conclusion	35

Chapitre III

II.1 Echantillonnage.	38
II.1.1 Matériaux utilisés.	38
II.1.2Préparation des échantillons.	38
II.1.2.1 Echantillon de caractérisation plastique.....	38
II.1.2.2 Echantillon pour l'essai TEM	39

II.1.3 Essai de traction.....	40
II.1.4 traitement thermique	41
II.2 caractérisation physique	42
II.2.1 Fluorescence X	42
II.2.2 Diffraction des rayons X	43
II.3 Caractérisation électrique.....	45
II.3.1 Etude de la cellule DTEM	45
II.3.2 Généralité sur la cellule DTEM	45
II.3.2.1 Définition de la cellule TEM	45
II.3.2.2 Cellule DTEM.....	45
II.3.2.3 Présentation de banc de mesure de l'efficacité de blindage	46
II.3.2.4 La jonction hybride	48
II.3.2.5 Fonctionnement du banc.....	48
Chapitre III	
III.1. Fluorescence des rayons X	49
II.2 Résultats de diffractions des rayons X	50
III.3 Traction uniaxiale.	52
III.4 Résultats des mesures de l'efficacité électrique de cuivre	54
III.5 Efficacité magnétique de cuivre SH	57
III.6 Efficacité Electrique d'aluminium	61
III.7 Efficacité Magnétique d'aluminium	63
Chapitre IV	
IV Conclusion	68

ANNEXE A Déformation	53
A.1 Déformation plastique	54
A.2 Traction unidirectionnel (Effort longitudinal)	55
A.3 Energie de déformation	61

Liste des figures

Figure I-1 : Schéma des différentes interactions d'une onde EM avec une plaque conductrice.....	5
Figure I-2. Types de défauts ponctuels dans les cristaux	13
Figure I-3. Glissement suivant un plan compact.....	15
Figure I-4. Traces de glissement à la surface d'un monocristallin déformé plastiquement et schématisation de ces traces à l'échelle atomique	16
Figure I-5. Directions et plans de glissement dans les structures CFC, CC et HC	16
Figure I-6. Structure d'une dislocation coin	17
Figure I-7. Structure d'une dislocation vis	18
Figure I-8. Circuit de Burgers autour d'une dislocation coin et d'une dislocation vis.....	18
Figure II-1 Transmission d'une onde électromagnétique d'un milieu 1 vers un milieu 2.....	23
Figure II-2 Réflexion d'OEM sur la première interface d'un blindage	28
Figure II-3– Coefficients de blindage électrique pour une plaques homogènes	33
Figure II-4 – Coefficients de blindage magnétique d'une plaques homogènes.....	34
Figure III-1. Fraiseuse universelle : usinage des échantillons	38
Figure III-2. Essais de traction avec une machine MTS	38
Figure III-3: principe technique de fluorescence x.....	40
Figure III-4 : Diagramme des concentrations des composés chimiques.....	41
Figure III-5 : diffractomètre (laboratoire de physique université de LAGHOUAT).....	42
Figure III-7. Banc de mesure de l'efficacité de blindage.....	45
Figure IV.1 Pic de concertation du cuivre et de l'aluminium.....	49
Figure IV-2 : diffractogrammes du cuivre sans recuit.....	50
Figure IV-3 : diffractogrammes du cuivre recuit à 850 °C pendant une heure de maintien.	

.....	51
Figure IV-4: diffractogramme de l'aluminium sans recuit.....	51
Figure IV-5: diffractogramme de l'aluminium recuit à 650 °C pendant une heure	52
Figure IV-6 : courbe de traction d'éprouvettes de cuivre.....	53
Figure IV-7 : Courbes de traction de l'aluminium.....	53
Figure IV-9 variation de l'efficacité du blindage électrique du cuivre sans déformation plastique (0% de déformation).....	54
Figure IV-10 variation de l'efficacité du blindage électrique du cuivre déformé à 2%.....	55
Figure IV-11 variation de l'efficacité du blindage électrique du cuivre de déformé à 3%.....	56
Figure IV-12 : Variation de l'efficacité de blindage électrique du cuivre déformé à 4%.	56
Figure IV-13 variation de l'efficacité de blindage électrique du cuivre.....	57
Figure IV-14 variation de l'efficacité de blindage magnétique du cuivre sans déformation en fonction de la fréquence	58
Figure IV-15 variation de l'efficacité de blindage magnétique de cuivre déformé 2% en fonction de fréquence	58
Figure IV-16 Variation de l'efficacité de blindage magnétique du cuivre déformé à 3% en fonction de la fréquence	59
Figure IV-17 Variation de l'efficacité de blindage magnétique du cuivre déformé à 4% en fonction de la fréquence	59
Figure IV-18 Courbes de l'efficacité de blindage magnétique de cuivre 0%,2%,3% et 4%	60
Figure IV-19 Variation de l'efficacité de blindage électrique de l'éprouvette d'aluminium sans déformation en fonction de la fréquence.....	61
Figure IV-20 Variation de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformé 2% en fonction de la fréquence.....	61
Figure IV-21 Variation de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformé 3% en fonction de la fréquence.....	62
Figure IV-22 Variation de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformée 4% en fonction de la fréquence.....	62

Figure IV-23 Courbes de l'efficacité de blindage électrique d'aluminium 0%,2%,3% et 4%	63
Figure IV-24 : variation de l'efficacité magnétique du cuivre sans déformation en fonction de la fréquence	63
Figure IV-25 Variation de l'efficacité magnétique de l'aluminium déformé à 2% en fonction de la fréquence	64
Figure IV-26 Variation de l'efficacité magnétique de l'aluminium déformé 3% en fonction de la fréquence	64
Figure IV-27 Variation de l'efficacité de blindage magnétique de l'éprouvette déformée 4% en fonction de fréquence	65
Figure IV-28 Courbes de l'efficacité de blindage magnétique d'aluminium 0%,2%,3% et 4%	66

Introduction

Introduction

Grace à la maîtrise et le choix judicieux des matériaux la technologie dans tous les domaines à connues une évolution galopante .Le développent des domaines de mécanique, G.Civile, électronique, électrotechnique, médecine et autre n'est remarquable que si le développent des matériaux et la maîtrise des paramètres physico-chimiques, mécaniques et autre de celui-ci sont très bien connus.

Choisir un matériau pour une application ou une autre se repose essentiellement sur la connaissance de l'évolution d'un paramètre par rapport un autre de ce matériau en question.

Les propriétés interseques et extersiques d'un métal ou d'un alliage sont tres variables vis-à-vis les conditions aux quelles cet alliage où ce métal a été mis en forme où les traitements, mécanique où chimique et autres, qu'il a subi.

Dans notre étude on se propose de faire une analyse comparative préliminaire sur la variation de la propriété magnétique (la perméabilité magnétique) en fonction du taux des contraintes internes introduites par déformation plastique sur Al et Cu .autrement dit c'est de voir l'évolution du blindage électromagnétique du Cu et Al en fonction du taux de déformation mécanique des matériaux (dans le domaine plastique).

Notons que cette propriété de blindage magnétique à une large application dans la technologie des hyper fréquences d'ondes électromagnétique. La maîtrise de cette propriété physico-magnétique permet de prévoir les conditions à la quelles on peut agir, pour bien mener la technique du blindage, tout en métrisant, disant l'évitement, de l'effet des interférences entre les machines et installations électroniques ou électriques.

Dans cette étude nous débutons notre travail par deux chapitres d'analyse théorique sur les propriétés physico-mécaniques d'Al et Cu ainsi que la théorie des mesures de telles propriétés; et l'analyse du magnétisme dans les matériaux ; suivie d'un autre chapitre dans le quel on expose les techniques expérimentales, qui se déroule selon deux volés ; le premier c'est la réalisation des éprouvettes et la déformation plastique (introduction des contraintes internes) ; le deuxième c'est l'opération de mesures de efficacité électromagnétique par la

chambre TEM. Par la suite dans un autre chapitre on met en exergue nos résultats détenus, dont en les analysant et les discutons .et en fin en termine par une conclusion dans laquelle on présente l'essentiel de cette étude tout en suggérons des perspectives.

La réduction des interférences électromagnétiques (EMI) est un problème sérieux à prendre en charge en raison de la prolifération des appareils électriques dans les domaines civils et militaires. Ces rayonnements peuvent facilement interférer et générer des effets nocifs sur le bon fonctionnement des appareils [1,3]. Pour cette raison, la recherche se focalise dans le domaine de la compatibilité électromagnétique des matériaux à haute efficacité, dans le but d'atténuer les EMI. Au fil des ans, la technologie du blindage électromagnétique a été perfectionnée afin d'améliorer la légèreté et l'efficacité du blindage électromagnétique des matériaux. Ceux-ci doivent être conçus et développés afin d'inhiber les radiations indésirables [4].

Les interactions entre les ondes électromagnétiques et les matériaux peuvent être divisées en plusieurs mécanismes: la réflexion, l'absorption, la transmission et les réflexions multiples à l'intérieur du bouclier.

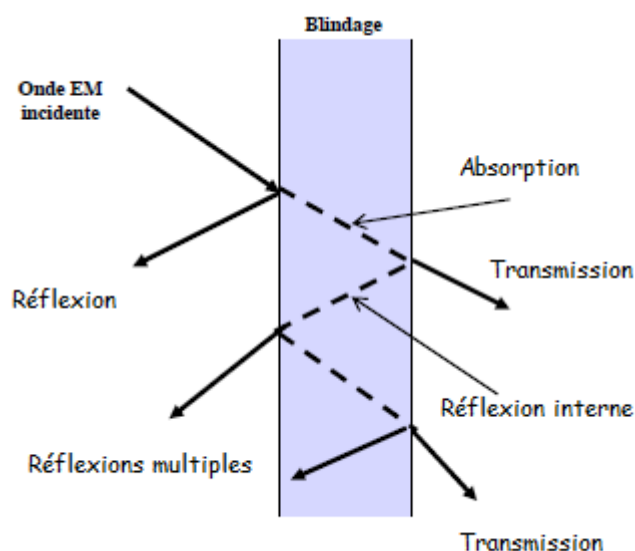


Figure I-1 : Schéma des différentes interactions d'une onde EM avec une plaque conductrice.

La réflexion, dépend de la permittivité et de la conductivité du matériau. Elle augmente proportionnellement en fonction de ces deux paramètres. Le deuxième mécanisme de protection contre les interférences électromagnétiques est l'absorption, elle nécessite l'existence de porteurs de charges mobiles (électrons ou trous) qui interagissent avec le rayonnement électromagnétique. L'atténuation des interférences électromagnétiques est due aux réflexions multiples. Elle dépend des propriétés physiques et de l'effet de forme

géométrique du matériau de blindage. Lorsque le matériau est plus épais, ce troisième mécanisme peut être négligé [4,6].

Le blindage électromagnétique est la principale solution afin de réduire les interférences et les interactions par radiation entre les dispositifs ou les sous-composants des dispositifs eux-mêmes [6,7]. De manière générale, les matériaux de bonne conductivité électrique tels que le cuivre, l'aluminium, etc., présentent de bonnes performances de blindage. Le cuivre est l'un des métaux les plus largement utilisés dans ce domaine. Il est polyvalent et avantageux pour une grande variété d'applications en raison de ses propriétés mécaniques (malléabilité) et électriques (conductivité). Le cuivre présente une ductilité et une malléabilité importantes qui lui donne un avantage important de mise en forme lors de son utilisation comme matériau de blindage contre les interférences électromagnétiques. De plus, les pièces en cuivre et en poudres d'alliages de cuivre ont une excellente ductilité [8,11].

La déformation macroscopique des matériaux se présente sous deux formes : la déformation élastique et la déformation plastique. La déformation élastique est réversible lorsque la contrainte appliquée sur le matériau est inférieure à la limite élastique, dans ce cas le matériau reprend sa forme initiale après suppression de la charge, alors que la déformation plastique survient lorsque la charge est suffisante pour déformer de manière permanente le matériau [12,14].

L'étude de la déformation plastique est probablement due à la volonté de contrôler la mise en forme et l'utilisation des matériaux. En conséquence, cela a été longtemps empirique et ce n'est qu'au cours des dernières décennies que les concepts nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques qui se produisent lors des écoulements plastiques ont été développés [15,17]. Pour les solides cristallins, les mécanismes de base de la déformation plastique sont assez bien connus, mais son effet sur l'efficacité du blindage (paramètres électriques) est mal connu et constitue actuellement un domaine de recherche prometteur [18,20].

Plusieurs chercheurs [13, 15,16] ont obtenu des résultats préliminaires, en étudiant l'effet de l'interaction des dislocations (défauts cristallins linéaires) qui interagissent lors de la déformation plastique sur les propriétés électriques. Dans le présent travail, nous étudions l'effet de la déformation plastique à l'échelle macroscopique qui se traduit à l'échelle microscopique par une multiplicité et mobilité des défauts cristallins linéaires sur les propriétés

de blindage du cuivre et de l'aluminium contre les effets de l'interférence électromagnétique (EMI), autrement dit interaction entre les propriétés mécaniques et électromagnétiques.

1. Aspect théorique

1.1. Le cuivre.

1.1.1. Structure cristalline.

Le cuivre présente une structure monophasé cubique à faces centrées (CFC), dans tous le domaine des températures de l'état solide jusqu'au point de fusion, donc pas de changement des phases en fonction de la température, comme c'est le cas d'autres métaux tel que le fer. Il ne subit aucun changement allotropique structural lorsque sa pureté est de 99.998% à 18°C, son paramètre de maille est égale à 3.6148Å et sa densité est de 8.92 Kg/cm³ [1]. Selon le mode de refroidissement de l'état liquide à l'état solide (vitesse de refroidissement) la germination et croissance des grains obéi à des conditions thermodynamiques bien définies qui influe directement sur le mode de texture des grains de cuivre (texture à gros grains ou à petit grain).

1.1.2. Propriétés mécaniques et physiques.

Les propriétés élastiques d'un cristal de cuivre (cas d'un monocristal) sont des propriétés vectorielles intrinsèques, c'est à dire qu'elles dépendent de la direction d'orientation cristallographique du matériau par rapport à la direction de la contrainte extérieure appliquée, donc anisotropie mécanique due aux systèmes de glissements des dislocations dans le cuivre dont les plans cristallographiques sont de la familles (111) et les directions de glissement sont de la famille [110]. Dans un cristal CFC la distance entre deux atomes varie suivant la direction considérée; comme dans le cas d'un corps isotrope. La relation entre la direction de la contrainte appliquée et la déformation dépend de l'orientation du système des forces appliquées par rapport aux axes cristallins; dans le cas d'un poly-cristal de cuivre dont les grains sont orientés aléatoirement, on peut considérer que l'on se trouve en présence d'un corps plus au moins proche de l'isotropie. Le cuivre commercial synthétisé électrolytiquement, à l'état parfaitement recuit (état thermodynamiquement équilibrée) est caractérisé par les valeurs des paramètres mécaniques suivantes: [1].

Module de Young : $E=1.296 \times 10^2 \text{ GPa}$.

Module de cisaillement : $G=0.483 \times 10^2 \text{ GPa}$.

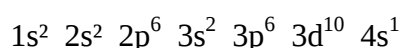
Coefficient de poisson : $\nu= 0.342$.

Le cuivre peut être considéré comme étant un métal mou, susceptible d'une capacité de déformation plastique plus au moins grande. L'allongement avant rupture peut être très important à l'état recuit (état des contraintes internes très réduit), la contrainte à la limite élastique peut être faible alors que celle à la rupture est nettement supérieure. Vu que le cuivre a une structure CFC, le mode de déformation se fait essentiellement par glissement qui s'effectue sur les plans cristallographiques de type $\{111\}$ suivant les directions du type $[101]$. Ces derniers correspondent aux plans cristallographiques les plus denses du système CFC et dont le facteur de Schmid est le plus élevé. Ils existent 12 systèmes de glissement possible pour le cuivre.

La courbe de traction uni-axiale des échantillons poly-cristallins de cuivre ne présente pas de limite élastique nette, comme dans le cas des monocristaux, la courbe s'incurve graduellement au-delà d'une partie rectiligne qui représente le domaine de déformation élastique réversible. On définit pratiquement une limite élastique conventionnelle correspondant à la contrainte nécessaire σ pour provoquer un allongement permanent $\varepsilon = \frac{dl}{l_0}$ déterminé à 0.02%. Cette difficulté de mesure provient du fait que les joints de grains bloquent plus ou moins la mobilité des dislocations qui mène par la suite à un durcissement mécanique (écrouissage). [1]

1.1.3. Propriétés électriques.

La structure électronique de l'atome du cuivre correspond à la configuration des états électroniques ci-dessous :



Les propriétés électroniques et électriques du cuivre sont liées essentiellement à la bande 4s (bande de valence) correspondant à la dernière couche électronique avec un seul électron et avec la bande 3d correspondant à la couche des électrons plus profonde et complétée par 10 électrons.

La bande 4s est énergétiquement responsable des propriétés de transport des électrons dans le cuivre, car l'électron 4s est faiblement lié à l'atome et subit l'attraction des atomes voisins. La configuration énergétique la plus favorable correspond à la mise en commun de tous ces électrons entre tous les ions du réseau avec la possibilité de se mouvoir librement d'un ion à l'autre (modèle de l'électron libre). Dans ce modèle le comportement des électrons

traités par la mécanique quantique est caractérisé par une distribution des valeurs permises de l'énergie (principe de Pauli à respecter). Cette distribution varie de façon continue de zéro à l'infini suivant une loi en K^2 ;

$$p = \hbar K \text{ et } \hbar = h/2\pi \quad \text{eq I-1}$$

$\vec{K}$ est le vecteur d'onde associé à l'électron.

h est la constante de Planck, p est la quantité de mouvement de l'électron.

Cependant cette description ne tient pas compte du potentiel dû aux ions. Les électrons de la couche 3d plus interne sont plus au moins fortement liés au noyau de l'atome et constituent une couche complète avec 10 électrons. On aura donc une bande 3d juste remplie, mais qui est peu profonde vis à vis l'énergie maximum qui peuvent avoir les électrons 4s (énergie de fermi). La couche d a une assez large extension dans l'atome et peut recouvrir celle d'un atome voisin. Il y a par la suite une participation importante de la bande d dans l'énergie de cohésion de cuivre (celle ci étant due principalement à l'énergie coulombienne des ions positifs du réseau plongé dans le gaz des électrons de conduction). Le cuivre a un électron de valence par motif élémentaire; par suite la bande de conduction est à moitié remplie d'électrons, ce qui explique que ce métal est un bon conducteur [1].

On sait que la résistivité électrique est due à la présence d'imperfections dans la périodicité du réseau cristallin des ions. Celles-ci sont essentiellement de deux types :

- a- vibration des ions sur leurs sites par suite du gain d'énergie reçu par les ions lorsque la température augmente. Cet effet introduit dans la résistivité un terme dépendant fortement de la température, appelée résistivité idéale.
- b- les imperfections chimiques (impuretés, isotopes) en substitution ou en insertion dans le réseau, ainsi que les défauts physiques de toute nature qui perturbent l'arrangement régulier des ions : lacunes, interstitiels, dislocations, fautes d'empilement, joint de grain, etc., la collision des électrons sur ces imperfections introduit dans la résistivité un terme indépendant de la température, appelé résistivité résiduelle. La résistivité totale peut donc être considérée comme la somme de la résistivité idéale et la résistivité résiduelle ce qui constitue la loi de Matthiessen.

$$R_t = R (1 + \alpha t) \text{ ou}$$

R est la valeur de la résistance à la température de 0°C

α est le coefficient de température du conducteur

t est l'écart de température en degrés

1.2. Aluminium

1.2.1. Structure Cristalline

L'aluminium se cristallise dans le système cubique à faces centrées (CFC). Il ne présente pas de point de transformation structurale connu (transformation allotropique) [2]. A la température de 25°C le paramètre du réseau a été mesuré par STRAUMANIS M.E. et EJIMA T et est égal à $4.04958 \pm 0.0002 \text{ \AA}$ [2].

La température de fusion de l'aluminium change selon le degré de pureté, elle varie entre 657°C pour 99.000% de pureté à 660.2°C avec 99.996% dans un milieu où la pression est comprise entre 0 et 45Kbar

1.2.2. Propriétés mécaniques et physiques.

Le module d'élasticité varie en fonction de la pureté et la température d'application de contrainte ainsi que l'historique de mise en forme (laminage, fonderie etc.), il est environ 67.7GPa et le module de cisaillement environ 25GPa [2].

L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant avec un aspect argent-gris mat, dû à une mince couche d'oxydation (alumine Al_2O_3). Cette couche, de 5 à 10 nm, se forme rapidement quand on l'expose à l'air, elle est très dure et est imperméable, ce qui empêche la corrosion de progresser dans des conditions normales d'exposition chimiques. À la différence de la plupart des métaux, il est utilisable même s'il est oxydé en surface. On peut même dire que sans cette couche d'oxyde, il serait impropre à la plupart de ses applications. Il est possible d'augmenter artificiellement l'épaisseur de cette couche d'oxydation par anodisation, ce qui permet d'augmenter la protection et de décorer les pièces en colorant la couche d'oxyde. Contrairement à l'aluminium qui est un très bon conducteur, l'oxyde d'aluminium est un excellent isolant.

L'aluminium a une densité environ trois fois plus faible que celle du cuivre; il est plus malléable, plus ductile et facilement usinable et coulable [3], vu sa bonne conductivité électrique, sa faible densité par rapport aux autres conducteurs et son coût économique ;

l'aluminium et ces alliages sont très utilisés dans le transport de l'énergie électrique en haute tension et occupe une large place dans les échangeurs thermiques.

1.2.3. Propriétés électriques.

La présence des impuretés dans l'aluminium affecte très sensiblement la conductibilité électrique dès que la température de mesure est abaissée en dessous du point d'ébullition de l'azote liquide (-177°C), dans le domaine d'agitation thermique très faible du réseau atomique.

La contribution à la résistivité de l'aluminium des différents types de défauts que l'on peut rencontrer est fonction de la nature de ces défauts (lacunes, interstitiels et dislocations). Les dislocations sont le type de défaut le plus influant, ceci est dû à leur taille, à leur densité et à leur nombre. L'aluminium est aussi paramagnétique et ne provoque pas d'étincelles. [3]

2 Les défauts dans les solides

2.1 Les contraintes internes.

Les contraintes internes sont des contraintes enfermées dans un composant et existent sans aucune charge externe. Ils peuvent se présenter à n'importe quel moment au cours de la vie des composants et apparaissent toujours dans une certaine mesure au cours des opérations de fabrication telles que le moulage, le laminage, l'usinage ou bien le soudage. Les contraintes internes sont toujours équilibrées au sein d'un composant ou d'un assemblage avec des contraintes de compression à certains endroits et de traction à d'autres, selon le mode d'application des contraintes externes.

Les contraintes internes sont définies comme étant des imperfections cristallographiques (défaut de rangement) et on peut les classer suivant leurs formes :

- ✓ a)- les fautes d'empilement cristallographique qui se présentent sous forme d'un ensemble d'atomes dans un grain, géométriquement décalé par rapport au reste des atomes du grain dont les bords de la faute d'empilement sont cadrés par des dislocations imparfaites de Schoklly qui présentent une distorsion interatomique en formant des contraintes mécaniques internes. Le grossissement de la taille d'une faute d'empilement se développe en macle.

- ✓ B)- Les interfaces inter-granulaires dans les monophasé ou les polyphasés géométriquement on peut les considérés comme un empilement verticale d'un ensemble de dislocations qui prend naissance par la désorientation cristallographique d'un grain par rapport à l'autre voir . Cette désorientation génère au niveau de la frontière de collage des grains une forte distorsion des liaisons atomiques (qui dépend de l'angle de la désorientation), qui par la suite forme des forte contraintes mécaniques inter-faciale. Cette interface est thermodynamiquement hors équilibre.
- ✓ C)- Les dislocations parfaites se présentent sous forme de l'introduction d'un demi-plan d'atomes cristallographique ; qui par conséquent forme une rangé d'atomique introduisant une distorsion des liaisons atomiques avec le contour du reste des atomes. Cette distorsion géométrique se traduit par la formation des contraintes mécanique linaire

Ces Types des défauts se structure cristalline, dans n'importe quel matériau cristallin qu'il soit monophasé ou polyphasé, par les distorsions des liaisons atomique créent des contraintes internes qui s'opposent au contraintes appliquées externes dont la valeur dépend de la concentration (taux des contrainte internes). Ils peuvent se présenter à n'importe quel moment au cours de la vie des composants et apparaissent toujours dans une certaine mesure au cours des opérations de fabrication telles que le moulage, le laminage, l'usinage ou bien le soudage etc. Les contraintes internes sont toujours en mode hors équilibre thermodynamique au sein d'un composant ou d'un assemblage par soudure.

Les cristaux parfaits dont la structure cristalline est la répétition périodique d'une maille élémentaire dans l'espace sont des cristaux idéaux. Les cristaux réels ont des structures qui diffèrent, au moins localement, de cet arrangement périodique car ils sont le siège de défauts de différentes natures et plus particulièrement la présence des dislocations et des joints de grains et autres. Les défauts peuvent être sans dimension (défauts ponctuels), à une dimension (dislocations), à deux dimensions (joints de grains, fautes d'empilement, macles) ou à trois dimensions (précipités, inclusions). Certaines propriétés des matériaux dépendent essentiellement de la structure et les défauts tels que le module d'élasticité, coefficient de dilatation linéique, propriétés magnétiques et ferroélectriques. En en revanche, sont fortement influencées par la nature et la concentration des défauts qu'ils contiennent (comportement

sous contrainte, phénomène de diffusion et traitement thermique, conductibilité électrique, etc.).

2.2 Les défauts ponctuels.

Ce sont des défauts sans dimension qui ont une taille de l'ordre de la distance interatomique. Il existe trois types de défauts ponctuels : les lacunes (absence d'un atome, les interstitiels (présence d'un atome en substitution ou insertion), comme est décrit par le schéma de la figure I-2. La présence de défauts ponctuels entraîne une distorsion locale du réseau cristallin et engendre un champ de contrainte élastique dans un volume du cristal supérieur à celui du défaut lui-même [4].

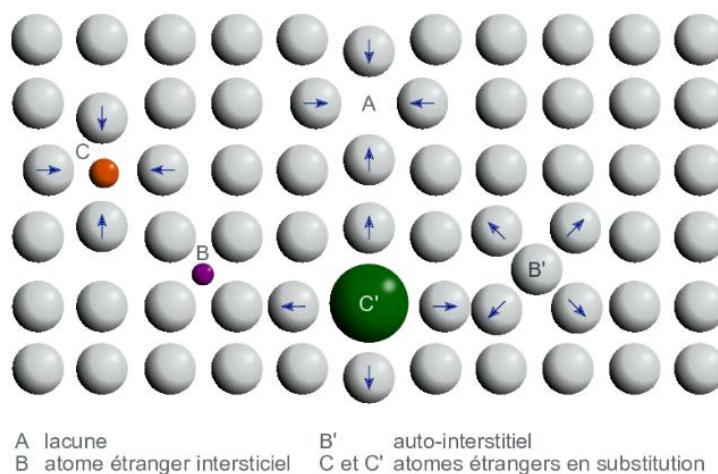


Figure I-2. Types de défauts ponctuels dans les cristaux : (a) lacune, (b) atome étranger interstitiel, (b') auto-interstitiel et (c) atome étranger en substitution [60]

2.3 Les lacunes.

Ce défaut correspond à un site atomique inoccupé dans la structure. Les lacunes jouent un rôle fondamental dans la diffusion thermique ou implantation ionique de matière à l'état solide, qui par la suite engendre des déplacements d'atomes sur de longues distances et est à la base des traitements thermiques et le gradient de concentration.

2.4 Les interstitiels.

Ce sont des atomes qui s'insèrent dans les espaces vides du réseau cristallin. Si l'atome en insertion est lui-même un atome du réseau cristallin, on parle d'auto-interstitiel.

Les défauts interstitiels jouent un grand rôle dans la constitution des alliages; lors des traitements thermiques changes de site par diffusion ou rétrodiffusion thermique.

2.5 Les défauts linéaires.

Lorsque l'on déforme un cristal au delà de son domaine élastique, on voit apparaître à sa surface des lignes appelées traces de glissement. Ces traces correspondent à de petites différences marches observées sur la surface bien polie du matériau, qui traduisent le glissement des plans cristallins les uns par rapport aux autres. Elles sont la manifestation du mouvement, sous l'effet des efforts mécaniques extérieurs, des défauts linéaires présents dans le cristal (mobilité des dislocations par effet de glissement dans plans cristallographiques favorables).

Une dislocation est un défaut linéaire qui perturbe la l'arrangement périodique parfait du cristal en créant une distorsion sur les liaisons atomiques qui se traduit par un champ de contrainte au tour de cette dite ligne de dislocation. Nous supposons connus les éléments de la théorie des dislocations et rappellerons que la distorsion du réseau, centrée sur la ligne des dislocations, correspond à un champ de déformation par traction et par compression pour une dislocation coin et un champ de cisaillement pour une dislocation vis. Ces déformations du réseau qui s'étendent sur plusieurs distances interatomiques, diffusent les électrons de conduction ce qui explique les coefficients d'influence sur la résistivité résiduelle. L'énergie de formation d'une dislocation est élevée et l'entropie correspondante est faible. Théoriquement on ne devrait pas observer de dislocations en équilibre thermique. La déformation plastique a lieu par le mouvement et la multiplication des dislocations, et le durcissement du métal se produit par suite des interactions entre les dislocations.

Cependant, les contraintes internes introduites par déformation plastique ou frottement de réseau lors d'un échauffement suivie d'un refroidissement hors équilibre thermodynamique sont en mode tridimensionnel. Parfois contraintes résiduelles de compression peuvent être introduites intentionnellement pour renforcer les éléments, mais les contraintes résiduelles de traction peuvent réduire considérablement la durée de vie de composant.

La multiplication et l'empilement des contraintes internes (densité de dislocations très élevées) se développent en fautes d'empilement cristallographique puis en macle, sous l'effort de la contrainte de cisaillement très élevé localement (à l'échelle microscopique) se manifesté par le développement des micros fissures sous l'effet des contraintes externes.

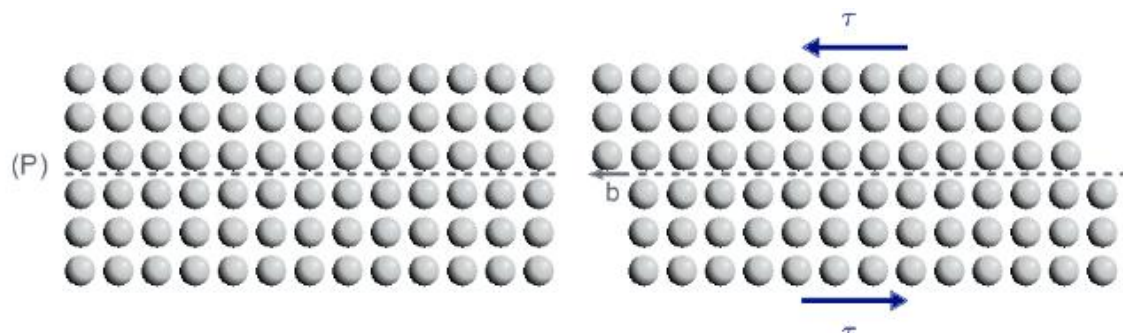


Figure I-3. Glissement suivant un plan compact [60]

Nous supposerons connus les éléments de la théorie des dislocations et rappellerons que la distorsion du réseau, centrée sur la ligne des dislocations appelée cœur de dislocation, correspond à un champ de déformation par traction et par compression qui se réduit à un cisaillement pour une dislocation coin dont le sens de déplacement est perpendiculaire à la ligne de dislocation alors que pour une dislocation vis le sens de déplacement est parallèle à la ligne de dislocation. Ces déformations du réseau qui s'étendent sur plusieurs distances interatomiques, diffusent les électrons de conduction ce qui explique les coefficients d'influence sur la résistivité résiduelle. L'énergie de formation d'une dislocation est élevée et l'entropie correspondante est faible. Théoriquement on ne devrait pas observer de dislocations en équilibre thermodynamique. La déformation plastique a lieu par le mouvement et la multiplication des dislocations, et le durcissement du matériau se produit par suite des interactions entre les dislocations.

Cependant, les contraintes internes travaillées en mode tridimensionnel. Parfois contrainte résiduelles (contraintes internes à l'état de repos) peuvent être introduits intentionnellement influent directement quelques propriétés des matériaux cristallins, tels que le module d'élasticité, ductilité, conductivité électrique, propriétés magnétiques, résistance à la corrosion etc.,.

Le concept de dislocation a pour origine, le profond désaccord entre la théorie et l'expérience, concernant la déformation plastique (permanente) des cristaux par cisaillement. La limite élastique théorique d'un cristal correspond à la contrainte la plus faible nécessaire pour obtenir la déformation plastique la plus petite possible. Sous l'effet d'une contrainte de cisaillement, on peut induire le déplacement relatif d'une partie du cristal par rapport à une

autre suivant un plan compact (pour obtenir la plus petite déformation possible : une distance interatomique) et selon le schéma présenté ci-après.

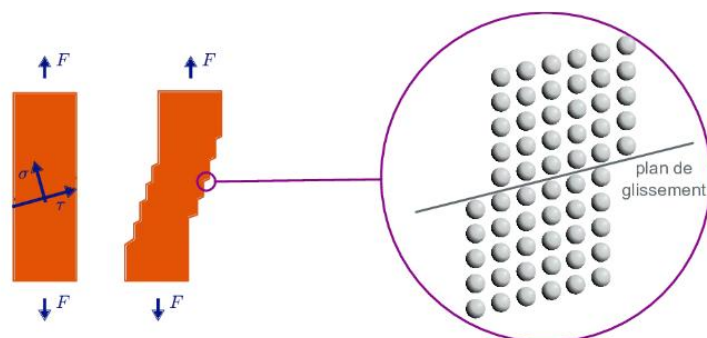


Figure I-4. Traces de glissement à la surface d'un monocristallin déformé plastiquement et schématisation de ces traces à l'échelle atomique [60]

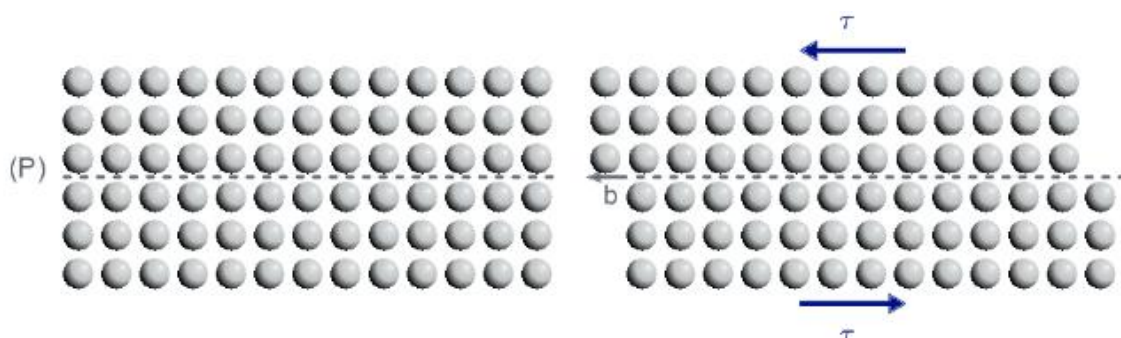


Figure I-5. Glissement suivant un plan compact [60]

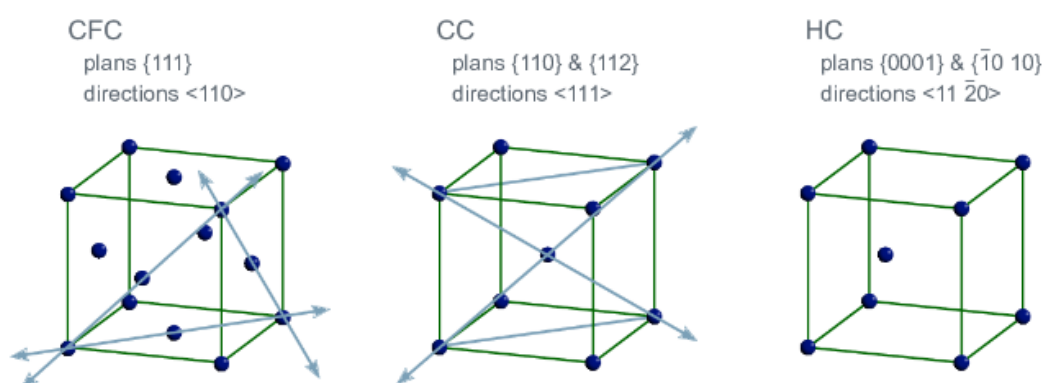


Figure I-6. Directions et plans de glissement dans les structures CFC, CC et HC [60]

2.6 Description géométrique.

Il existe deux types de dislocations droites : les dislocations coins et les dislocations vis. En pratique, les dislocations présentent souvent, en proportion donnée, le caractère coin et le caractère vis : on parle alors de dislocations mixtes. Ces dislocations sont courbes (ou

gauches) et en chaque point on peut les décomposer en un composant coin et une composante vis [4].

3.7 Dislocations coins.

Géométriquement, une dislocation coin peut être comprise comme résultant de l'introduction d'un demi plan atomique à l'intérieur d'un cristal parfait. L'emplacement de la dislocation est défini comme la limite de ce demi-plan supplémentaire dans le cristal par ailleurs parfait (Figure I-8).

La déformation est identique à celle créée en introduisant un plan supplémentaire d'atomes à la partie supérieure du cristal. Les atomes du demi-cristal supérieur sont comprimés, les autres sont dilatés [4].

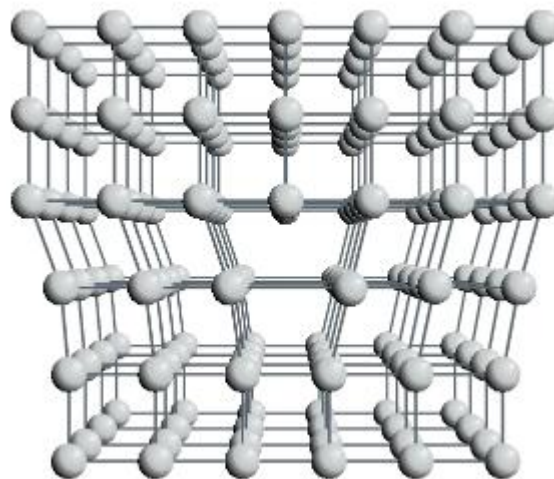


Figure I-7. Structure d'une dislocation coin [60]

3.8 Dislocations vis

On peut se représenter une dislocation vis en imaginant que l'on fait une entaille dans le cristal et que l'on fait glisser l'un des bords de cette entaille par rapport à l'autre d'une distance interatomique.

Une dislocation vis transforme les plans atomiques successifs en une surface hélicoïdale d'où son nom

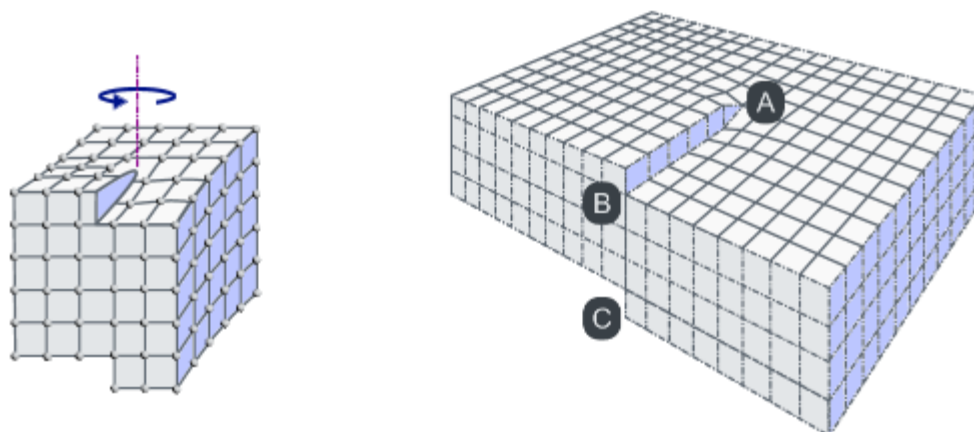


Figure I-8. Structure d'une dislocation vis : la ligne verticale passant par A qui marque l'emplacement de la dislocation est entourée de matériau déformé [60]

3.9 Vecteur de Burgers

Une dislocation est entièrement définie par sa position dans le cristal par un vecteur appelé vecteur de Burgers et noté b . Le vecteur de Burgers est défini comme le défaut de fermeture d'un circuit (circuit de Burgers) reliant les atomes voisins et encerclant la ligne de dislocation. Par convention, on choisit généralement comme sens de construction du circuit de Burgers le sens des aiguilles d'une montre. Dans le cas d'une dislocation coin, on constate, grâce à cette construction, que le vecteur de Burgers est perpendiculaire à la ligne de dislocation (voir Schéma). Dans le cas d'une dislocation vis, ce vecteur est parallèle à la ligne de dislocation (voir Schéma). Dans le cas le plus général d'une dislocation mixte, le vecteur de Burgers fait un angle quelconque avec la ligne de dislocation [4].

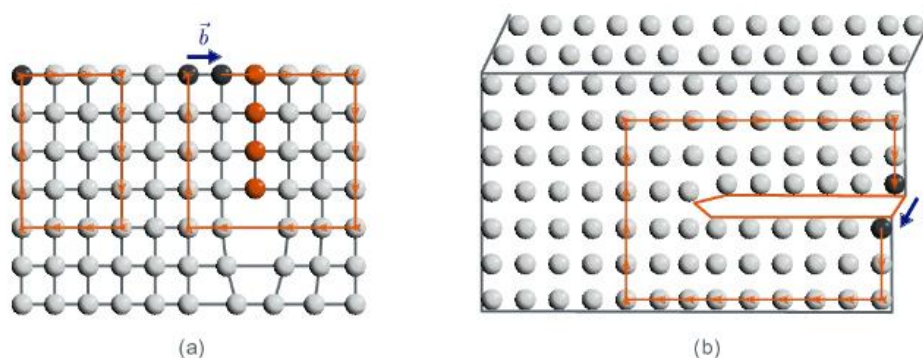


Figure I-9. Circuit de Burgers autour d'une dislocation coin et d'une dislocation vis [60]

Quand le vecteur de Burgers correspond à une translation du réseau, alors la dislocation est une dislocation parfaite. Si ce n'est pas le cas, la dislocation est une dislocation partielle, on l'appelle dislocation de SCHOKLY. Généralement la valeur de la contrainte de cisaillement

dépend de la valeur de la contrainte externe appliquée et le type du plan de glissement et se là selon le facteur de SCHMID le plus élevé.

$$\tau = \mu \cdot b \cdot L$$

μ : coefficient dépend du matériau

b : vecteur de BURGERS

L : longueur de la ligne de dislocation

Chapitre II

BLINDAGE

ELECTROMAGNETIQUE

II.1 Introduction.

La diminution des interférences électromagnétiques (IEM) est devenue un problème important à prendre en charge suite à l'omniprésence des appareils électriques et /ou électronique dans les domaines civils et militaires. Ces rayonnements EM peuvent facilement interagir et engendrer des effets nuisibles sur le bon fonctionnement de ces appareils [1,3].

Cependant, la Compatibilité Électromagnétique "CEM" est un domaine scientifique qui focalise une partie de ses recherches aux matériaux à haute efficacité électromagnétique dans le but d'atténuer ces perturbations ou ces interférences électromagnétique. Au fil des ans, la technologie du blindage a été perfectionnée afin d'améliorer la légèreté et l'efficacité du blindage électromagnétique des matériaux. [4].

II.2 Compatibilité électromagnétique.

La compatibilité électromagnétique "CEM", est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement [5].

La C.E.M. est une nécessité pour le fonctionnement satisfaisant de tous les systèmes, équipements et sous-ensembles d'une installation. Depuis longtemps, elle est imposée par cahier des charges dans toutes les applications militaires, spatiales, etc. Dans le domaine civil, elle est devenue obligatoire en Europe depuis 1996, ainsi que dans bon nombre de pays industrialisés. Ainsi la commercialisation de tout produit non conforme est illégal et passible de lourdes sanctions.

II.3 Aspects fondamentaux de la CEM.

Le problème de l'analyse d'une perturbation électromagnétique englobe trois éléments à savoir: la source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique (source ou L'émission), le canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage (support de couplage) et enfin le récepteur qui capte cette énergie (victime) [6]. Ces trois éléments sont définis comme suit :

II.3.1 L'émission

L'émission correspond à l'étude de la pollution électromagnétique émise par un système et/ou un composant dans un environnement. Par définition, nous appellerons ce système ou composant polluant, la source électromagnétique.

II.3.2 L'immunité

L'immunité est l'analyse de la capacité d'un système et/ou d'un composant à assurer sa fonction dans un environnement électromagnétique agressif. Par définition, ce système ou composant correspond à la victime.

II.3.3 Types de couplage

Les types de couplage concernent l'étude des chemins de propagation et le type de perturbation électromagnétique qui lie la source à la victime. Nous identifions plusieurs familles de couplage [7].

II.3.3.1 Les couplages par conduction

On parle de couplage par conduction, lorsque la perturbation se superpose sur un conducteur de type câble, plan de masse ou carcasse métallique.

II.3.3.2 Les couplages par rayonnement

On parle de couplage par rayonnement, lorsque la perturbation se propage dans l'air ou dans le milieu sous la forme d'un champ électrique $\vec{E}$, magnétique $\vec{H}$ ou électromagnétique (agissant sur une antenne, à travers les ouvertures des blindages, ou directement sur les fils d'interconnexion).

Ces types de couplages dépendent fortement de la fréquence de la source. Par définition, les basses fréquences (BF) induiront des perturbations de type conduit tandis que les hautes fréquences (HF) induiront des perturbations dite « rayonnées ».

Pour atténuer les niveaux de ces parasites, il faut réduire le niveau d'émission de la source, interrompre le chemin de propagation ou encore protéger par blindage électromagnétique le récepteur de façon à l'immuniser contre les émissions.

II.4 Rappels de notion électromagnétiques

II.4.1 Onde électromagnétiques

Une onde électromagnétique est l'association de deux champs couplés, un champ électrique $\vec{E}$ et un champ magnétique $\vec{H}$ son expression en régime Fréquentielles donner par la relation suivante :

$$\begin{cases} E(x, y, z) = E_0 e^{-ikr} \\ H(x, y, z) = H_0 e^{-ikr} \end{cases}$$

Où E_0 et H_0 sont les amplitudes complexes et k est le vecteur d'onde. La propagation d'une onde électromagnétique d'un milieu (1) vers un milieu (2) est illustrée Par la figure II.1.

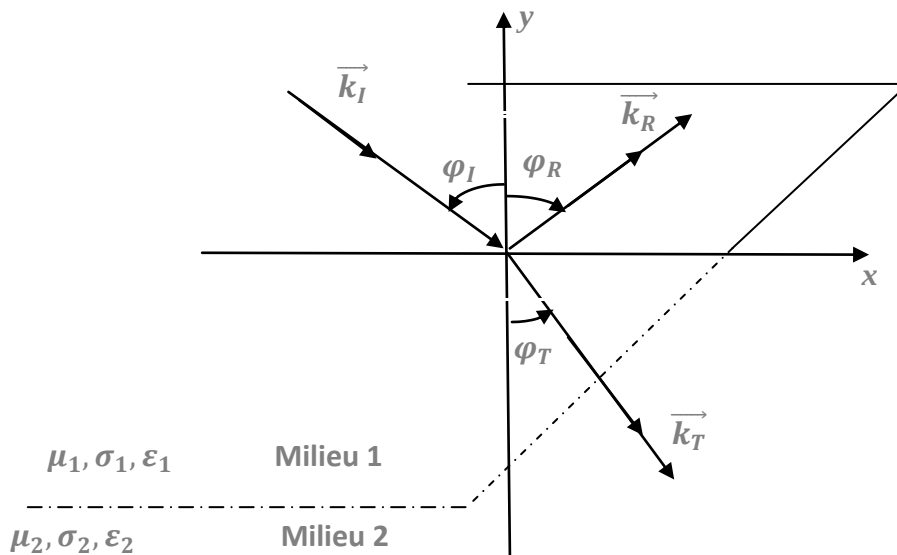


Figure II-1 Transmission d'une onde électromagnétique d'un milieu 1 vers un milieu 2

La propagation d'une onde électromagnétique est décrite par les équations de Maxwell suivantes :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\vec{E} \end{cases}$$

Le vecteur d'onde et l'impédance intrinsèque du milieu sont donnés, respectivement, par les relations suivantes [22]:

$$k = \omega \sqrt{\mu \left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right)}$$

où $\omega, \varepsilon, \sigma$, et μ représentent, respectivement, la pulsation de l'onde électromagnétique, la permittivité diélectrique, la conductivité électrique et la perméabilité magnétique du milieu.

II.4.2 Impédance d'onde électromagnétique

De même qu'en électricité où on mesure l'impédance d'un circuit par le rapport U/I , on exprime l'impédance Z_A d'une onde électromagnétique par E/H . cette impédance définit la nature de l'onde. Elle s'exprime en ohms.

Dans la région de champ proche, l'intensité du champ électrique E et l'intensité du champ magnétique H sont en corrélation, l'expression de l'impédance Z_A est donner par la formule suivante :

$$Z_A = \frac{E}{H}$$

En champ proche l'impédance d'onde dépend de la source. S'il s'agit d'une source de courant avec une tension faible, on est à prédominance magnétique $\frac{E}{H} < 377\Omega$. Si c'est une source de forte tension sous faible courant, le champ électrique est prédominant $\frac{E}{H} > 377\Omega$.

En champ lointain, on retrouve $Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega$.

Dans un matériau quelconque l'impédance caractéristique d'une onde électromagnétique Z_M est exprimé par la relation suivante :

$$Z_M = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$

Pour un matériau bon conducteur cette impédance devient :

$$Z_{M0} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}}.$$

L'épaisseur de peau est donnée par l'expression suivante

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}.$$

Cette expression est pratique pour représenter la pénétration des champs électromagnétiques dans un matériau puisque l'amplitude des champs décroît quand on s'éloigne de l'interface.

II.5 Blindage électromagnétique "EM".

Le blindage est constitué d'une enveloppe conductrice que l'on met en place autour des composants électriques et électroniques afin de constituer une barrière vis à vis des influences électrostatiques, magnétiques, ou électromagnétiques [8]. Il a pour but de protéger les installations électroniques et/ou électriques contre les effets indésirables des perturbations électromagnétiques. Il permet de d'augmenter l'immunité électromagnétiques d'un équipement contre les agressions électromagnétique extérieur, ainsi cette fonction est aussi réversible car il permet aussi de réduire l'amplitude des rayonnements indésirables vers l'extérieure Le blindage électromagnétique représente une solution considérée très efficace pour réduire ces phénomènes d'interférences.

Pour diverses raisons, surtout liées à la nature physique des matériaux qui composent le blindage ainsi qu'aux contraintes technologiques imposées par leur fabrication ou leur installation, cette frontière n'est pas totalement imperméable. Un parasite résiduel peut donc pénétrer dans la zone protégée.

Le but d'un blindage est double:

- Contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée.
- Exclure les émissions rayonnées des sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte [9].

II.7 Principe de Fonctionnement d'un blindage EM

II.7.1 A haute fréquence

Un champ électromagnétique consiste en un champ électrique et un champ magnétique variables et couplés. Le champ électrique produit une force sur les porteurs de charge électrique des matériaux conducteurs (les électrons). Aussitôt qu'un champ électrique est

appliqué à la surface d'un conducteur parfait, il produit un courant électrique, le déplacement des charges au sein du matériau diminue le champ électromagnétique à l'intérieur du matériau [9]. De la même façon, des champs magnétiques variables génèrent des vortex de courant électrique qui agissent de façon à annuler le champ magnétique. (Un conducteur électrique qui ne serait pas ferromagnétique laisse librement passer le champ magnétique).

II.7.2 A basse fréquence

En basse fréquence, les champs électriques ne posent pas beaucoup de problème: ils sont facilement maîtrisables. Il n'en est pas de même des champs magnétiques: en milieu perturbé (par ex: présence d'un gros transformateur), ils se manifestent notamment sur les écrans de visualisation par des déformations ou des ondulations de l'image. Pour éliminer ce problème, il faut éloigner l'écran de la source de perturbation (plusieurs dizaines de cm) ou utiliser un écran métallique réalisé dans un alliage à forte perméabilité [9].

II.8 Différents types de blindage

II.8.1 Blindage magnétique.

Le blindage magnétique est constitué d'un matériau capable d'offrir un chemin de réluctance relativement faible aux lignes de champ issu d'une source de champ magnétique, et d'en préserver les zones à protéger. Exemple: protéger le tube d'un oscilloscope de l'influence d'un transformateur d'alimentation.

II.8.2 Blindage électrique.

Il est possible de blinder un champ électrostatique en utilisant une cage de Faraday. Le blindage électrostatique est créé par le fait que les charges électriques présentes sur la surface conductrice tendent à se distribuer de telle sorte qu'elles éliminent le champ électrique à l'intérieur du matériau conducteur. Par conséquent, un champ électrostatique ne pénètre pas un volume se trouvant à l'intérieur d'une enceinte conductrice. Les charges électriques sont totalement mobiles dans les matériaux conducteurs. Même dans des structures métalliques extrêmement minces, les charges mobiles sont présentes en quantités suffisantes pour créer un blindage efficace. C'est la raison pour laquelle la densité du matériau de blindage est plus importante que son épaisseur dans son efficacité contre le champ électrostatique [9] .

II.8.3 Blindage composite.

Ce type de blindage est fait de couches de métal à haute densité/haute résistance et de céramiques plastiques de haute résistance à la chaleur. Les couches non métalliques jouent le rôle de pièges à chaleur ou de réflecteurs.

Habituellement, le blindage composite a une surface extérieure d'acier durci, comme les blindages normaux. Mais en dessous, nous trouvons des couches successives de métaux et de céramiques [10].

Cependant, il n'existe pas de matériaux à conductivité infinie qui permettent de créer un blindage parfait. Il y'aura toujours une pénétration de champ électromagnétique à travers les parois par diffusion. De toute manière, aucun blindage ne peut être une enceinte complètement fermée, car il serait absurde d'imaginer l'existence d'un équipement complètement isolé, sans communication avec l'extérieur [11].

II.9 Modélisation de la réflexion d'OEM sur la première interface d'un blindage

Pour simplifier les calculs, nous chercherons à remplacer les champs réfléchis par des générateurs de tensions et de courant dont les amplitudes dépendent de l'amplitude incidente. Les champs incidents E_i et H_i se déplacent dans le milieu d'impédance Z_w . Une partie est réfléchiée E_r et H_r et l'autre partie est transmise dans le blindage E_t et H_t . Les conditions aux limites sur l'interface expriment la continuité de la composante tangentielle du champ électrique et magnétique. On a donc deux relations :

$$E_i + E_r = E_t \quad (1)$$

$$H_i + H_r = H_t \quad (2)$$

A partir des expressions (1) et (2), nous pouvons écrire :

$$\frac{E_i}{Z_w} - \frac{E_r}{Z_w} = \frac{E_t}{Z_s}$$

$$\frac{E_i}{Z_w} - \frac{E_i - E_t}{Z_w} = \frac{E_t}{Z_s}$$

Donc

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_s}{Z_w + Z_s}$$

On retrouve bien le fait que le champ électrique est nul sur un conducteur parfait ($Z_s \sim 0$). Pour l'excitation magnétique H , on obtient une expression similaire à partir de

(1)

$$\frac{H_t}{H_i} = \frac{2Z_W}{Z_W + Z_S}$$

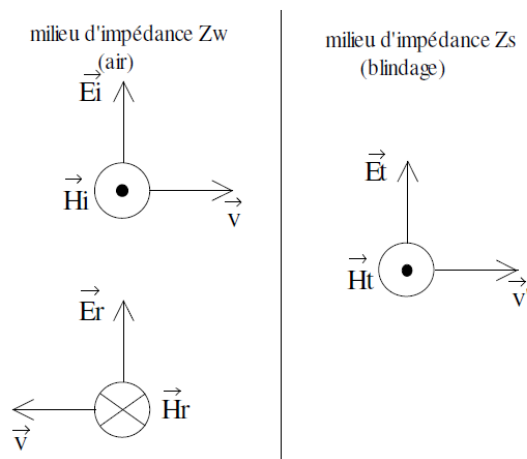


Figure II-2 Réflexion d'OEM sur la première interface d'un blindage

Pour étudier complètement un blindage, nous devons tenir compte de la réflexion sur la 2ème interface et de l'atténuation des champs en fonction de l'épaisseur du blindage; mais avant pour simplifier l'écriture, posons le coefficient de réflexion

$$\rho = \frac{Z_S - Z_W}{Z_W + Z_S}$$

Après la réflexion sur l'interface d'entrée, l'amplitude des champs dans le matériau diminue exponentiellement à mesure que l'on s'éloigne de l'interface d'entrée. Sur la 2ème interface du blindage, une partie du champ est réfléchi vers l'entrée et l'autre partie est transmise. Pour calculer la part de ce qui est réfléchi et transmis, nous devons considérer l'impédance du blindage par rapport à l'impédance du milieu de sortie. Les rôles joués par Z_S et Z_W sont inversés par rapport à l'entrée et les coefficients de réflexion sont de signes opposés.

Les champs réfléchis sur l'interface de sortie retournent vers l'entrée et sont à nouveau réfléchis. L'amplitude de ce qui est à nouveau réfléchi sur l'interface d'entrée dépend du

coefficient de réflexion, mais aussi de l'atténuation des champs due à la décroissance exponentielle des champs dans un métal.

II.10 Efficacité d'un blindage électromagnétique

L'efficacité de blindage représente l'atténuation d'un écran vis à vis les ondes électromagnétiques, elle est définie comme étant le rapport entre le champ incident mesuré sans écran et le champ transmis en présence de l'écran [12]. Ce rapport permet d'évaluer le niveau de protection de ce blindage.

L'efficacité d'un blindage est habituellement exprimée en décibels, elle est calculée sous la forme d'un rapport entre la puissance du champ électrique, la puissance du champ magnétique ou la puissance des ondes transmises et incidentes.

L'efficacité de blindage, pour le champ électrique est définie par l'expression suivante :

$$S_E(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{E_{\text{Incident}}}{E_{\text{Transmis}}}\right) \quad (3)$$

De même, l'efficacité de blindage pour le champ magnétique est définie par :

$$S_H(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{H_{\text{Incident}}}{H_{\text{transmis}}}\right) \quad (4)$$

L'efficacité de blindage dépend de plusieurs facteurs à savoir:

- la distance de la source de perturbation par rapport au système perturbé: si la source de perturbation se trouve loin du système perturbé on parle de blindage en champ lointain, par contre, si la source est proche du système perturbé on parle alors de blindage en champ proche, soit à prédominance électrique ou à prédominance magnétique.
- Le type et l'épaisseur du matériau, la forme du blindage, la présence d'ouvertures et la direction de polarisation du champ incident.
- La fréquence du champ incident est également un paramètre très important [10].

L'efficacité S d'un écran peut être donnée par la relation suivante:

$$S(\text{dB})=A+R+B$$

Ou :

- ✓ S (dB) : Atténuation de l'écran en (dB)
- ✓ A (dB) : Atténuation par absorption en (dB).
- ✓ R (dB) : Atténuation par réflexion en (dB).
- ✓ B (dB) : Atténuation due aux réflexions multiples en (dB).

Alors l'efficacité de blindage en champ électrique ou en champ magnétique se calcule comme étant le rapport des champs sortant par rapport aux champs incidents. Le champ sortant global est la somme des différents champs partiels dû aux réflexions multiples dans le blindage [10].

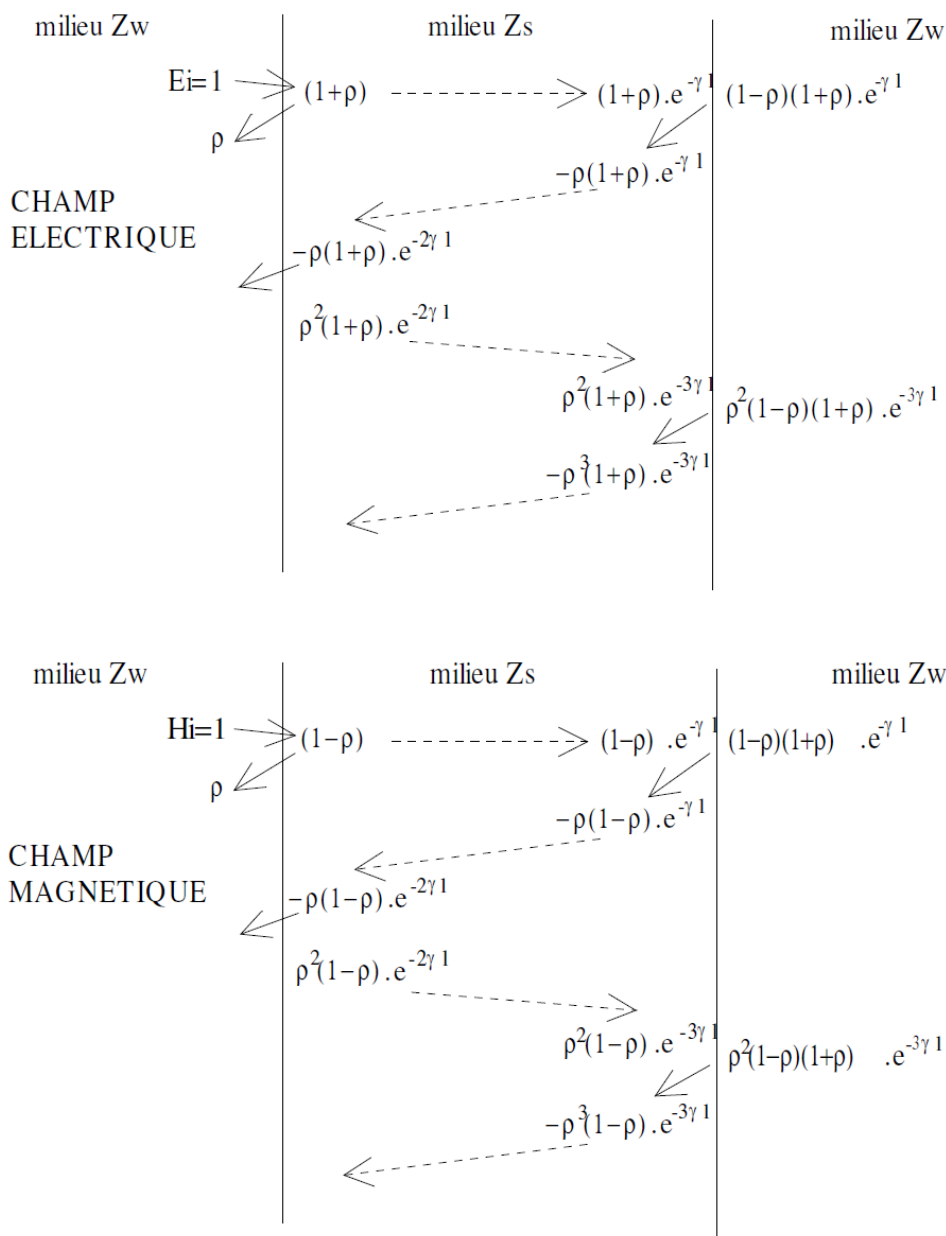
Efficacité du blindage EM en fonction de tous les termes

Pour étudier complètement un blindage, nous devons tenir compte de la réflexion sur le 2ème interface et de l'atténuation des champs en fonction de l'épaisseur du blindage; mais avant pour simplifier l'écriture, posons le coefficient de réflexion

$$\rho = \frac{Z_s - Z_w}{Z_w + Z_s}$$

Après la réflexion sur l'interface d'entrée, l'amplitude des champs dans le matériau diminue exponentiellement à mesure que l'on s'éloigne de l'interface d'entrée. Sur le 2ème interface du blindage, une partie du champ est réfléchi vers l'entrée et l'autre partie est transmise. Pour calculer la part de ce qui est réfléchi et transmis, nous devons considérer l'impédance du blindage par rapport à l'impédance du milieu de sortie. Les rôles joués par Z_s et Z_w sont inversés par rapport à l'entrée et les coefficients de réflexion sont de signes opposés.

Les champs réfléchies sur l'interface de sortie retournent vers l'entrée et sont à nouveau réfléchies. L'amplitude de ce qui est à nouveau réfléchi sur l'interface d'entrée dépend du coefficient de réflexion, mais aussi de l'atténuation des champs due à la décroissance exponentielle des champs dans un métal.



L'efficacité de blindage en champ électrique ou en champ magnétique se calcule comme étant le rapport des champs sortant par rapport aux champs incidents. Le champ sortant global est la somme des différents champs partiels dû aux réflexions multiples dans le blindage. Finalement, on obtient l'expression suivante :

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{H_t}{H_i} = (1 + \rho)(1 - \rho)e^{-\gamma l} \cdot (1 + \rho^2 e^{-2\gamma l} + \rho^4 e^{-4\gamma l} + \dots)$$

Le terme dans la parenthèse de droite rappelle une suite géométrique dont la somme infinie est donnée par l'expression : $\frac{1}{1 - \rho^2 e^{-2\gamma l}}$. Ce terme tient compte des réflexions multiples à l'intérieur du blindage. Quand l'atténuation des champs à l'intérieur du blindage est

importante, le terme $\frac{1}{1-\rho^2 e^{-2\gamma l}}$ est négligeable. Par contre quand l'atténuation des champs est peu importante, ce terme vient diminuer l'efficacité de Blindage résultante. L'expression de l'atténuation de blindage peut se simplifier en considérant

L'expression suivante : $(1 + \rho)(1 - \rho) = \frac{Z_W Z_S}{(Z_W + Z_S)^2}$

$$S_E = 20\text{Log}\left(\frac{E_i}{E_t}\right) = 20\text{Log}\left(\frac{(Z_W + Z_S)^2}{Z_W Z_S}\right) + 20\text{Log}(e^{\gamma l}) + 20\text{Log}(1 - \rho^2 e^{-2\gamma l}) \quad (5)$$

Le 1er terme de l'expression ci-dessus caractérise la réflexion (R) sur la face d'entrée et de sortie du blindage. Le 2ème terme correspond à l'atténuation (A) des champs à l'intérieur du blindage et enfin le dernier terme prend en compte les réflexions multiples (B) à l'intérieur du blindage. Sur la 1ère interface du blindage, une partie est réfléchi. La part de ce qui est réfléchi dépend de la valeur de l'impédance d'onde par rapport à l'impédance du blindage. En général, l'impédance d'onde Z_W est bien plus élevée que l'impédance du blindage Z_S . On en déduit donc que peu de champ électrique sera transmis dans l'intérieur du blindage.

II.11 Calcule analytique de l'efficacité de blindage

Dans cette partie, nous allons calculer analytiquement les coefficients d'un blindage homogènes en utilisant le logiciel scientifique MATLAB. La solution analytique de l'équation de blindage $SE=A+R+B$ permettra par la suite de mettre en évidence l'influence de la conductivité électrique et la perméabilité magnétique sur le coefficient de blindage totale dans les deux cas de champs démission (champs électrique et champs magnétique).

pour notre calcule nous allons fixé la fréquence de la source rayonnante a une valeur de 1MHz.

e : l'épaisseur du blindage pour les deux cas de matériaux cuivre et Aluminium elle est de tel façon qu'elle soit supérieur au 1/4 de la longueur de l'onde choisie.

Afin de voir l'influence de la conductivité et la perméabilité nous allons faire varie leurs valeur de manière arbitraire pour les deux matériaux.

Le tableau ci dessous nous donne les valeurs de référence de la conductivité et de la perméabilité du Cuivre et de la l'Aluminium

Matériau	Conductivité relative $\sigma_r = \frac{\sigma_{mat}}{5.82 \times 10^{27}}$	Perméabilité relative μ_r
Aluminium	0.4	1
Cuivre	1	1

Tableau II-1 : Valeurs de conductivité et de perméabilité relatives du cuivre et de l'aluminium

II.11.1 Champ électrique

La contribution des différents coefficients de blindage par rapport au champ électrique est tracée sur la figure II-3. Les calculs ont été effectués pour une plaque homogène de 1mm d'épaisseur, de perméabilité magnétique relative $\mu_r = 1$ et d'une de conductivité relative σ_r variables de variable 0 jusque à 8 émis par un champ électrique.

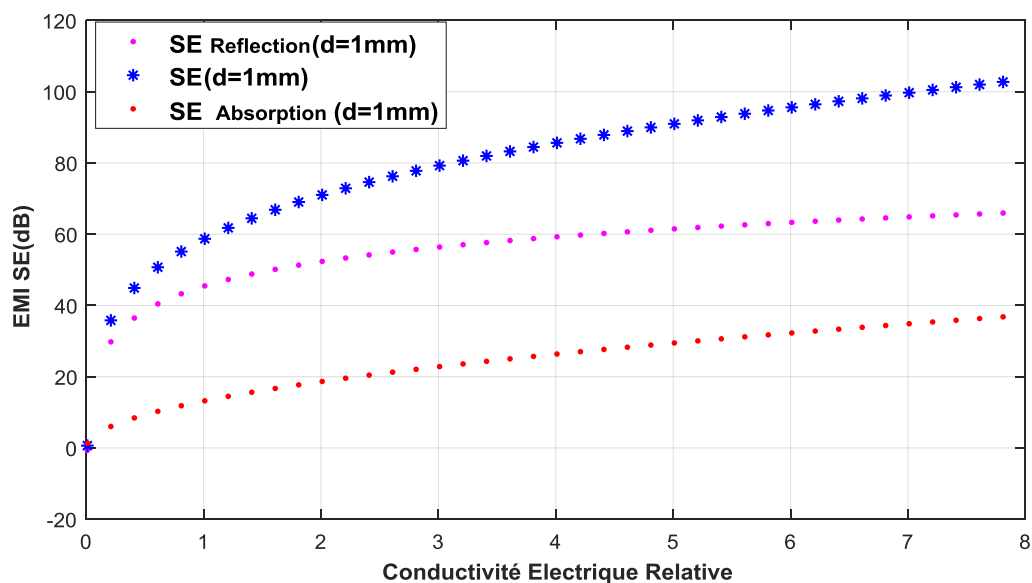


Figure II-3– Coefficients de blindage électrique pour une plaques homogènes, de 1mm d'épaisseur, avec σ_r variable, $\mu_r = 1$.

On remarque sur Figure II-3 que l'augmentation de la valeur de la conductivité électrique du matériau influe sur l'augmentation des valeurs d'efficacité de blindage

électrique, Cela nous permet de conclure que l'efficacité du blindage électrique dépend et varie proportionnellement avec la conductivité électrique du matériau.

II.11.2 Champ magnétique

La contribution des différents coefficients de blindage par rapport au champ magnétique sont tracés sur la figure II-4. Les calculs ont été effectués pour une plaque homogène de 1mm d'épaisseur, de conductivité relative fixe $\sigma_r = 1$ et d'une perméabilité magnétique relative μ_r variables de 0 jusque à 8 afin de pouvoir observer l'effet de cette dernier sur l'efficacité de blindage magnétique.

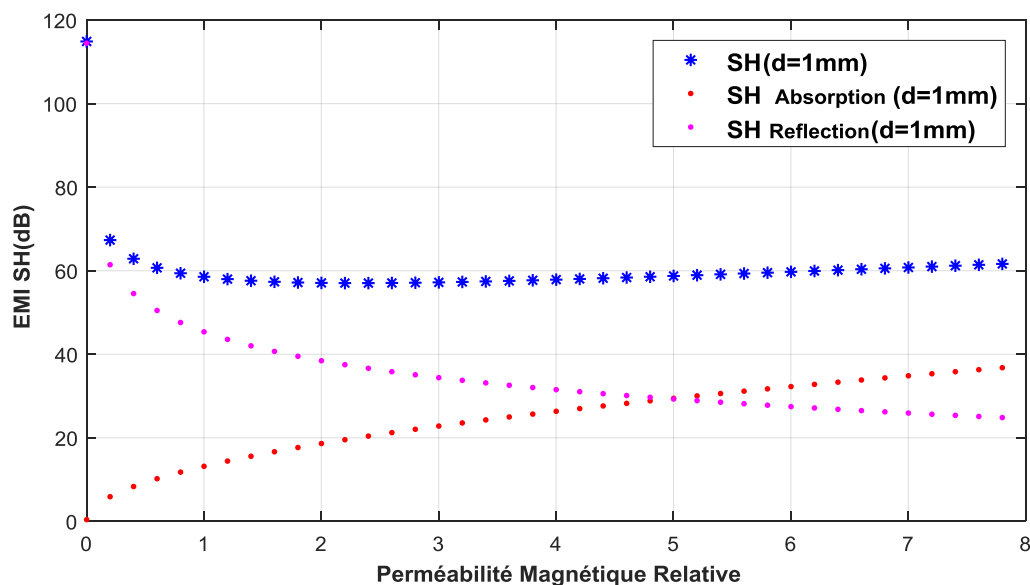


Figure II-4 – Coefficients de blindage magnétique d'une plaques homogènes, de 1mm d'épaisseur, avec (μ_r) variable, $\sigma_r = 1$

On remarque sur la figure I1.4 que le coefficient d'absorption du champ magnétique augmente proportionnellement avec les valeurs de la perméabilité magnétique. Ainsi on remarque que la perméabilité magnétique sont influence sur l'efficacité du blindage magnétique est relativement faible

II.12 Conclusion

Dans cette partie nous avons abordé d'une façon générale la théorie du blindage électromagnétique. Dans le cas de notre étude théorique et par la suite expérimentale, le blindage est considéré comme un plan et nous considérons toujours l'incidence de l'onde électromagnétique normale au blindage.

.Les résultats de nos calculs analytiques nous ont permis de conclure que l'efficacité de blindage électrique et magnétique dépendent proportionnellement des valeurs de conductivité électrique et de perméabilité magnétique du matériau. Cependant, nous allons nous appuyer sur ces conclusions afin de mieux analyser et d'expliquer nos résultats expérimentaux

Afin de mener à bien l'étude des propriétés de blindage électromagnétique en fonction du taux de déformation plastique, nous avons mis en place un protocole expérimental, articulé selon trois grands volets :

- A- Préparation des échantillons selon un protocole préalablement définie en taux de déformation.
- B- Caractérisation des matériaux par fluorescence X et par diffraction des rayons X.
- C- Mesure de la perméabilité électromagnétique des matériaux utilisés en fonction du taux de déformation.

III.1 Echantillonnage.

III.1.1 Matériaux utilisés.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont le cuivre et l'aluminium commerciaux à 99.9% de pureté, livrés sous forme de tôle de $(2000 * 1000) \text{ mm}^2$ et de 4 mm d'épaisseur, fabriqués par laminage. L'historique mécanique et la technique de mise en forme de ces deux matériaux sont inconnus.

III.1.2. Préparation des échantillons.

III.1.2.1 Echantillons pour la caractérisation de la déformation plastique

Comme c'est prévue de réaliser la déformation plastique par traction en utilisant la machine de traction du laboratoire de mécanique de l'université de LAGHOUAT, dont elle a l'avantage de nous permet de réaliser la traction à une vitesse de déformation constante et contrôlable en temps réel ainsi que la mesure de la contrainte appliquée par une cellule de force de 100KN. La déformation est mesurée par le déplacement de la traverse mobile par rapport à celle fixe à l'aide de capteurs de la position très sensible (sensibilité de l'ordre de micromètre). La contrainte majeure, qui nous oblige a réalisé nos éprouvettes hors norme pour la traction c'est la géométrie de la machine de mesure des propriétés électromagnétiques (chambre TEM), qui exige des plaques de 70x70 mm de surface. Afin de surmonter cette contrainte (géométrie de l'éprouvette) et d'avoir des échantillons, dans la zone utile, déformés plastiquement d'une manière plus au moins homogène, on a opté à la réalisation des éprouvettes hors norme à la traction tout en préservant le maximum de l'homogénéité de déformation plastique dans la zone utile des échantillons. Pour cela on a confectionné des mord adaptés à nos éprouvettes, afin de réaliser une opération de traction, qui nous assure une répartition du champ de contrainte appliqué le plus possible homogène, tout en évitant le

phénomène de glissement des têtes des échantillons. Dans cette perspective les éprouvettes sont confectionnées selon les cotations présentées par la figure (Figure III-2). Le reste des paramètres de la traction tels que la vitesse de déformation, mesure de déformation et acquisition des données sont donnés par le dispositif de la machine de traction piloter par un outil informatisé qui assure une précision acceptable.

III.1.2.2 Echantillon pour l'essai TEM

Suite à l'exigence de la géométrie de la chambre de mesure de la TEM, la forme des échantillons doivent être confectionnés sous forme de plaque de 70x70 mm avec une épaisseur maximum 01 mm ; cette exigence des mesures de la perméabilité électromagnétique dans la cellule TEM, nous oblige de confectionner des échantillons destinés aux essais de traction qui doivent avoir cette forme dans la partie utile des éprouvettes de traction et dont la déformation plastique doit être au maximum homogène, afin d'avoir des mesures de la perméabilité magnétique significative.

Les échantillons destinés aux essais de traction sont découpés grossièrement par la scie à métaux sous forme plaques de 150x100x04 mm³. Ensuite par une opération d'usinage par fraisage, l'épaisseur finale est réduite à 1mm. Cette opération a été réalisé avec un très grand soin, afin d'éviter les déformations plastiques localisées en surface et en profondeur. De ce fait, une fraiseuse à acier rapide a été utilisé sous une vitesse de rotation plus en moins rapide (800~ 1000 tours/min) et un pas de profondeur de 0.01 mm. La réduction de l'épaisseur du matériau se fait par arrachement de très fine couche (méthode très proche à l'abrasion). A la fin de l'opération de fraisage, l'état de surface sous observation par une lentille loupe de grossissement 05 fois (x5), présente état de surface écaillé. Pour surmonter ce problème, une phase de polissage s'avère imposée, la finition de l'état de surface a été réalisée par un polissage, sous un jet d'eau, avec le papier abrasif EMRI de granulométries 180, 400 et 1000. Le maintien des plaques, sur la table de la fraiseuse, a été effectué avec une très grande précaution, tout en assurant une très bonne planéité de la plaque vis-à-vis la table de la fraiseuse et une bonne fixation de la plaque par les bords des têtes, afin d'éviter la déformation plastique plaques par les étaux de la table de la fraiseuse.

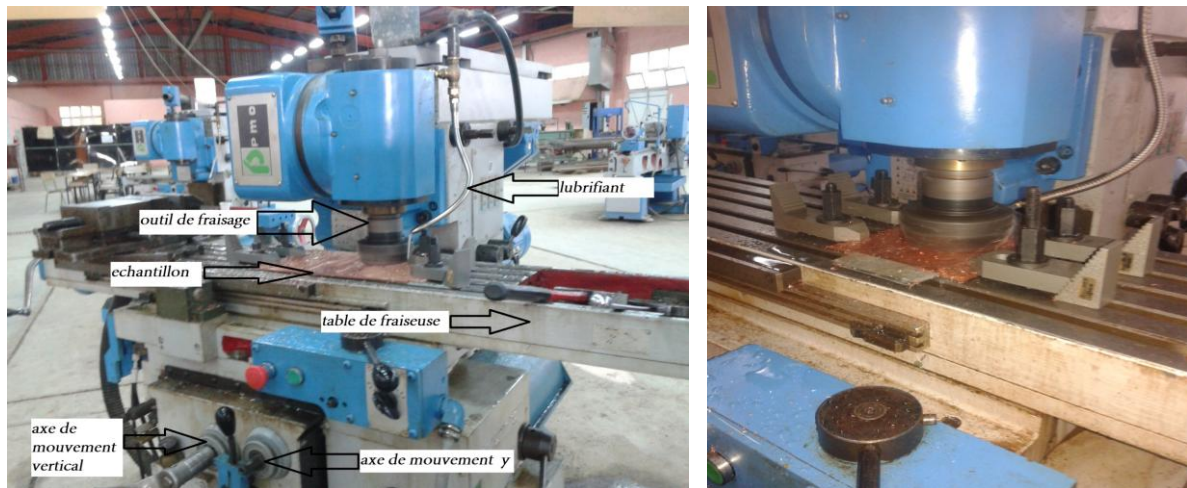


Figure III-1. Fraiseuse universelle : usinage des échantillons.

III.1.3 Essais de traction.

Les essais de déformation plastique de traction uni-axiale ont été réalisés au moyen d'une machine de traction MTS dans le laboratoire de mécanique. Ce type de machine assure une très grande précision de vitesse de déformation ainsi que une très bonne sensibilité au déplacement du mord mobile et elle est dotée d'une cellule de force de 100 KN adapté aux matériaux métalliques et leurs alliages.



Figure III-2. Essais de traction avec une machine MTS (laboratoire de génie mécanique université de LAGHOUAT).

L'ensemble des échantillons ont été groupés en trois (03) los de quatre (04) éprouvettes. Chaque los a été déformé plastiquement par un taux imposé à savoir 2%, 3% et 4%. L'ensemble des résultats de la déformation est collecté et stocké dans un système informatisé associé à la machine de traction, qui nous permet d'exploiter et analyser l'historique de la déformation pas par pas.

Après l'opération de déformation plastique, les échantillons sont découpés soigneusement de façon à garder que les parties utiles ($70 * 70 * 1$) mm^3 dont elles ont subies une déformation plastique plus au moins homogène et qui seront par la suite utilisées pour les mesures de la perméabilité magnétique dans la chambre TEM.

II.1.4. Traitements thermiques.

Vue l'historique de la mise en forme des plaques de l'aluminium et le cuivre est inconnue (condition de laminage) et afin de réduire les contraintes internes qui sont formées par laminage lors de la fabrication des tôles ainsi que tout autre défaut de structure surfacique du aux opérations de fraisage, un traitement thermique de relaxation des contraintes internes (réduction des dislocations au maximum) s'avère imposé. La température du traitement thermique doit être en dessous de la température de fusion des deux matériaux ($C_u: T_f = 1085^{\circ}C - Al: T_f = 660^{\circ}C$), donc environ $0.7T_f$. Le temps de maintien des échantillons dans le four est d'une heure; cette durée de maintien était choisie relativement courte dans le but d'éviter le grossissement des grains. L'apport énergétique lors d'un traitement thermique conduit forcément la microstructure vers un équilibre thermodynamique ; cela par dissipation des contraintes internes introduites par déformation plastique et/ou frottement du réseau cristallin lors d'un refroidissement plus au moins rapide du matériau. Pour éviter ce dernier phénomène, les échantillons sont laissées dans le four éteint pour un refroidissement très long, afin d'éviter toute trempe à l'air qui conduit à un état hors équilibre thermodynamique.

III.2. Caractérisations physiques.

III.2.1 Fluorescences X.

Comme nos matériaux ces des produits commerciaux à haute pureté, une opération de vérifier de la pureté de nos échantillons a été réalisée par des tests de fluorescences aux rayons X sur les deux matériaux d'étudiés.

La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une méthode d'analyse chimique utilisée pour la détection et la quantification des éléments présents dans des échantillons liquides, solides ou en poudre. Elle permet de doser tous les éléments dont le numéro atomique « Z » est supérieur ou égal à 13. Elle est applicable dans un large intervalle de concentrations, de 100% jusqu'à quelques parties par million (ppm) [13].

La fluorescence X est une émission secondaire de rayons X caractéristique des éléments atomiques qui composent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique.

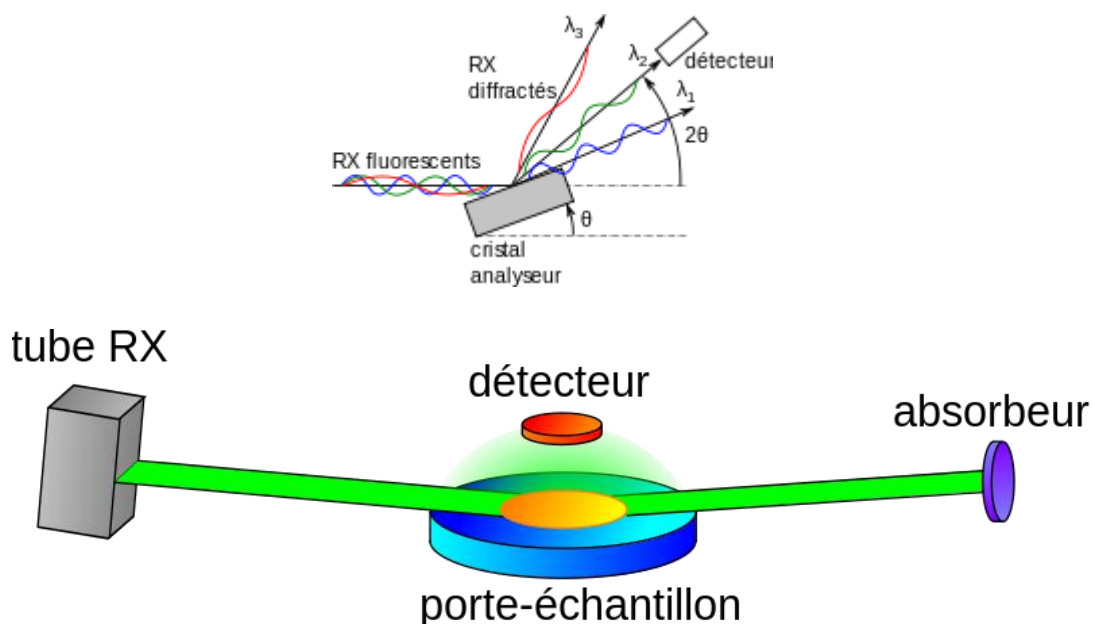


Figure III-3: principe technique de fluorescence x

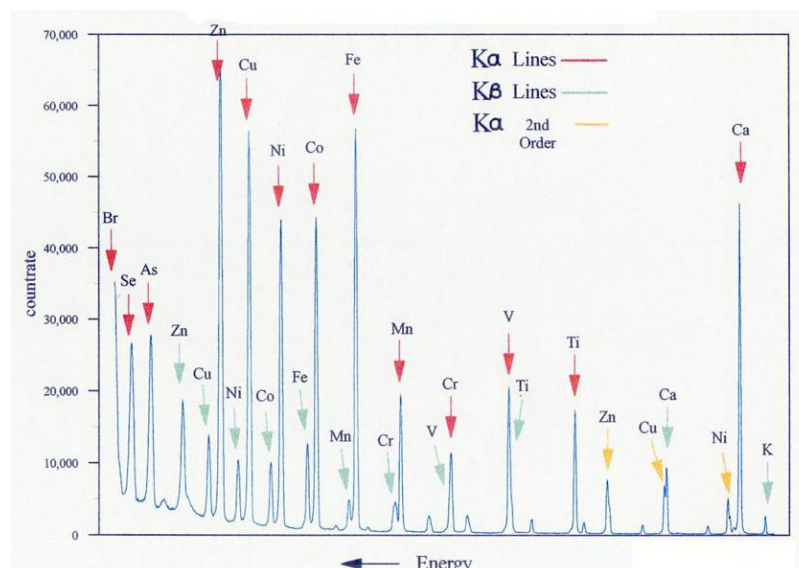


Figure III-4 : Diagramme des concentrations des composés chimiques

III.2.2 Diffraction des rayons X.

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse fondée sur l'analyse des angles de BRAGG des plans réflecteurs des matériaux cristallins. La diffraction des rayons X est une diffusion élastique, c'est-à-dire sans perte d'énergie des photons (longueurs d'onde inchangées), qui donne lieu à des interférences d'autant plus marquées que la matière est ordonnée. Pour les matériaux non cristallins, on parle plutôt de diffusion.

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontrant un cristal, est renvoyé dans des directions déterminées par la longueur d'onde des rayons X et par les dimensions et l'orientation du réseau cristallin. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons diffractés, il est possible d'obtenir les dimensions de la maille cristalline, les symétries de la structure cristalline (groupe d'espace), la position moyenne des atomes du cristal formant le motif cristallin peut être déterminée ainsi que la nature de ces atomes et d'autres informations structurales.

L'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière donne naissance à une émission dans toutes les directions d'un rayonnement de même longueur d'onde et de phase cohérente. Ce phénomène de diffusion conduit à des ondes d'amplitude très faible dans le cas de la diffusion par un électron ou un atome. En revanche, la diffusion par la matière, c'est-à-dire un ensemble d'atomes, entraîne une interférence des ondes cohérentes diffusées par

chaque atome. Cette onde, dite diffractée, dépend de la structure cristalline atomique (réseau atomique de la matière). Les directions pour les quelles les ondes émises sont en phase sont régies par les conditions de LAUE [14].

Dans le cas d'échantillons en poudres formés de très petits cristaux orientés aléatoirement, la direction du faisceau diffracté est donnée par la loi de BRAGG. Celle-ci peut être déduite des conditions de LAUE, mais également être vérifiée par analogie à la réflexion en considérant une famille de plans inter réticulaires, désignés par les indices de MILLER (hkl).



Figure III-5 : diffractomètre (laboratoire de physique université de LAGHOUAT)

III.3. Caractérisation électrique.

III.3.1 Etude de la cellule DTEM

Dans le premier chapitre, nous avons cité quelques techniques qui nous permettent la mesure de l'efficacité de blindage électromagnétique. Parmi ces techniques il y a la mesure par la cellule DTEM. Nous consacrons ce présent chapitre à l'étude des caractéristiques fondamentale de cette cellule, soient essentiellement l'uniformité de champ, gamme fréquentielle d'utilisation et mode de propagation.

Après une brève description des cellules TEM et DTEM, nous présenterons des simulations électromagnétiques effectuées sous le logiciel « CST microwave studio » afin de caractériser le champ électromagnétique généré à l'intérieur de ces cellules.

III.3 .2 Généralités sur les cellules TEM

III.3 .2.1 Définition de la cellule TEM

La cellule TEM est une enceinte fermée, elle repose sur le principe d'une ligne de transmission tri-plaque [15] constituée de deux plans de masse intercalés par un conducteur central qu'on désigne habituellement par le terme anglo-saxon « septum ». Dans la cellule TEM se propage une onde électromagnétique traverse (mode TEM), à condition que la longueur d'onde soit inférieure à la dimension transversale de la cellule [16] .L'utilisation de la cellule TEM est limitée par la fréquence de coupure de ce mode. Cette dernière est fixée par les dimensions de la cellule qui sont choisies de façon à permettre uniquement la génération d'un mode TEM.

III.3.2.2 Cellule DTEM

La cellule DTEM (dual TEM cell) est composée de deux cellules TEM couplées à travers une ouverture dans une paroi commune (Figure II-6), une de ces cellules sert à l'émission du champ électromagnétique et l'autre pour la réception. La théorie de la petite ouverture est souvent utilisée pour expliquer le couplage entre les deux cellules .En général l'ouverture de couplage prend une forme circulaire ou carrée.

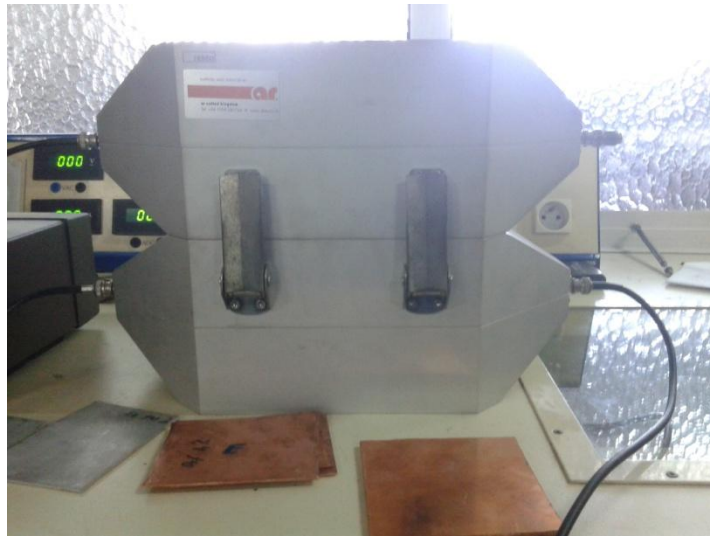


Figure III-6. Cellule DTEM

Lorsque la cellule émettrice est excitée, une partie du champ électromagnétique est transmise vers la cellule de réception à travers l'ouverture. Le champ transmis se traduit par l'apparition des tensions au niveau des connecteurs de la cellule de réception.

Quand nous posons un élément sous test sur l'ouverture, le couplage des deux cellules est réduit, cette réduction donne une mesure directe de l'efficacité de blindage.

III.3.2.3 Présentation du banc de mesure de l'efficacité de blindage

La figure III-7 représente le dispositif expérimental qui permet la mesure de l'efficacité de blindage. Ce dispositif regroupe cinq instruments : un générateur de signaux radio fréquence, un amplificateur, une cellule DTEM, une jonction hybride et un analyseur de spectre.

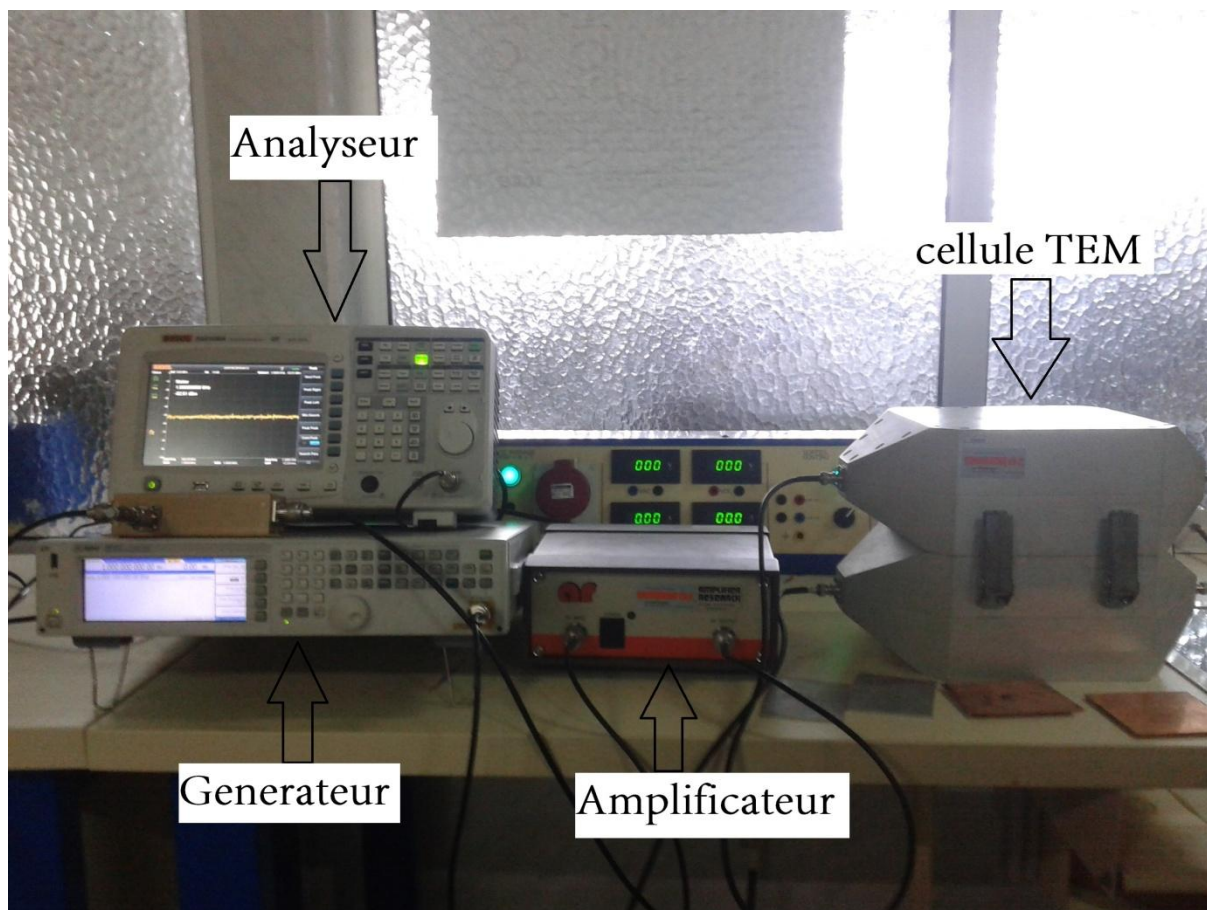


Figure III-7. Banc de mesure de l'efficacité de blindage.

Le générateur de marque « AGILENT N5151A » permet de générer des signaux RF de puissance allant de -110dBm jusqu'à 17dBm dans une gamme de fréquences allant de 100KHz à 1GHz.

Pour amplifier le signal à la sortie de générateur, notre banc possède un amplificateur de marque « ARKINGDOM-1W1000B », il amplifie des signaux avec un gain de 1000 dans la gamme de fréquences [1MHz-1GHz]. Il supporte à son entrée une puissance maximale de 1mW (0dBm) d'où la puissance de sortie maximale 1W (30 dBm).

La cellule DTEM est de marque « TESEO-UM075AA », selon sa documentation technique, la fréquence maximale d'utilisation est 1GHz (Annexe C).

Pour la mesure des signaux, notre banc est équipé d'un analyseur de spectre de marque « RIGOL DSA1030A » de gamme de fréquences [9KHz-3GHz]. Il possède trois ports : un

port VGA pour l'affichage, et deux ports USB et LAN pour la communication avec un PC. Nous pouvons également contrôler cet instrument à travers les instructions SCPI.

III.3 .2.4 La jonction hybride

La jonction hybride est de marque « MA-COM-H9 » de gamme de fréquences [2MHz-1GHz]. Les deux signaux de sortie de la cellule DTEM sont introduits dans la jonction hybride pour produire la somme ou la différence des signaux à la sortie .

III.3.2.5 Fonctionnement du banc de mesure

Pour faire une mesure de l'efficacité de blindage d'un échantillon, il faut pour différentes valeurs de fréquence suivre les étapes ci-dessous avec et sans présence de l'échantillon.

- Générer un signal RF.
- Amplifier le signal.
- Injecter le signal à l'entrée de la cellule DTEM (les deux sorties de la cellule étant connectées aux entrées de la jonction hybride).
- Extraire et enregistrer la puissance de la fréquence du signal reçu à la sortie de la jonction hybride.

Dans notre travail nous mesurons l'efficacité du blindage au passage du champ électrique dans la gamme de fréquence [1MHz-1 GHz], cette gamme est balayée automatiquement avec un pas réduit. Une interface de commande permet de gérer les différents instruments du banc, d'acquérir des mesures, les traiter, les enregistrer afin d'exploiter les résultats

Dans ce chapitre on présente les différents résultats obtenus, à savoir les résultats de la fluorescence des rayons X, la diffraction des rayons X (DRX), ceux de la traction unidirectionnelle, ceux de la chambre DTEM et enfin on termine par la discussion des résultats tout en mettant en exergue la corrélation entre le taux de déformation plastique et la variation de l'immunité électromagnétique et la conductivité électrique.

IV.1. Fluorescence des rayons X:

L'opération de l'analyse par fluorescence des rayons X consiste à mettre en évidence les éléments chimiques ainsi que leurs taux dans les matériaux. On a réalisé des analyses de fluorescence des rayons X sur les deux matériaux (Al et Cu) après traitement thermique afin de vérifier leur composition chimique et de s'assurer de la concentration chimique des matériaux utilisés considérés comme pur.

La Figure IV.1 (A et B) illustrées par la technique capture d'écran (par défaut d'existence de système d'impression), présente les résultats de la fluorescence des RX. On remarque que les deux matériaux analysés ont une concentration de 99.99% que ce soit pour l'Al ou le Cu. Donc nos matériaux utilisés sont de haute pureté commerciale.

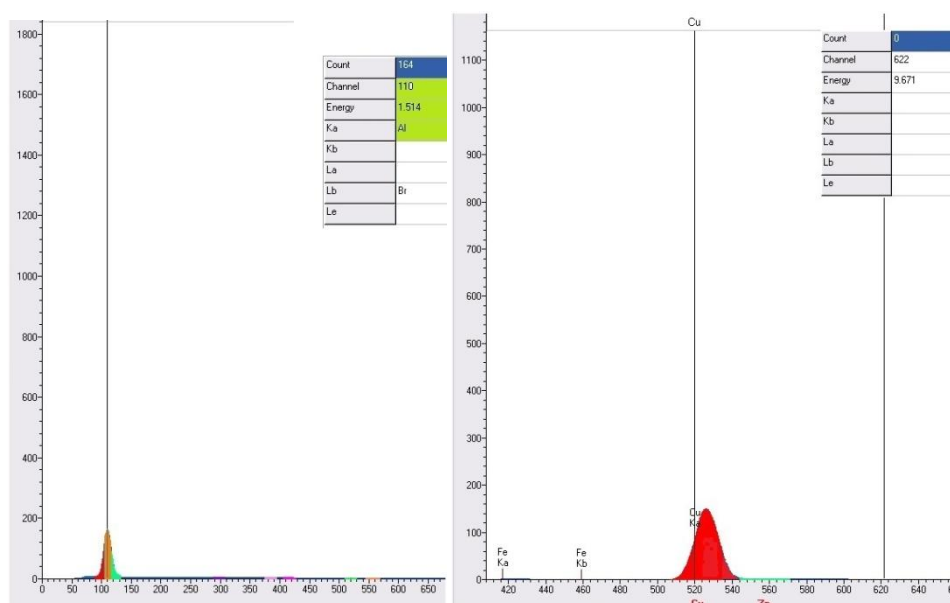


Figure IV.1 Pic de concentration du cuivre et de l'aluminium.

A (gauche) illustrée par capture écran montrant la concentration de l'aluminium (énergie=1.514ev).

B (droite) illustrée par capture écran montrant la concentration du cuivre (énergie=9.671ev)

IV.2 Résultats de la diffraction des rayons X.

Dans cette partie du travail nous avons procédé à l'analyse par diffraction des rayons X, des échantillons de l'aluminium et du cuivre, non traités thermiquement et après traitement thermique. Cette opération a pour but de contrôler l'évolution de la microstructure (présence des phases) de nos matériaux. Les figures (IV.3) (IV.4) montrent bien que les diffractogrammes des RX des échantillons de cuivre avec et sans traités thermiquement. Un balayage de DRX d'angle de 20° jusqu'à 120° sur les deux familles des échantillons (avec et sans traités thermiquement) présentent les mêmes familles des plans réflecteurs ; donc ce qui nous confirme que nos échantillons de cuivre n'ont subi aucun changement de phase après le traitement thermique imposé. Autrement dit, le traitement thermique appliqué au cuivre ne modifie pas la microstructure. Par contre d'après la théorie de la mobilité des dislocations, nos échantillons, après traitement thermique, vont subir une relaxation mécanique par dissipation des contraintes internes.

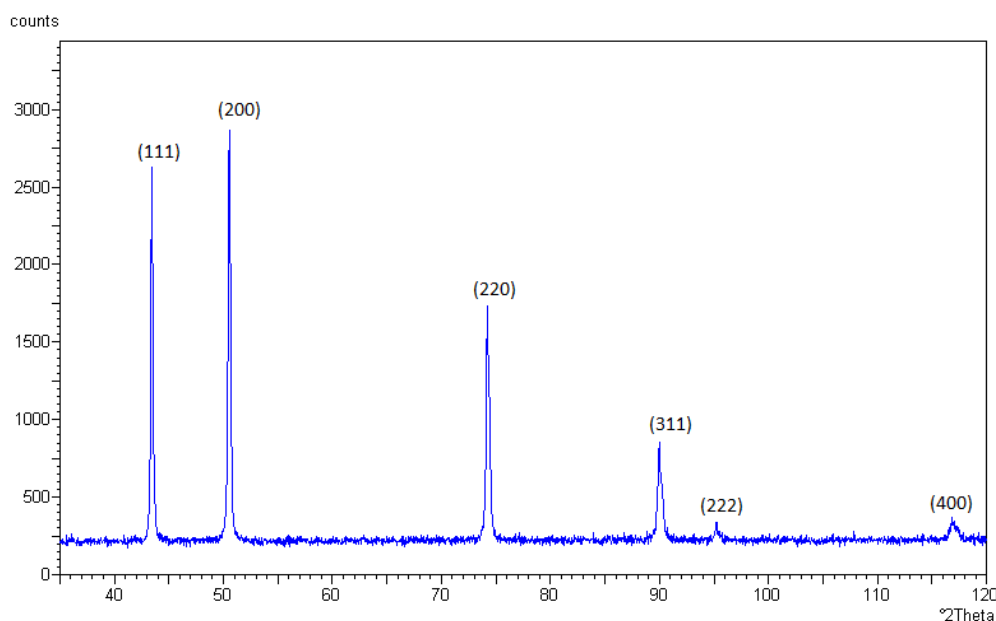


Figure IV-2 : diffractogrammes du cuivre sans recuit

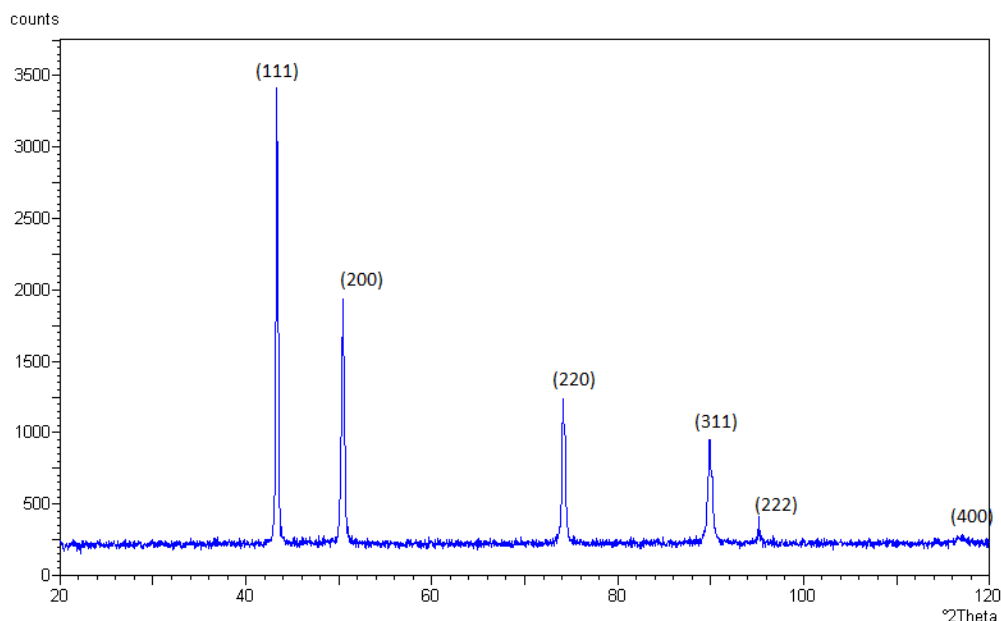


Figure IV-3 : diffractogrammes du cuivre recuit à 850 °C pendant une heure de maintien.

L'analyse des diffractogrammes des rayons X des échantillons d'aluminium sans et avec recuit, présentent une très proche superposabilité avec les même plans réflecteurs. Donc nos échantillons n'ont subi aucun changement de phase suite au traitement thermique imposé. C'est qui veut dire que le recuit appliqué à l'aluminium ne modifie pas la microstructure malgré la présence des traces d'impuretés. Par contre d'après la théorie de la mobilité des dislocations, nos échantillons, après le recuit, vont subir une relaxation mécanique par dissipation des contraintes internes.

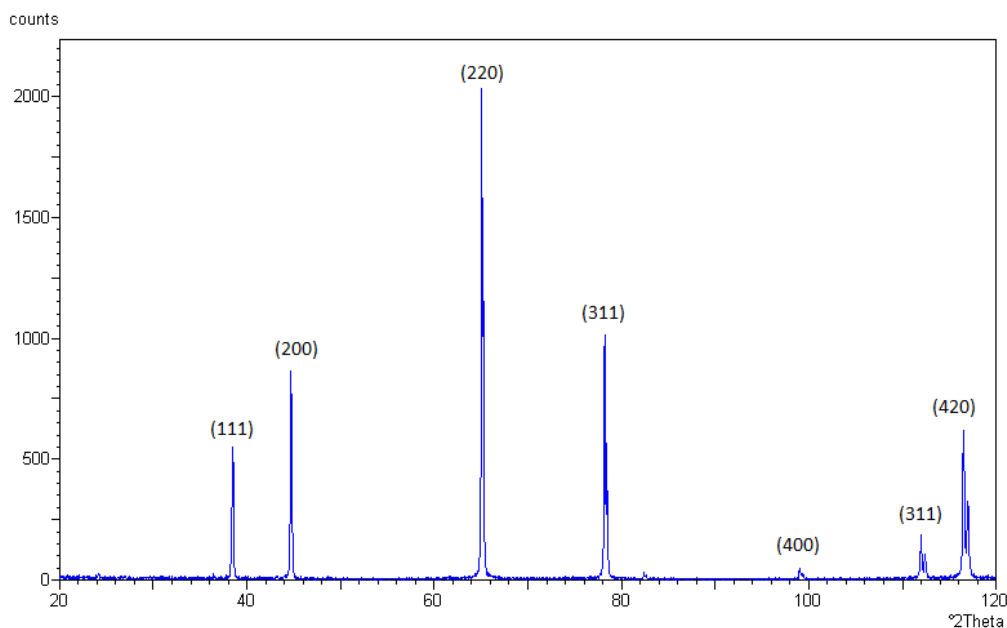


Figure IV-4: diffractogramme de l'aluminium sans recuit.

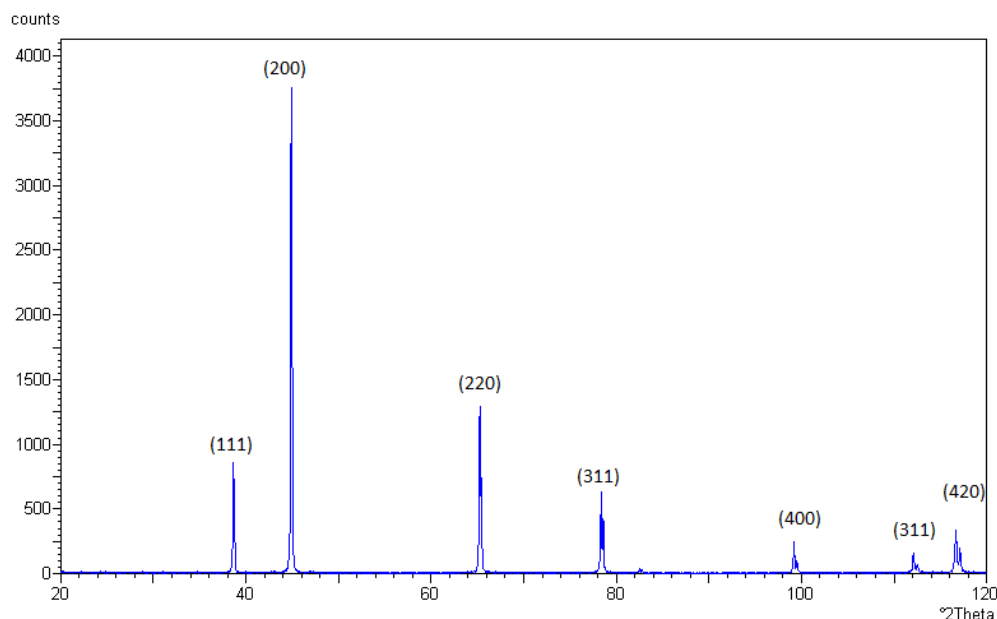


Figure IV-5: diffractogramme de l'aluminium recuit à 650 °C pendant une heure.

IV.3 Traction uni-axiale.

Déformation plastique du cuivre et de l'aluminium.

Les deux matériaux ont subi une caractérisation mécanique selon le protocole expérimental (voir chapitre III).

Par imposition préalable de la vitesse de déformation sur les échantillons de cuivre et d'aluminium ($V_{\text{déf}}$ égale à 10 $\mu\text{m/s}$), nos éprouvettes de traction ne sont pas déformées jusqu'au stade de la striction. Donc on peut dire que l'on est dans le domaine de la déformation plastique homogène (chapitre III).

Dans les figures IV-6 et IV-7, nous avons reporté les résultats de la traction uni-axiale sur les deux matériaux. Nous remarquons que le seuil d'élasticité est inférieur à 1 % pour les deux matériaux alors que le seuil de striction est d'environ 40% pour le cuivre et 4% pour l'aluminium. Nous avons choisi des taux de déformation de 2,3 et 4% pour les mesures de CEM.

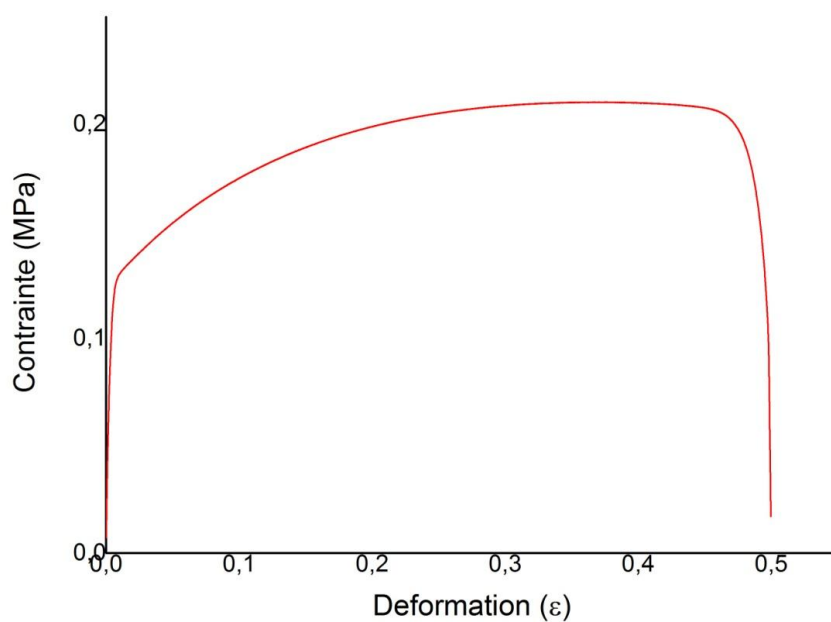


Figure IV-6 : courbe de traction d'éprouvettes de cuivre

La figure IV-6 représente l'évolution de l'éprouvette en traction où la contrainte maximale est de 0.21MPa correspondant à 40% de déformation sur l'éprouvette de cuivre, ce qui nous autorise a déformé nos éprouvettes jusqu'au 4% sans striction.

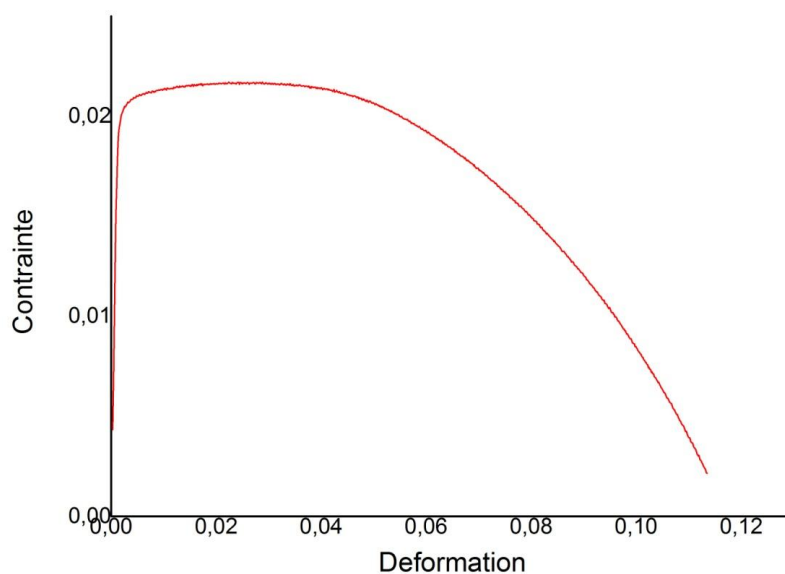


Figure IV-7 : Courbes de traction de l'aluminium.

La figure IV-7 représente la courbe de traction d'éprouvette de l'aluminium où la striction commence à partir d'une valeur supérieure à 4% ; inférieure à cette valeur aucun changement de volume n'est possible.

III.4 Résultats des mesures de l'efficacité électrique du cuivre

Dans ce qui suit nous présentons l'ensemble des résultats de mesure de l'efficacité des éprouvettes de cuivre vis-à-vis au passage du champ électrique, ces mesures sont faites au moyen de la chambre DTEM. Technique de mesure déjà expliquée au chapitre II.

Les mesures obtenues pour l'éprouvette de cuivre, sans aucune déformation plastique, sont présentées par la figure IV-9. On remarque que l'efficacité de blindage commence par une valeur aux alentours de 17 dBm. Cette efficacité s'améliore proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence du champ électrique incident. Cette variation d'efficacité est en corrélation avec l'équation (1) du chapitre II. Plusieurs résonances sont présentes sur le graphe où la première résonance est apparue à une fréquence de 150.10^7 Hz, pour une valeur d'efficacité de 50dBm. Ces résonances représentent physiquement une augmentation de l'efficacité du blindage à ces valeurs de fréquences.

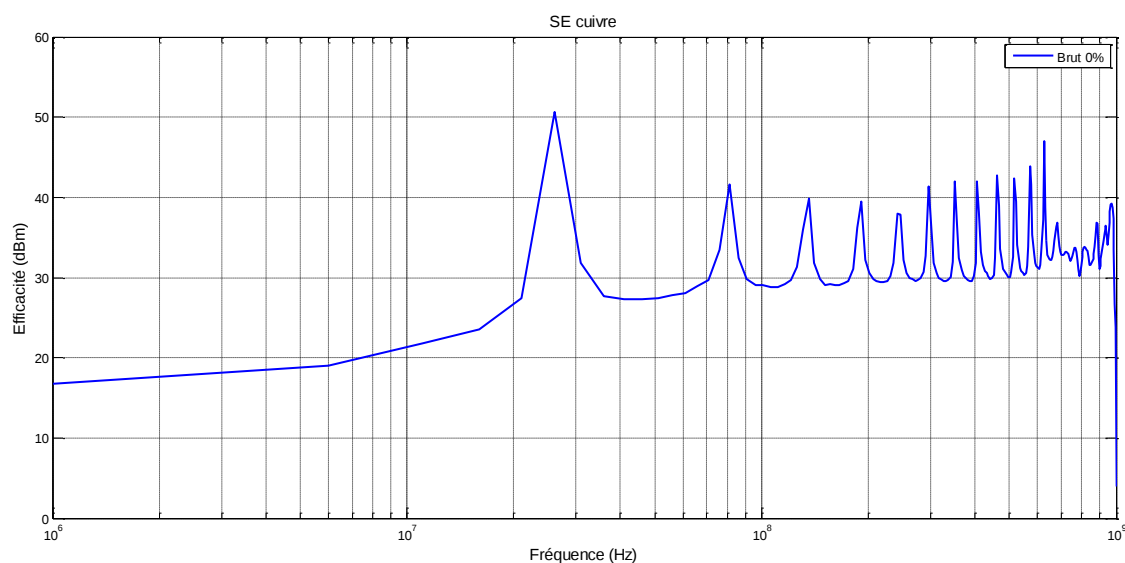


Figure IV-9 variation de l'efficacité du blindage électrique du cuivre sans déformation plastique (0% de déformation).

La figure IV-10 représente la variation de l'efficacité de blindage électrique pour l'éprouvette de cuivre déformée plastiquement à un taux de 2%, cette efficacité débute par une valeur de 15 dBm, ensuite elle s'améliore proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence du champ électrique incident. Plusieurs résonances sont présentes, une première résonance de 35dBm est apparue aussi à une fréquence de 150.10^7 Hz. Toutefois on remarque que cette efficacité démunie considérablement à partir de 750.10^8 Hz.

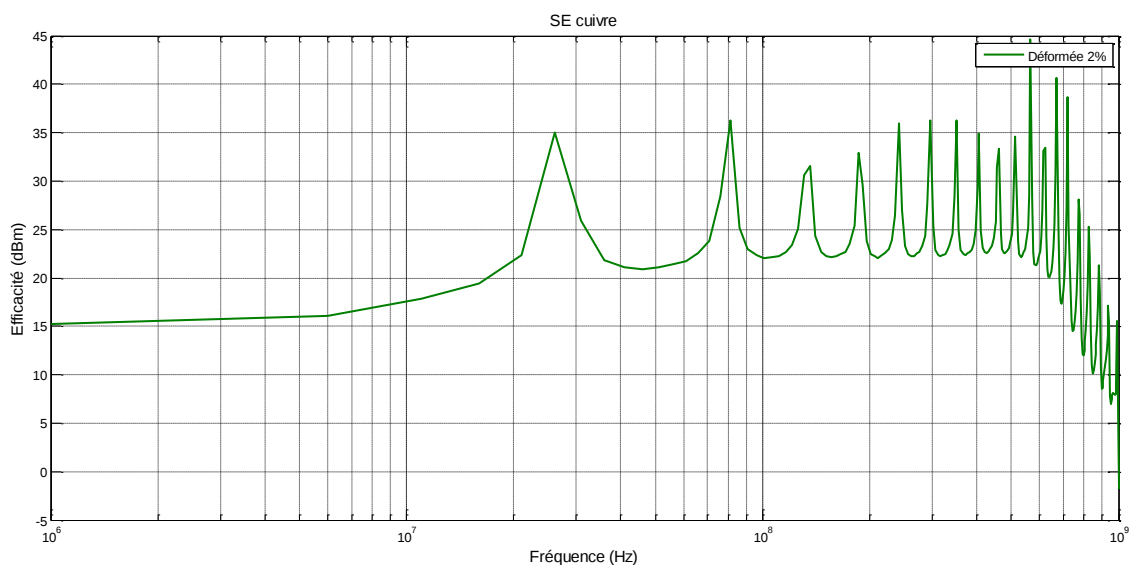


Figure IV-10 variation de l'efficacité du blindage électrique du cuivre déformé à 2%.

Les mesures de l'efficacité de blindage obtenues pour l'éprouvette de cuivre déformé plastiquement à un taux de 3%, sont présentées par la figure IV-11. Cette efficacité commence par une valeur de 17 dBm et s'améliore proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence du champ incident. On remarque aussi la présence de plusieurs résonances où la première a une valeur de 32,5dBm pour une fréquence toujours de 150.10^7 Hz.

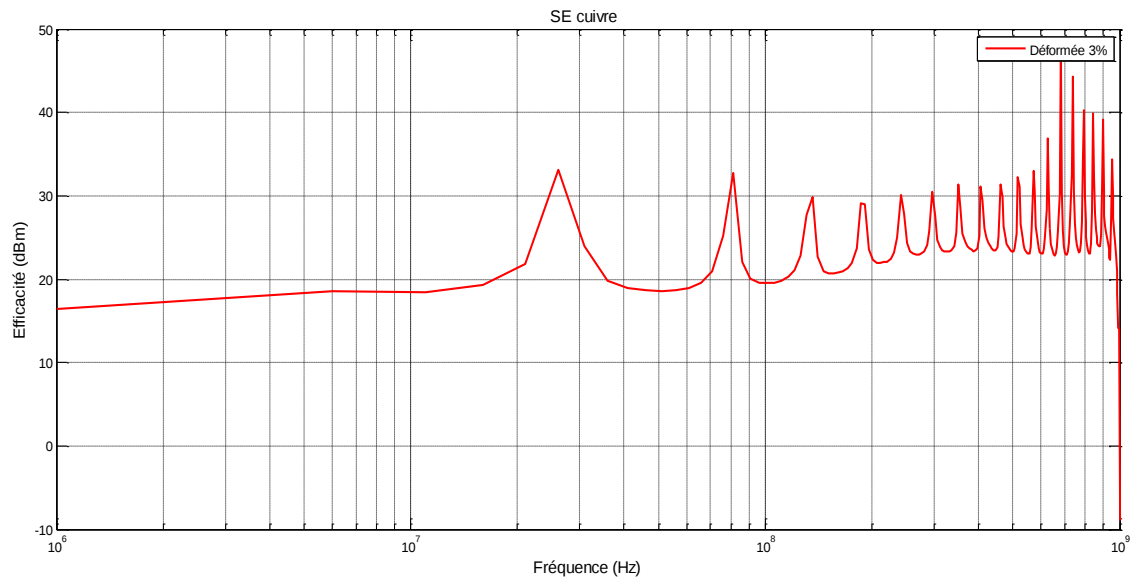


Figure IV-11 variation de l'efficacité du blindage électrique du cuivre de déformé à 3%.

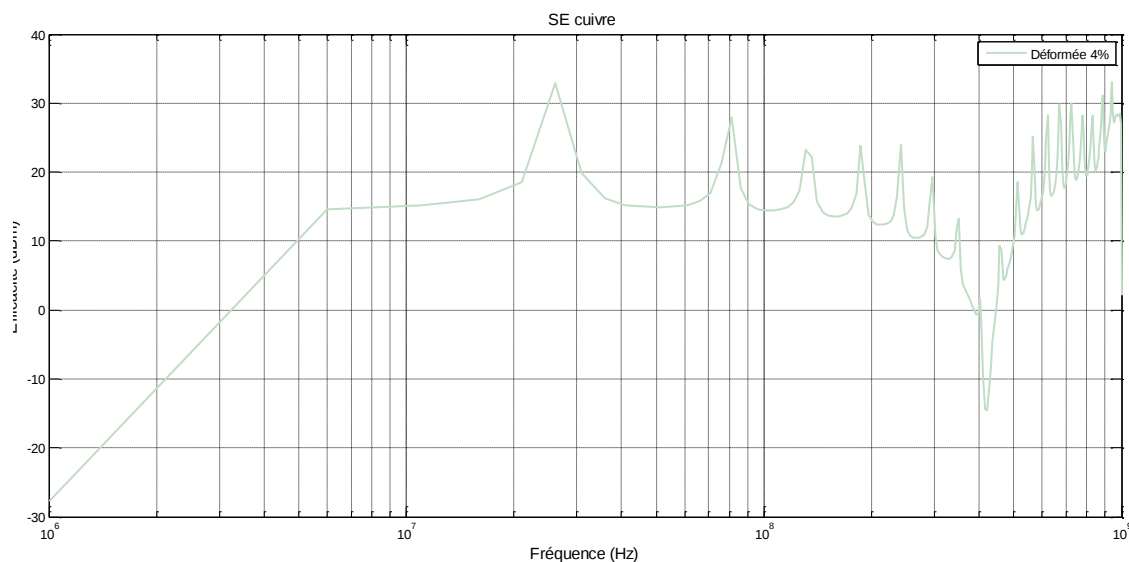


Figure IV-12 : Variation de l'efficacité de blindage électrique du cuivre déformé à 4%.

Enfin dans la figure IV-12, on présente les mesures obtenues pour l'éprouvette de cuivre, déformé à un taux de 4%. On remarque que l'efficacité de blindage commence par une valeur de 17 dBm. Cette efficacité s'améliore toujours proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence du champ électrique incident. Sa variation est aussi en corrélation avec le modèle théorique exprimé par l'équation 1 du Chapitre I. Plusieurs résonances sont présentes sur le graphe, la première résonance de 50dBm est aussi à la fréquence de $150 \cdot 10^7$ Hz.

La comparaison des résultats obtenus à partir des séries de mesures de l'efficacité de blindage par rapport au champ électrique pour les différents éprouvettes de cuivre (Figure III-13) montre que la valeur de l'efficacité du cuivre diminue proportionnellement avec l'augmentation du taux de déformation plastique exercé, ainsi que la première résonance est toujours présente pour la même fréquence avec des valeurs d'efficacités qui diminuent avec l'augmentation du taux de déformation.

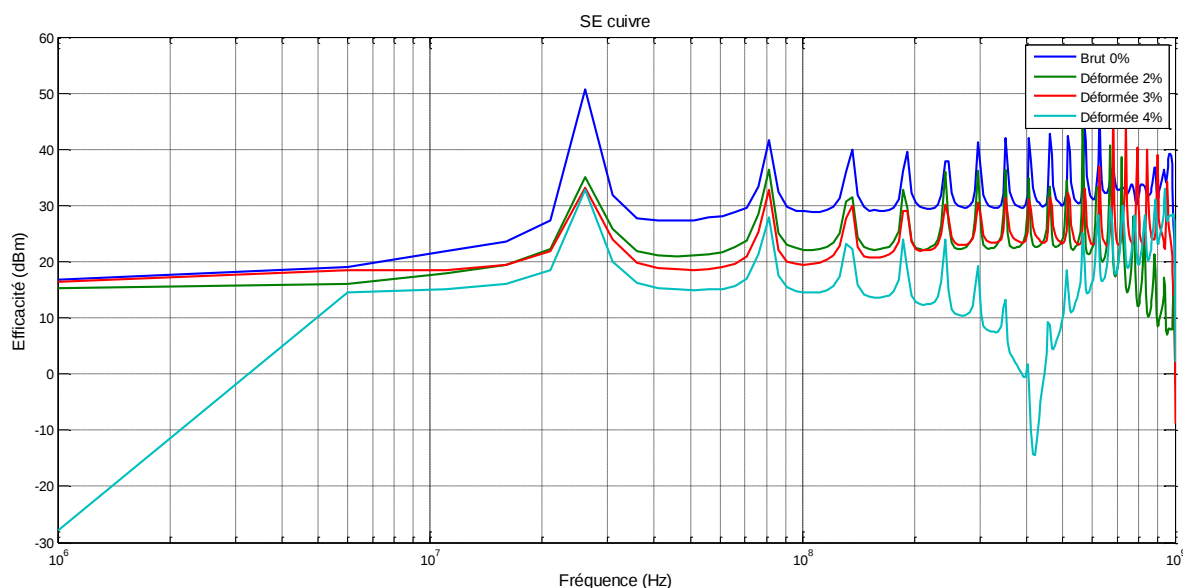


Figure IV-13 variation de l'efficacité de blindage électrique du cuivre

IV.5 Efficacité magnétique de cuivre SH

Pour les mêmes éprouvettes de cuivre précédemment utilisées et dans les mêmes conditions et avec les mêmes moyens de mesures, nous avons effectué une autre série de mesures d'efficacité de blindage magnétique.

Les mesures de blindage magnétique obtenues pour l'éprouvette de cuivre, sans aucune déformation plastique, sont présentées par la figure IV-14. On remarque que l'efficacité de blindage commence par une valeur au alentours de 17 dBm. Cette efficacité s'améliore proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence du champ magnétique incident. Cette variation d'efficacité est en corrélation avec **l'équation (3) du chapitre II**.

Plusieurs résonances sont présentes sur le graphe où la première résonance est apparue à une fréquence de 150.10^7 Hz pour une valeur d'efficacité de **37dBm**. Ces résonances représentent physiquement une augmentation de l'efficacité du blindage à ces valeurs de fréquences.

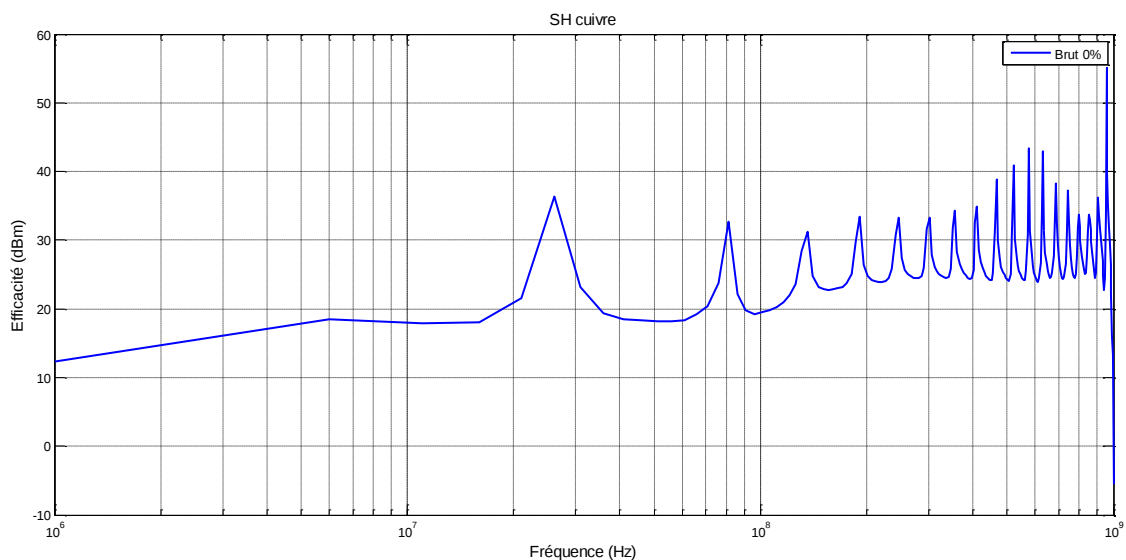


Figure IV-14 variation de l'efficacité de blindage magnétique du cuivre sans déformation en fonction de la fréquence.

On remarque que l'efficacité de blindage magnétique (figure IV-15) de l'éprouvette de cuivre déformé à un taux de 2% augmente aussi en fonction de fréquence jusqu'à 40.10^8 Hz où elle commence à se dégrader, de même sa première résonance est apparue à une fréquence de 150.10^7 Hz, pour une valeur de 48dBm.

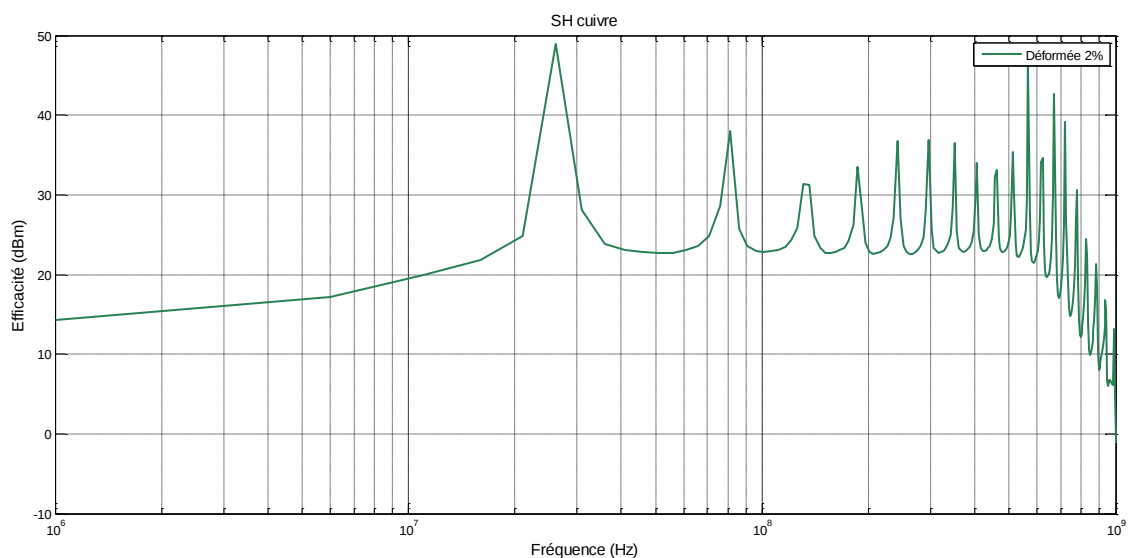


Figure IV-15 variation de l'efficacité de blindage magnétique de cuivre déformé 2% en fonction de fréquence

Pour l'éprouvette de cuivre déformé plastiquement à 3%, les mesures sont représentées dans la figure IV-16. On remarque que l'efficacité de blindage commence par une valeur au alentour 19 dBm. Cette efficacité s'améliore légèrement avec l'augmentation de la fréquence du champ magnétique incident. Plusieurs résonances sont présentes sur le graphe où la première résonance est apparue à une fréquence de $150 \cdot 10^7$ Hz pour une valeur d'efficacité de **40dBm** et la plus grande efficacité est à $90 \cdot 10^8$ Hz pour 59dBm.

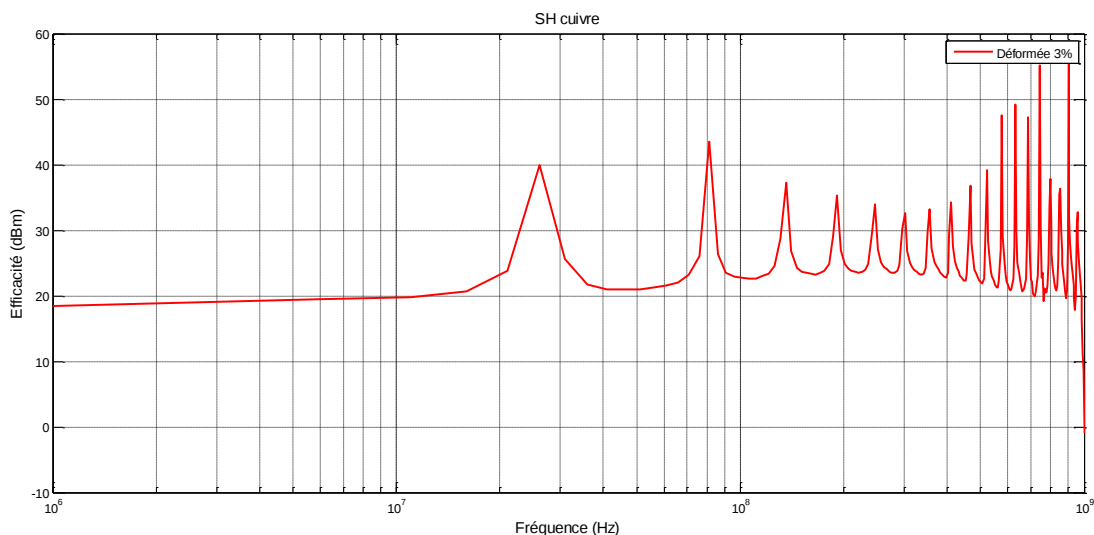


Figure IV-16 Variation de l'efficacité de blindage magnétique du cuivre déformé à 3% en fonction de la fréquence.

Les mesures obtenues pour l'éprouvette de cuivre déformer à un taux de 4% (figure IV-17) montre que l'efficacité de blindage commence par une valeur de 16 dBm et continue à s'améliorer proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence, plusieurs résonances sont présentes, elle commence à $150 \cdot 10^7$ Hz pour une valeur de 43 dBm.

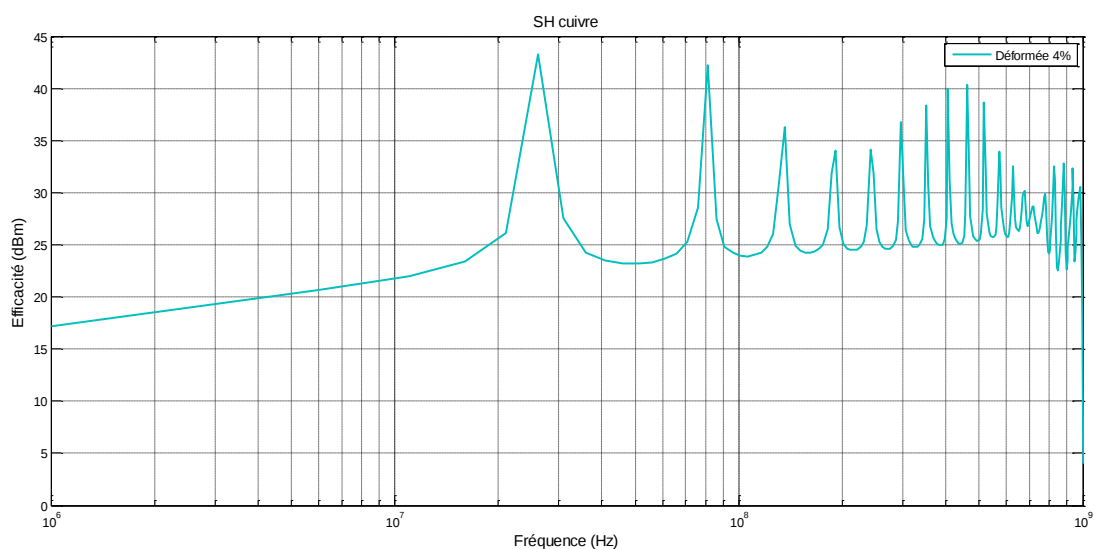


Figure IV-17 Variation de l'efficacité de blindage magnétique du cuivre déformé à 4% en fonction de la fréquence.

La figure IV-18 montre les courbes d'efficacité de blindage de champ magnétique du cuivre on remarque que l'efficacité augmente proportionnellement avec la déformation, la grande valeur de l'efficacité est pour l'éprouvette déformée à 4% et la faible efficacité est pour l'éprouvette brute sans déformation. On remarque que le phénomène de l'efficacité de blindage magnétique en fonction de la déformation plastique varie inversement par rapport à l'efficacité de blindage électrique en fonction de la déformation plastique. On remarque aussi que les résonances sont dans la même bande de fréquences, ceci stipule que la résonance dépend de la fréquence et ne dépend pas du taux de déformation dans les mêmes conditions et pour le même matériau.

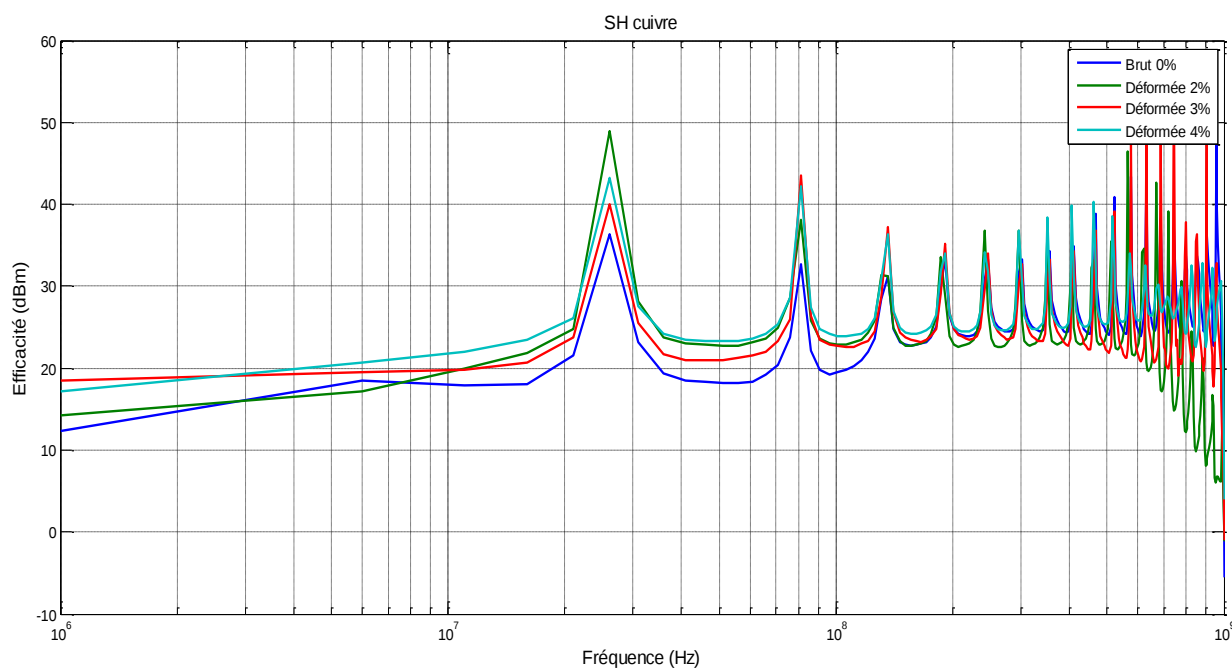


Figure IV-18 Courbes de l'efficacité de blindage magnétique de cuivre 0%,2%,3% et 4%

IV.6 Efficacité électrique de l'aluminium

La figure IV-19 ci-dessous représente les mesures obtenues de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvettes d'aluminium brute sans déformations, on remarque une stabilité de l'efficacité jusqu'à 20×10^8 Hz puis une diminution vers antirésonance vers 4dBm à 50×10^8 Hz et une résonance de 44dBm à 95×10^8 Hz.

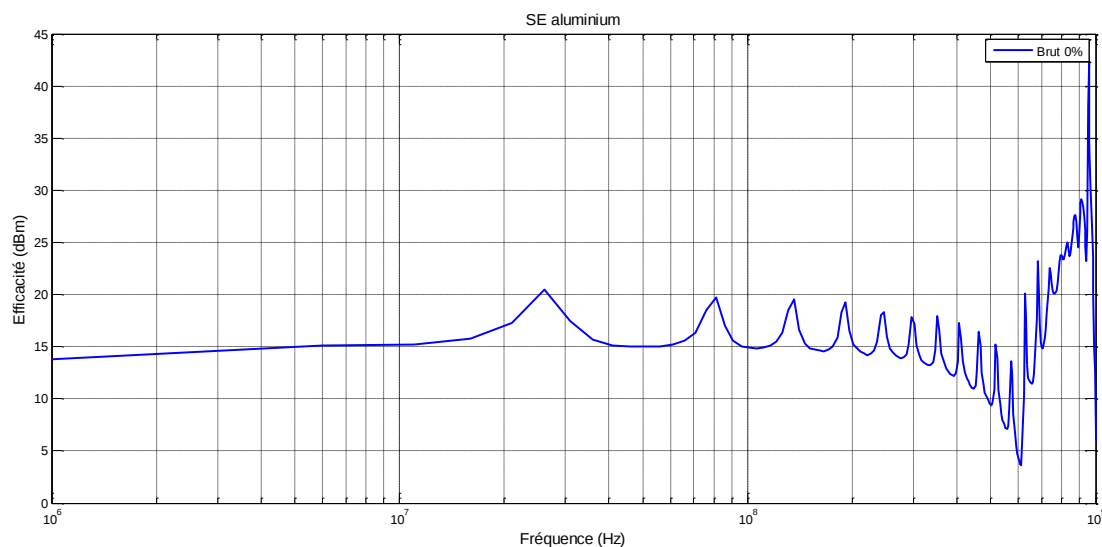


Figure IV-19 Variation de l'efficacité de blindage électrique de l'éprouvette d'aluminium sans déformation en fonction de la fréquence.

La figure IV-20 ci-dessous représente les mesure obtenue d'efficacité de blindage électrique de l'éprouvette d'aluminium déformé 2%, on remarque une augmentation légère puis une stabilité de l'efficacité jusqu'à 40×10^8 Hz puis une antirésonance vers 9dBm à 52×10^8 Hz et une résonance de 35dBm à 75×10^8 Hz.

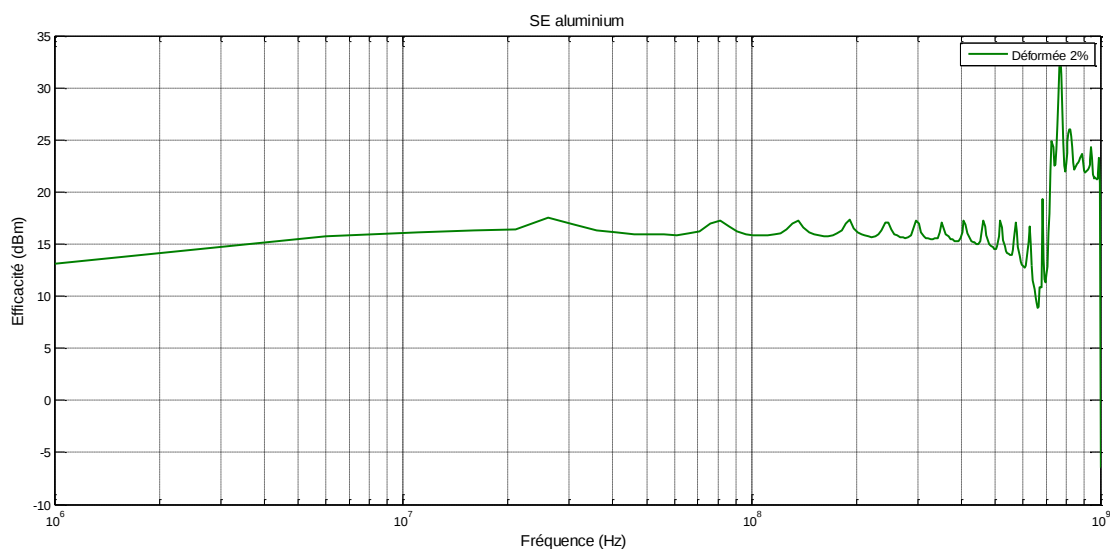


Figure IV-20 Variation de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformé 2% en fonction de la fréquence.

Les mesures obtenues de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformé 3% sont représentées dans la figure IV-21, on remarque une augmentation légère puis une stabilité d'efficacité jusqu'à une fréquence de 40×10^8 Hz, puis une antirésonance vers 10dBm à 60×10^8 Hz.

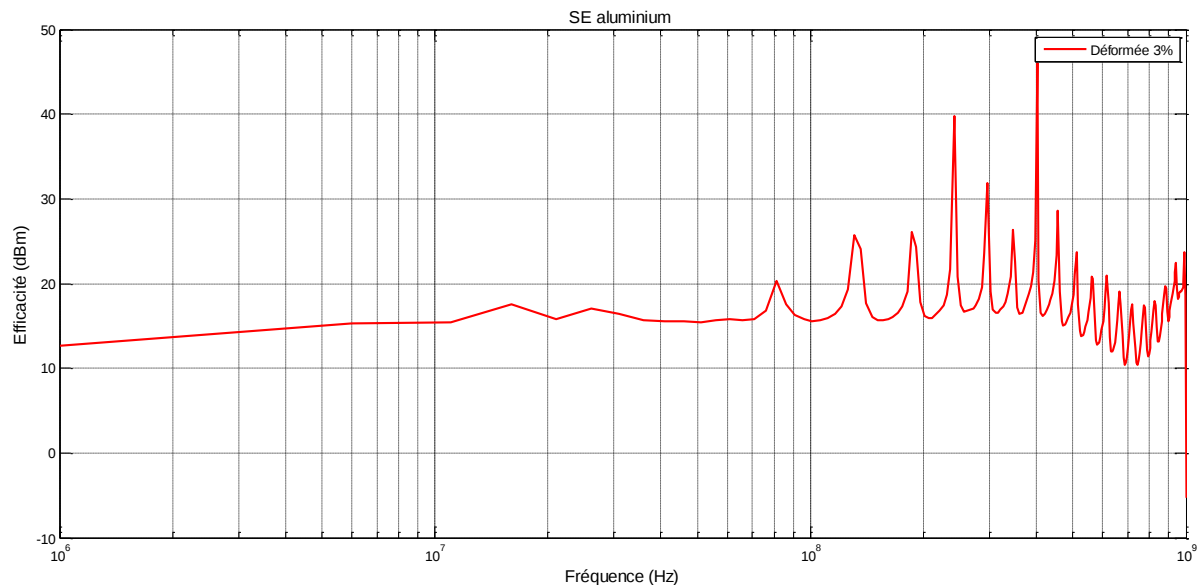


Figure IV-21 Variation de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformé 3% en fonction de la fréquence.

Pour l'éprouvette d'aluminium déformé 4%, les mesures obtenues de l'efficacité de blindage électrique sont représentés dans La figure IV-22. On remarque une stabilité d'efficacité jusqu'à 10×10^8 Hz puis une antirésonance vers -10dBm a 35×10^8 Hz, ensuite une augmentation de l'efficacité vers 41dBm à 80.10^8 Hz.

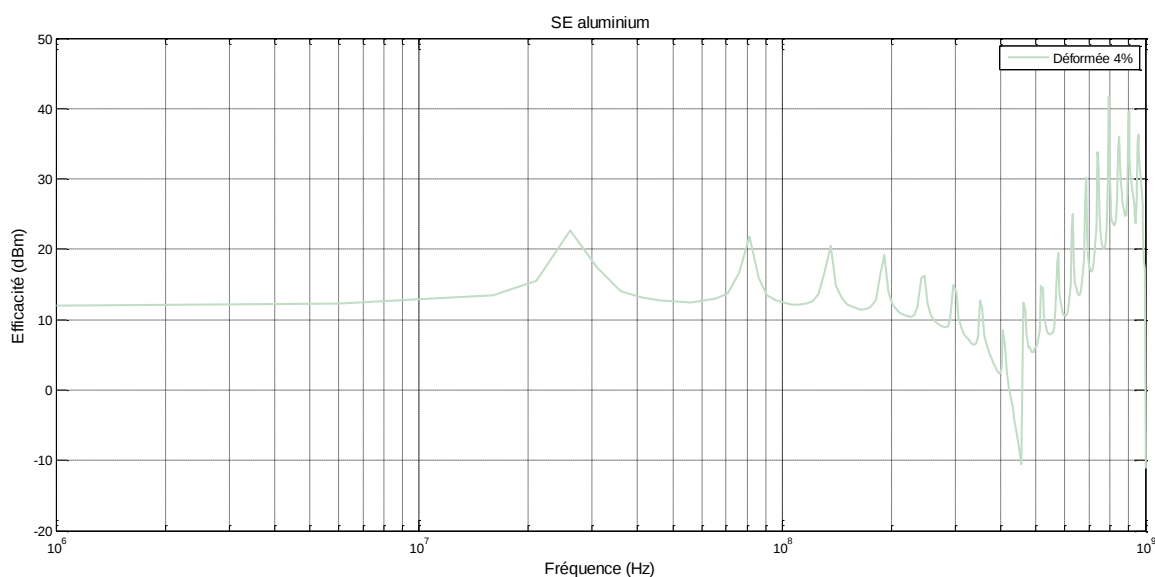


Figure IV-22 Variation de l'efficacité de blindage électrique d'éprouvette d'aluminium déformée 4% en fonction de la fréquence.

La courbe IV-23 représente les mesures de l'efficacité de toutes les éprouvettes de l'aluminium ; on remarque que les valeurs de l'efficacité de Al sont plus au mois proches et présente une légère variation jusqu'au 10^5 Hz. Au-delà de 10^5 Hz on remarque que les valeurs de l'efficacité des différentes éprouvettes présentes une diminution suivie d'une augmentation de l'efficacité à partir de 60.10^5 Hz

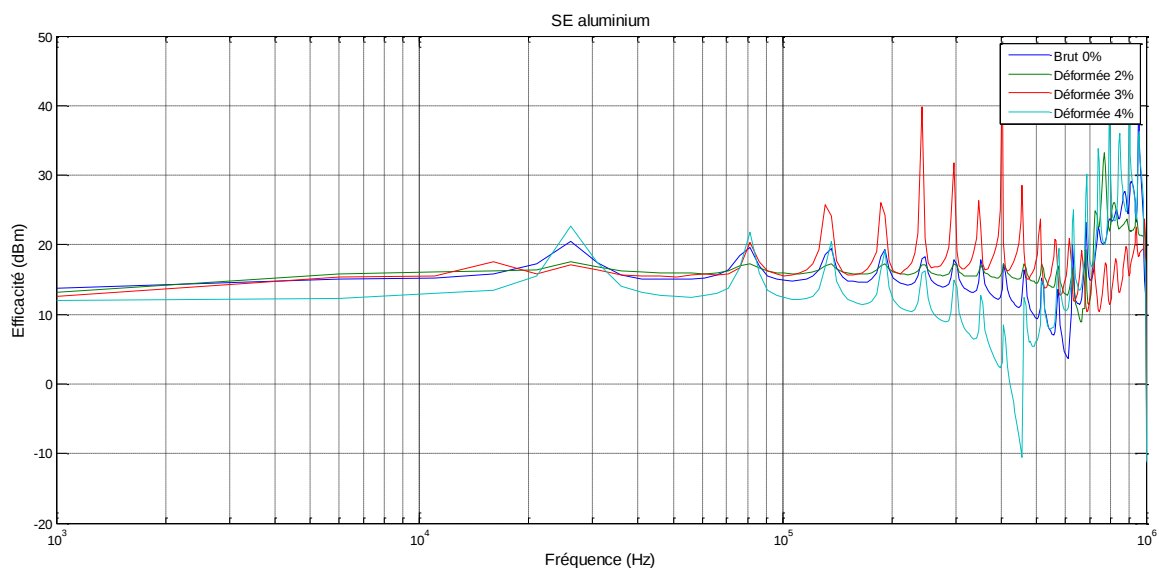


Figure IV-23 Courbes de l'efficacité de blindage électrique d'aluminium 0%,2%,3% et 4%

IV.7 Efficacité Magnétique d'aluminium

La courbe IV-24 représente l'efficacité de blindage magnétique en fonction de la fréquence pour l'éprouvette brute sans déformation, on remarque une augmentation légère de 20dBm a 25 dBm à 20.10^7 Hz puis une stabilité d'efficacité jusqu'au 80.10^8 Hz ensuite une antirésonance vers 11dBm.

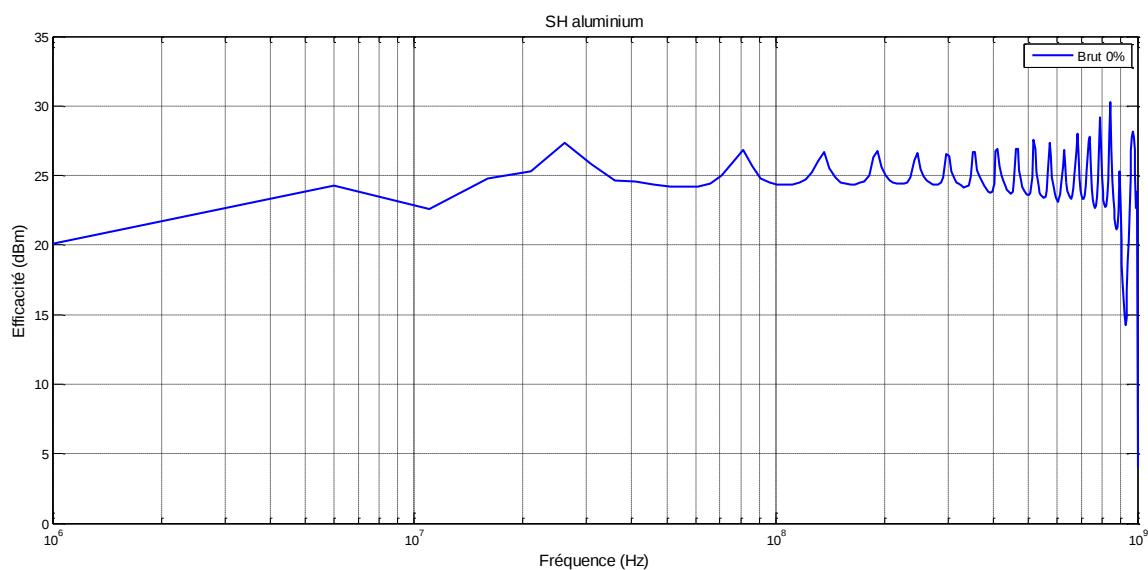


Figure IV-24 : variation de l'efficacité magnétique du cuivre sans déformation en fonction de la fréquence.

La courbe IV-25 représente l'efficacité de blindage magnétique en fonction de la fréquence pour l'éprouvette déformée à 2%, on remarque une augmentation légère de 18dBm à 23 dBm à $20 \cdot 10^7$ Hz puis une résonance vers 43 dBm à $17 \cdot 10^7$ Hz ensuite une stabilité d'efficacité jusqu'à 1GHz.

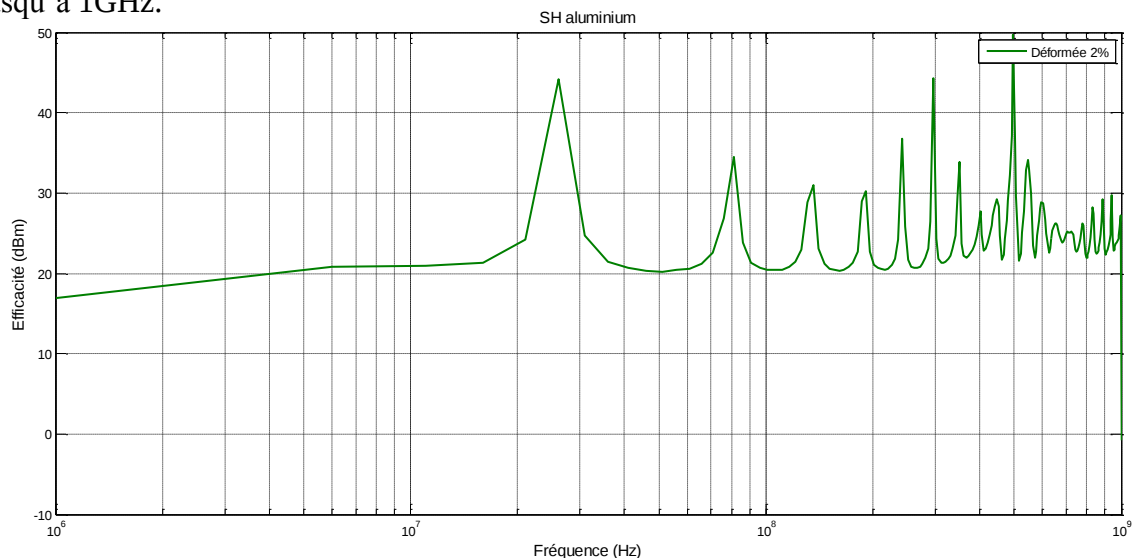


Figure IV-25 Variation de l'efficacité magnétique de l'aluminium déformé à 2% en fonction de la fréquence.

On remarque dans la courbe IV-26, une variation légère de la valeur du champ magnétique autour de 20dBm à $20 \cdot 10^8$ Hz puis une antirésonance à $60 \cdot 10^8$ Hz vers 11dBm et une résonance à $70 \cdot 10^8$ Hz vers 33dBm pour l'éprouvette déformée à 3%.

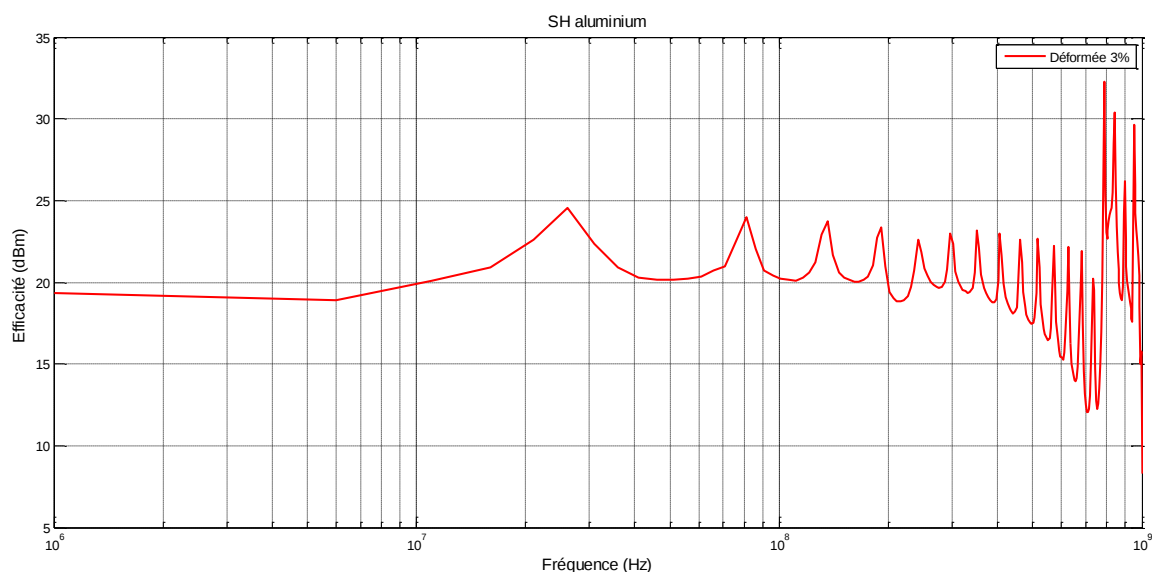


Figure IV-26 Variation de l'efficacité magnétique de l'aluminium déformé 3% en fonction de la fréquence.

La courbe IV-27 représente l'efficacité de blindage magnétique en fonction de la fréquence pour l'éprouvette déformée à 4%, on remarque une légère stabilité autour de 15dBm jusqu'à $15 \cdot 10^7$ Hz puis une résonance de 34dBm et autre a $70 \cdot 10^7$ Hz de 30dBm puis une augmentation de l'efficacité vers 50dBm après $30 \cdot 10^8$.

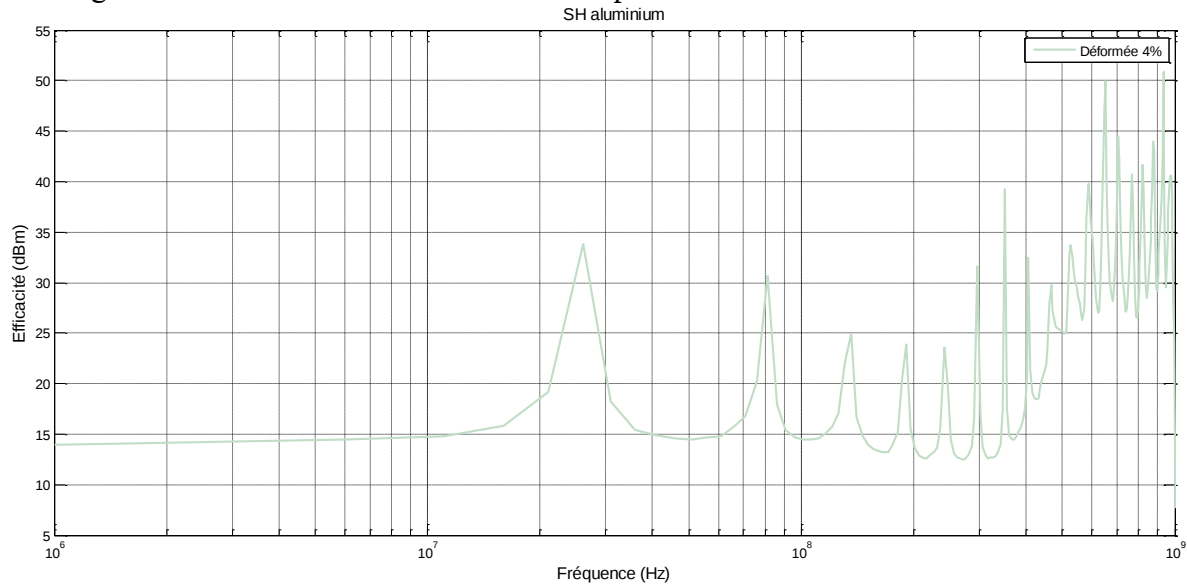


Figure IV-27 Variation de l'efficacité de blindage magnétique de l'éprouvette déformée 4% en fonction de fréquence.

En comparaison entre les courbes d'efficacité de blindage de champ magnétique d'aluminium, on remarque que l'efficacité diminue proportionnellement avec la déformation, la grande valeur de l'efficacité est pour l'éprouvette brute sans déformation et la faible efficacité est pour l'éprouvette déformée à 4%, on remarque aussi que les résonances sont à la même fréquence ceci montre que la résonance dépend de la fréquence et ne dépend pas du taux de déformation dans les mêmes conditions et pour le même matériau .

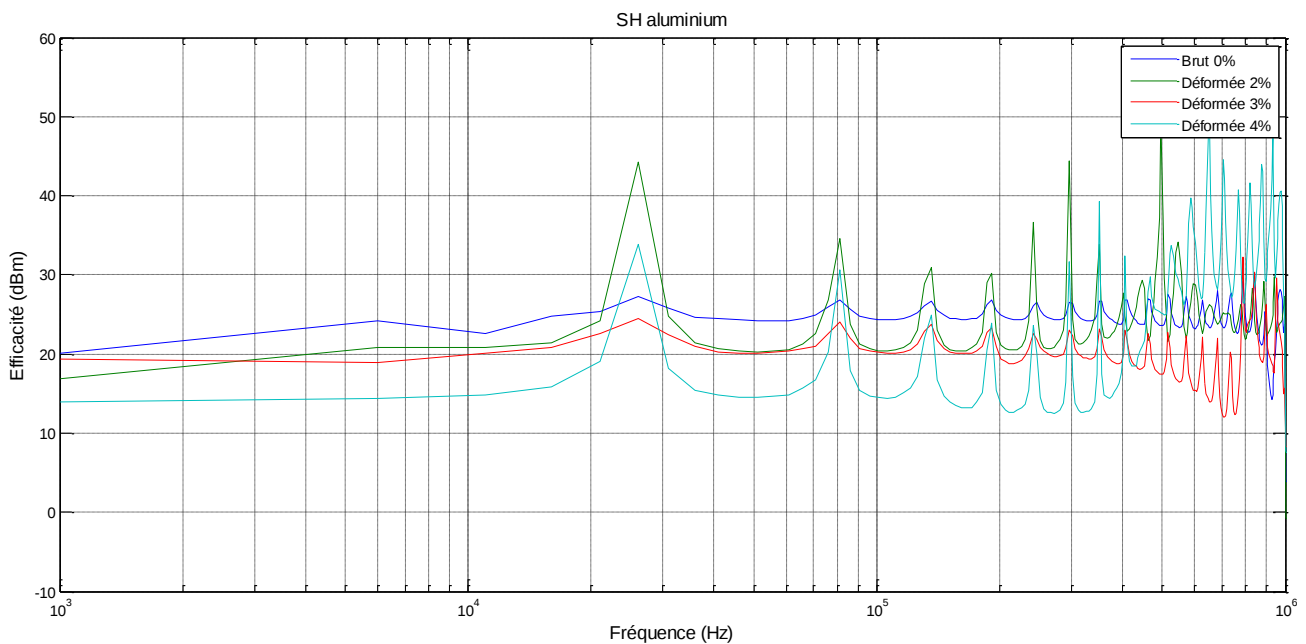


Figure IV-28 Courbes de l'efficacité de blindage magnétique d'aluminium 0%,2%,3% et 4%

on remarque que l'augmentation de taux de déformation plastique influe directement sur la conductivité électrique qui se traduit en efficacité de blindage, ce qui veut dire que l'augmentation de densité de dislocation (grossissement de joint de grains et maclage) diminue la conductivité par cause microstructurale qui influe directement sur l'équilibre thermodynamique.

Dans un système parfait (monocristal) sans aucun défauts que soit surfaciale (macles) ou linéaire (dislocation) ou ponctuelle (lacune et interstitiel) l'enthalpie libre s'écrit :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\frac{\partial G}{\partial T} = 0 \text{ présente l'enthalpie à pression constante}$$

Par contre dans notre cas nos systèmes sont des poly-cristaux déformés (présences des joints de grain et empilement et dislocations) donc l'enthalpie libre s'écrit :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S + \sum_{i=1}^n Qi$$

Qi est l'énergie de chaque défaut interracial pour joint de grain, dislocation et lacunes

$\sum_{i=1}^n Qi$ Influe directement sur la mobilité des charges électriques

Conclusion

Conclusion

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet des variations des paramètres mécaniques, autrement dit le taux de déformations plastique, qui est une propriété macroscopique qui se traduit à l'échelle microscopique par un taux de contraintes internes (introduction des dislocation dans le matériau) sur le changement des paramètres électriques (conductivité électrique) et magnétique (perméabilité magnétique) des matériaux les plus utilisés dans le blindage électromagnétique des équipements électriques et électroniques, à savoir le cuivre et l'aluminium. Notons bien que la déformation plastique (propriété macroscopique) à l'échelle microscopique c'est la multiplicité et la mobilité des défauts linéaires, d'autre facteurs microstructuraux (joints des grains, lacunes etc..) peuvent influencer sur les paramètres électromagnétiques.

L'analyse des différents résultats de mesure des tests de l'immunité électromagnétique des éprouvettes de cuivre et d'aluminium obtenus, en utilisant la cellule TEM (Transversal ElectroMagnetic) nous a permis de conclure que l'augmentation de la densité des contraintes internes mécanique (défauts linaires de structure) dans le cuivre, engendre une augmentation de la perméabilité magnétique et une diminution de la conductivité électrique. Alors que, pour l'aluminium l'augmentation de la déformation plastique engendre un effet contraire magnétiquement, c'est à dire différent de celui du cuivre. Autrement dit augmentation de la perméabilité magnétique et diminution de la conductivité électrique.

Enfin la densité des dislocations introduites par déformation plastique, influe directement sur les valeurs de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique du matériau étudié. Donc l'état non parfait de la structure cristalline (état hors équilibre thermodynamique) affecte les propriétés électriques et magnétiques des matériaux.

En perspective pour développer d'avantage l'étude afin de mieux comprendre l'effet des différents phénomènes affectant les propriétés électriques et magnétiques, on propose d'explorer d'autres paramètres et d'autres conditions, tels que l'orientation cristalline (texture des cristaux), tailles des grains etc. ; tout en orientant les investigations par l'utilisation de la topographie par rayons X (imagerie par RX) et l'observation par TEM (microscopie électronique à transmission).

ANNEXE A

déformation

A.1 Déformation plastique

La déformation est la conséquence de charge appliquée sur un matériau suivant une direction, la projection de vecteur de direction et vecteur de la normale caractérise le type de charge (traction, compression et torsion) ; à l'échelle microscopique (dv élément de volume) tout mode de déformation se réduit à une contrainte de cisaillement. Quel que soit le mode d'application de l'effort de contrainte unidirectionnelle engendre une déformation tridimensionnelle qui peut passer par trois stade à savoir :

- a- Déformation élastique ou on l'appelle déformation homogène réversible après annulation de la charge dont la valeur ΔL est proportionnellement linéaire à la valeur de la contrainte appliquée, cette allongement est toujours inférieur à la limite de déformation élastique qui représente la frontière entre les domaines élastique et plastique.
- b- Déformation plastique (avant striction) : Ce mode de déformation, du point de vue de répartition des contraintes sur le matériau, est homogène dont on l'appelle souvent le domaine plastique avant striction (déformation accentuée locale du matériau). la déformation plastique c'est une déformation permanente et irréversible après l'annulation de charge la longueur de matériaux ne reprend pas son état initial dont la longueur est L_0 , la limite de déformation plastique avant striction correspond à la charge appliquée maximale.
- c- Déformation plastique (après striction) : Ce mode de déformation, du point de vue de répartition des contraintes sur le matériau, est hétérogène, dont la valeur de la contrainte est très élevée dans la zone de striction, suite à la réduction de la section du matériau. L'apparition de mode de déformation est au-delà de la valeur de la charge maximale appliquée. Comme la section au niveau de la striction est inférieure à celle du reste du matériau, on a une concentration locale des contraintes, ce qui engendre une forte déformation dans la zone de section réduite jusqu'à la rupture. Alors que l'on a une lecture de la force appliquée en diminution, mais comme on a aussi une réduction de la section, ce qui rend que la contrainte est toujours en augmentation dans la zone de la striction.

A.2 Traction unidirectionnel (effort longitudinal)

L'essai de traction uniaxiale est l'un des essais les plus utilisés pour caractériser le comportement mécanique statique d'un matériau. Il est simple de mise en œuvre et il permet d'accéder à des paramètres particulièrement importants. Il est très largement utilisé dans la communauté académique et industrielle pour quantifier quelques paramètres mécaniques propres aux matériaux.

La résultante normale des forces d'élasticité dans une section est appelée effort longitudinal. L'effort longitudinal est déterminé par la méthode des sections. La valeur de l'effort longitudinal dans une section droite quelconque d'un matériau est égale à la somme algébrique de tous les efforts longitudinaux extérieurs appliqués à l'une des parties de matériaux par la section droite considérée. On admet que l'effort de traction est positif, l'effort de compression négatif.[mirrrr]

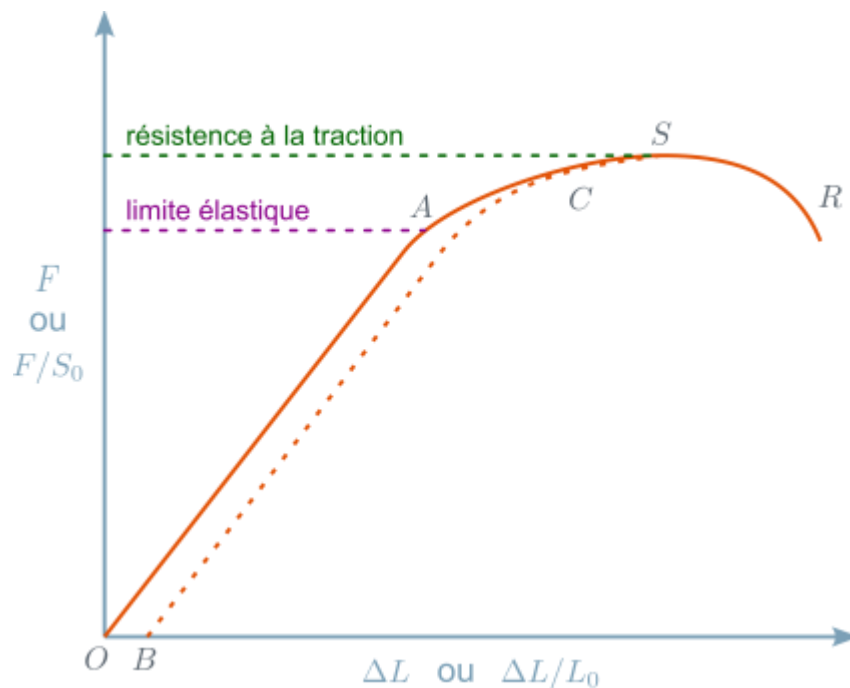


Figure A-1 : Courbe de Traction

Caractéristiques classiques :

L'éprouvette a une longueur L_0 et s'allonge de ΔL sous l'effet d'une charge. $L = L_0 + \Delta L$

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

On donne la charge unitaire c'est-à-dire :

$$R = \frac{F}{S} \quad S \text{ est la section de l'éprouvette}$$

L'allongement total de l'éprouvette est l'allongement de rupture

$$A \% = 100 \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

La striction est la réduction maximale de la section de l'éprouvette rompue c'est à dire dans la section de rupture

$$Z \% = 100 \frac{S_0 - S}{S_0}$$

Constante d'élasticité :

E : Le module d'élasticité ou module de Young.

ν : Coefficient de Poisson .

G : Module de cisaillement.

E : exprime le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette.

ν : exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale.

G : exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement (un essai de torsion)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

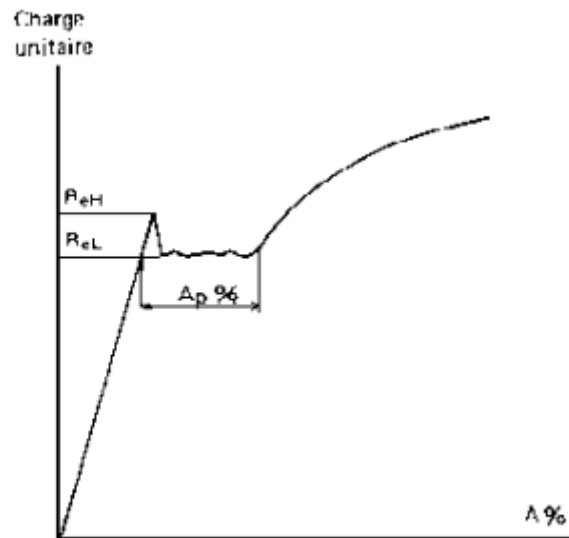


Figure A-2 : Limite élastique de traction

Le perfectionnement de l'éprouvette et non obéissance rigoureuse de la loi, il est préférable de définir les limites propres où l'on apprécie un allongement permanent ou définie une limite conventionnelle 0.2% - 0.1% - 0.02%.

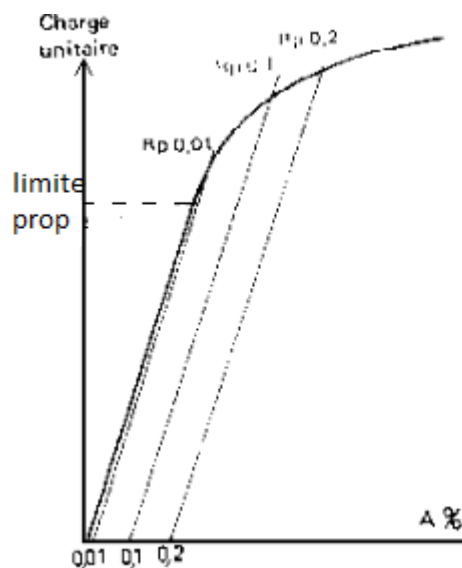


Figure A-3 : Limite élastique de traction

Loi de PETCH : $R_{eL} = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}$

où : R_{eL} désigne la limite d'élasticité; σ_0 et K_y des constantes ; d le diamètre m.

Mesure des allongements :

Par définition l'allongement de rupture A% :

Pour des éprouvettes homothétiques :

$$A\% = A_2 + \frac{\alpha}{L_0} \sqrt{S_0}$$

Des éprouvettes sont telles que $\frac{\sqrt{S_0}}{L_0}$ soit constants.

Les normes internationales définissent le rapport $K = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5.65$ ce qui donne $L_0 = 5 d_0$. Pour des éprouvettes cylindriques les valeurs faibles de K donne une importance relative à l'allongement de striction : pour les aciers doux les deux termes A et A sont pratiquement égaux.

Formule de BERTELLA OLIVER $A\% = K \left(\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} \right)^a$

avec a compris entre (-0.2 et -0.5)

Courbe rationnelle de traction :

σ varie ; $\sigma = F/S$ F : charge appliquée ; S : section instantanée

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} \quad \text{on peut encore écrire}$$

$$\varepsilon = \sum_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L} \quad \text{ou bien } \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

Si on admet la constance de volume.

$$S_0 L_0 = S L \quad \text{donc on a } \varepsilon = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{L}{L_0}$$

$$A\% = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad \text{donc } \varepsilon = \ln \left(1 + \frac{A}{100} \right)$$

L'avantage est l'additivité.

Si on considère ε_1 ; ε_2 et ε_3 en valeurs algébriques $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$

$$\left(e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad s = \frac{F}{S_0} \right) \text{ nominales.}$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln (1+e)$$

Annexe A déformation

$$\sigma = \frac{F}{S} = s \frac{S_0}{S} = s \frac{L}{L_0} = s (1+e)$$

$$F = \sigma S \quad dF = 0 \quad \frac{dF}{F} = \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dS}{S}$$

$$L S = C^{te} \quad \frac{dL}{L} + \frac{dS}{S} = 0$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{d\sigma}{\sigma} - d\varepsilon \quad \Rightarrow \quad \frac{d\sigma}{\sigma} = d\varepsilon \quad \Rightarrow \quad \sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > \sigma \text{ def stable (avant striction)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} < \sigma \text{ def stable (après striction)}$$

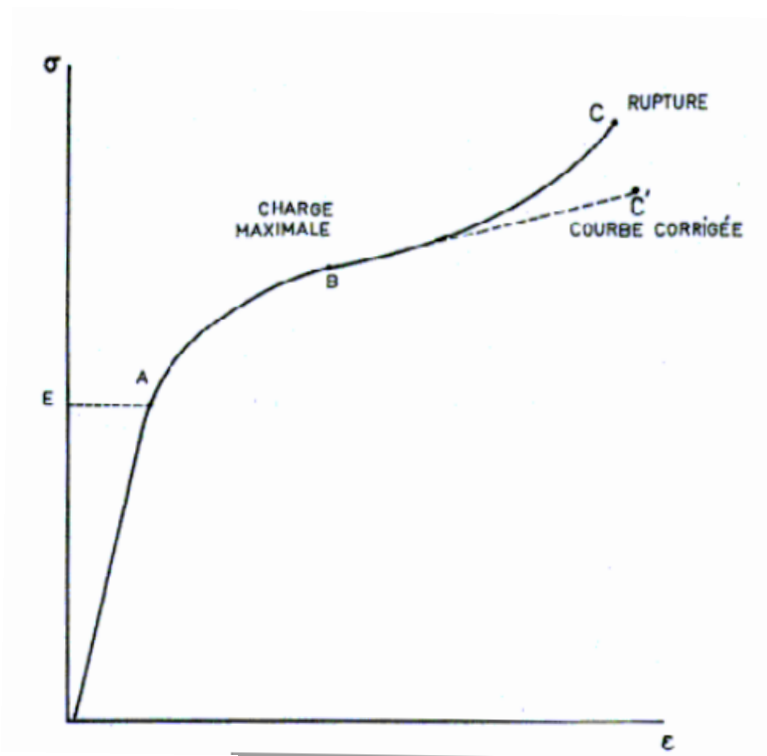


Figure A-4 : Courbe Rationnelle de traction

La formule de correction de Bridgmann

$$\sigma_{Lor} = \sigma \left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln \left(1 + \frac{a}{2R}\right)$$

a : le rayon de la section minimale.

R : le rayon de courbure de la zone de striction.

Equation de la courbe rationnelle.

Pratiquement pour les aciers doux $\sigma_0 = 0$; $\sigma = K \varepsilon^n$

n : est appelé coefficient d'écrouissage.

$$\frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dS}{S} = 0 \text{ comme } \varepsilon = \ln \frac{S_0}{S} \text{ on a } \frac{dS}{S} = -d\varepsilon$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \rightarrow \sigma = K \varepsilon^n$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n K \varepsilon^{n-1}$$

$$\text{D'où l'équation : } n K \varepsilon^{n-1} = K \varepsilon^n \Rightarrow \frac{n}{\varepsilon} = 1$$

Le coefficient d'écrouissage est donc égale à l'allongement répartie.

$$\sigma_{\max} = K n^n \text{ et } R_n = K \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

Mesure de coefficient d'écrouissage $\sigma = K \varepsilon^n$

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon.$$

A.3 Energie de déformation

Calculons le travail des forces exercées sur un domaine D limité par une frontière ∂D lors d'une déformation. Ce domaine est soumis aux :

- Forces de volume : $\vec{f} dV$
- Forces de surfaces : $\vec{T} dS = \bar{\bar{\sigma}} \cdot \vec{n} dS$

F : force appliquée

dv : élément de volume

Lors d'une déformation infinitésimale, un élément de volume centré en $\vec{r}$ subit un déplacement $\vec{\delta u}(\vec{r})$. Le travail des forces entre l'état non déformé $(\bar{\bar{\sigma}}, \bar{\bar{\varepsilon}})$ et celui l'état déformé $(\bar{\bar{\sigma}} + d\bar{\bar{\sigma}}, \bar{\bar{\varepsilon}} + d\bar{\bar{\varepsilon}})$ est noté δW_{ext} . De plus, le domaine D reçoit une quantité de chaleur δQ du reste du solide.

D'un point de vue thermodynamique, le premier principe s'écrit :

$$dU + dK = \delta Q + \delta W_{ext} \quad (1.1)$$

Où :

U est l'énergie interne (U est une fonction d'état)

K est l'énergie cinétique du mouvement macroscopique

δQ est la quantité de chaleur échangée

δW_{ext} est le travail élémentaire des forces extérieures

Le théorème de l'énergie cinétique s'écrit :

$$\delta W_{\text{ext}} + \delta W_{\text{int}} = dK \quad (1.2)$$

Où :

δW_{int} est le travail des forces intérieures à l'élément de volume.

Il vient :

$$dU = \delta Q - \delta W_{\text{int}} \quad (1.3)$$

On obtient :

$$dU = \delta Q + \int_D \vec{f} dV \delta \vec{u} + \int_{\partial D} \vec{T} dS \delta \vec{u} \quad (1.4)$$

Où :

$$dU = \delta Q + \int_D f_i \delta u_i dV + \int_{\partial D} \sigma_{ij} \delta u_i dS_j \quad (1.5)$$

En transformant la deuxième intégrale en intégrale de volume, on obtient :

$$\int_{\partial D} \sigma_{ij} \delta u_i dS_j = \int_D \text{div}(\sigma_{ij} \delta u_i)_j dV = \int_D (\sigma_{ij} \delta u_i)_{,j} dV \quad (1.6)$$

D'où :

$$\begin{aligned} -\delta W_{\text{int}} &= \int_D f_i \delta u_i dV + \int_D (\sigma_{ij,j} \delta u_i + \sigma_{ij} \delta u_{i,j}) dV \\ &= \int_D \underbrace{(f_i + \sigma_{ij,j})}_{\text{eq.equil.}} \delta u_i + \int_D \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dV \end{aligned}$$

Finalement :

$$-\delta W_{\text{int}} = \int_D \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dV$$

Qui se transforme d'après (3.3) :

$$-\delta W_{\text{int}} = \int_D \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_D \sigma_{ij} \delta \Omega_{ij} dV$$

La deuxième intégrale est nulle car σ_{ij} est un tenseur symétrique tandis que $\delta \Omega_{ij}$ est un tenseur antisymétrique.

Il vient finalement :

$$-\delta W_{\text{int}} = \int_D \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV$$

Et la densité d'énergie:

$$\frac{-\delta W_{\text{int}}}{dV} = \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij}$$

Par définition, la déformation est élastique si l'énergie de déformation est une fonction d'état ;

$$\delta W = dW \text{ (différentielle totale exacte)}$$

Cette énergie ne dépend que des états final et initial.

$$dW = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.7)$$

Ou :

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \rightarrow C_{ijkl} = \frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_{ij} \partial \varepsilon_{kl}} \quad (1.8)$$

Liste des références

- [1] Danlée, Y., Bailly, C., Huynen, I. (2014). Thin and flexible multilayer polymer composite structures for effective control of microwave electromagnetic absorption. *Composites Science and Technology*, 100: 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.06.010>
- [2] Gaoui, B., Hadjadj, A., Kious, M. (2017). Enhancement of the shielding effectiveness of multilayer materials by gradient thickness in the stacked layers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(15): 11 292-11 299. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6920-8>
- [3] Danlée, Y., Huynen, I., Bailly, C. (2012). Thin smart multilayer microwave absorber based on hybrid structure of polymer and carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 100(21): 213105. <https://doi.org/10.1063/1.4717993>
- [4] Thomassin, J.-M., Vuluga, D., Alexandre, M., Jérôme, C., Molenberg, I., Huynen, I., Detrembleur, C. (2012). A convenient route for the dispersion of carbon nanotubes in polymers: Application to the preparation of electromagnetic interference (emi) absorbers. *Polymer*, 53(1): 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.11.026>
- [5] Tahar, M., Hadjadj, A., Kious, M., Arun Prakash, V.A., Gaoui, B. (2018). Effect of magnetic iron (iii) oxide particle addition with mwcnts in kenaf fibre-reinforced epoxy composite shielding material in ‘e’, ‘f’, ‘i’ and ‘j’ band microwave frequencies. *Materials Research Express*, 6(4). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf9de>
- [6] Gaoui, B., Hadjadj, A., Kious, M. (2016). Comparison electromagnetic shielding effectiveness between single layer and multilayer shields. in *Power Engineering Conference (UPEC)*, 2016 51st International Universities. IEEE, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2016.8114106>
- [7] Gaoui, B., Hadjadj, A., Kious, M. (2017). Novel multilayer arrangement of conductive layers traps the electromagnetic interferences by multiple internal reflections at high frequency in the far field. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(4): 3924-3930. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-6006-z>
- [8] He, Y., Ao, J., Yang, J., Tang, X. (2014). The shielding effectiveness based magnetic field shielding theory and its application in mobile payment systems. in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2014 IEEE 80th. IEEE, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6966203>

- [9] Lou, C.-W., Lin, T.A., Chen, A.-P., Lin, J.-H. (2016). Stainless steel/polyester woven fabrics and copper/polyester woven fabrics: Manufacturing techniques and electromagnetic shielding effectiveness. *Journal of Industrial Textiles*, 46(1): 214-236. <https://doi.org/10.1177/1528083715580518>
- [10] Tong, X.C. (2016). *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding*. CRC press.
- [11] Papanikolaou, S., Cui, Y., Ghoniem, N. (2017). Avalanches and plastic flow in crystal plasticity: An overview. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 26(1): 013001. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/aa97ad>
- [12] Borodin, E.N., Mayer, A.E. (2015). Structural model of mechanical twinning and its application for modeling of the severe plastic deformation of copper rods in Taylor impact tests. *International Journal of Plasticity*, 74: 141- 157. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.06.006>
- [13] Hubert, O., Lazreg, S. (2012). Multidomain modeling of the influence of plastic deformation on the magnetic behavior. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(4): 1277-1280. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172935>
- [14] Li, J., Li, F., Zhao, C., Chen, H., Ma, X., Li, J. (2016). Experimental study on pure copper subjected to different severe plastic deformation modes. *Materials Science and Engineering: A*, 656: 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.018>
- [15] Rodrigues-Jr, D., Silveira, J., Gerhardt, G., Missell, F., Landgraf, F., Machado, R., de Campos, M. (2012). Effect of plastic deformation on the excess loss of electrical steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(4): 1425-1428. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2174214>
- [16] Lazreg, S., Hubert, O. (2012). Influence of plasticity on magnetic and magnetostrictive behaviors of dual-phase steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(4): 1273- 1276. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172936>
- [17] Daniel, L. (2018). An analytical model for the magnetostriction strain of ferromagnetic materials subjected to multiaxial stress. *The European Physical Journal Applied Physics*, 83(3): 30904. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2239264>

- [18] Daniel L., Hubert, O., Buiron, N., Billardon, R. (2008). Reversible magneto-elastic behavior: A multiscale approach. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56(3): 1018-1042. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.06.003>
- [19] Hahner, P., Bay, K., Zaiser, M. (1998). Fractal dislocation patterning during plastic deformation. *Physical Review Letters*, 81(12): 2470-2473. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.2470>
- [20] Jakobsen, B., Poulsen, H.F., Lienert, U., Almer, J., Shastri, S.D., Sørensen, H.O., Gundlach, C., Pantleon, W. (2006). Formation and subdivision of deformation structures during plastic deformation. *Science*, 312(5775): 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1124141>
- [21] Saini, P., Arora, M. (2012). Microwave absorption and 139 emi shielding behavior of nanocomposites based on intrinsically conducting polymers, graphene and carbon nanotubes. in *New Polymers for Special Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/48779>
- [22] Dewers, T.A., Issen, K.A., Holcomb, D.J., Olsson, W.A., Ingraham, M.D. (2017). Strain localization and elastic-plastic coupling during deformation of porous sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 98: 167-180. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.06.005>
- [23] Gupta, Y., Mandal, A. (2017). Elastic-plastic deformation of molybdenum single crystals shocked to 12.5 gpa: Crystal anisotropy effects. in *APS Shock Compression of Condensed Matter Meeting Abstracts*. <https://doi.org/10.1063/1.5048131>
- [24] Voicu, V., Pătru, I., Nicolae, P.M., Dina, L.A. (2017). Analyzing the attenuation of electromagnetic shielding materials for frequencies under 1 ghz. in *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017 10th International Symposium on. IEEE, 2017, pp. 336-339. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2017.7905057>
- [25] Pan, S.M., Kim, J., Kim, S., Park, J., Oh, H., Fan, J. (2010). An equivalent three-dipole model for IC radiated emissions based on TEM cell measurements. In: *2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, pp. 652-656. <https://doi.org/10.1109/isemc.2010.5711354>
- [26] Tumayan, R., Bunlon, X., Reineix, A., Andrieu, G., Guiffaut, C. (2014). A method using an open TEM cell to extract the complex permittivity of an unknown material. 2014

Liste des références

International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/emceurope.2014.6931067>

[27] Directive CEM 89/336/CEE , “*Rapprochement des législations des Etats membres relatives à la compatibilité électromagnétique* “ , JO des communautés européennes mai 1989

[28] Michel Mardiguian, “ *Manuel pratique de compatibilité életromagnetique* “ ,Prana R&D,1992

[29] Alain Charoy, “ *Compatibilité électromagnétique* “ ,Dunod,2000.

[30] J.Cuvillier , cour de CEM , notion elementaire , (IUT de Nante) génie electrique et informatique industriel , ars 1979.

[31] F.Rachidi , *Compatibilité electromagnetique, notes de cours* , Blindage, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL-DE-LRECH-1015 été 2004 .

[32] S.Khoubzaoui,“*Contribution a l’etude des propriétés electriques des polymeres conducteurs composites* “ , Faculté des sciences , Université de Tlemcen , Algerie, mémoire de magister juillet 2005.

[33] L.Charoy ,“*Compatibilité electromagnetique , parasites et perturbations des electronique , Tome 3 blindage-filtres-cables blindés ,régles et conseils d’instalation* “ ,DUNOD,paris,1992.

[34] D.Padey,“*les polymeres composites conducteurs pour la protection electromagnetique* “ , <http://www.agmat.asso.fr/syntheses/protelecN.htm>.

[35] G.CHAUDRON “ *Monographie sur les métaux de haute pureté tome 3* “

[36] G.CHAUDRON “ *Monographie sur les métaux de haute pureté tome 1* “

[37] B. Nagler et al., « *Turning solid aluminium transparent by intense soft X-ray photoionization* », *Nat. Phys.*, vol. 5, n° 9, 2009, p. 693-696 ([ISSN 1745-2473,DOI 10.1038/nphys1341](https://doi.org/10.1038/nphys1341))

[38] <http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM3uc2-3.html>

[39] Taylor, 1934-Taylor G.I., The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I. Theoretical, Proc. Roy. Soc. A 145, 362-387 (1934)

- [40] Hirsch et al., 1956 - Hirsch P.B., Horne R.W. & Whelan M.J., *Philos. Mag.* 1, 677 (1956).
- [41] Friedel, 1964 - Friedel J., *Dislocations*, Oxford: Pergamon Press (1964).
- [42] Nobert BROLL, *Caractérisation de solides cristallisés par diffraction X, Technique de l'Ingénieur*.
- [43] P.F Combes, “*Micro-ondes : 1.ligne , guides et cavités* “ , Edition Dunod ,1995 .
- [44] S.B Worn , “*Comparison of workbench methods for testing RF emission properties of integrated circuit* “ , 14 the international symposium on EMC , Zurich,February 2001.
- [45] G. Andrieu, J. Panh, A. Reineix, P. Pélissou, C. Girard, X. Romeuf, and D. Schmitt, “Homogenization of Composite Panels From a Near-Field Magnetic Shielding Effectiveness Measurement,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no.3, pp. 700-703, June 2012.
- [46] S. Ahn, J. Pak, T. Song, H. Lee, J. G Byun, D. Kang, C S. Choi, E. Kim, J. Ryu, M. Kim, Y. Cha, Y. Chun, C T. Rim, J H. Yim, D H. Cho, and J. Kim, “Low Frequency Electromagnetic Field Reduction Techniques for the On-Line Electric Vehicle (OLEV),” *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 625-630, Fort Lauderdale, 25-30 July 2010.
- [47] T. F. Belkacem, “Modélisation Numérique et Mesures Expérimentales de l’Interaction Electromagnétique entre une Enceinte conductrice alvéolée et une source extérieure isolée,” Thèse de doctorat, École Militaire Polytechnique, Algérie, 2012.
- [48] C. Jettanasen, "Modélisation par approche quadripolaire des courants de mode commun dans les associations convertisseurs-machines en aéronautique; optimisation du filtrage," Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2008.
- [49] Keshtkar, A. Maghoul and A. Kalantarnia, “Magnetic Shield Effectiveness in Low Frequency,” *Inter. Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 507-513, August 2011.
- [50] O. Losito, V. Dimiccoli, and D. Barletta, “Low frequency Shielding Improvement by Multilayer Design,” *Proc. of the 10th Int. Symp. on Electromagn Compat., (EMC Europe 2011)*, York, UK, 26-30 September 2011.

- [51] G. Bida, « Matériaux composites incluant des polymères conducteurs électroniques : revue bibliographique », J. Chim. Phys., Vol. 86 (1989), pp. 45–60 (<https://doi.org/10.1051/jcp/1989860045>, publié en ligne en mai 2017).
- [52] Hamdi, K., Aboura, Z., Harizi, W., Khellil, K., Improvement of the electrical conductivity of carbon fiber reinforced polymer by incorporation of nanofillers and the resulting thermal and mechanical behavior. Journal of Composite Materials, 52(11), 1495–1503, (2017). doi:10.1177/0021998317726588
- [53] Khalil HamdiI , Walid Harizi , Kamel Khellil , Zoheir Aboura, Effect of carbon nanofillers on thermoplastic resin-carbon fiber composite physical and mechanical properties, Comptes Rendus des JNC 20 – Ecole des Ponts ParisTech – 28-30 juin 2017.
- [54] Gresil, M, Parneix, P., Boulay,J.L.,Cheypre, C., Efficacité de blindage par l’insertion d’un écran métallisé dans des matériaux composites verre et carbone.
- [55] Midoud, N., contribution à l’étude de l’efficacité du blindage électromagnétique en champ proche ; cas des polymères conducteurs composites, magister en physique des polymères, janvier 2011, université de Tlemcen.
- [56] Thiebaud Richeton. Dynamique et complexité de la déformation plastique : étude par émission acoustique. Mécanique [physics.med-ph]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006.
- [57] Manara ,A “ *Measurement of material shielding effectiveness using a dual TEM cell and vector network analyser* “, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility , Vol.38,No.3 Aug.1996.
- [58] F.Fiori , F.Musolino,“ *Investigation on the Effectiveness of the IC Susceptibility TEM cell Method* “ IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility ,P. 110-114, Vol.46,No.1February 2004
- [59] <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM3uc2-3.html> consulté le 20/03/2018
- [60] <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM3uc2-2.html> consulté le 20/03/2018

RESUME -La réduction des interférences électromagnétiques (EMI) est un problème sérieux à prendre en charge en raison de la prolifération des appareils électriques dans les domaines civils et militaires. Ces rayonnements peuvent facilement interférer et générer des effets nocifs sur le bon fonctionnement des appareils. Pour cette raison, la recherche se focalise dans le domaine de la compatibilité électromagnétique des matériaux à haute efficacité dans le but d'atténuer les EMI. Au fil des ans, la technologie du blindage a été perfectionnée afin d'améliorer la légèreté et l'efficacité du blindage électromagnétique des matériaux. Ceux-ci doivent être conçus et développés afin d'inhiber les radiations indésirables, dans cette thèse on a étudié l'influence de la déformation plastique sur les propriétés électrique et magnétique de cuivre et d'aluminium, on a commencé par une étude bibliographique puis un protocole de préparation d'échantillons par usinage puis une caractérisation physique et mécanique des deux métaux et finalement l'étude de l'efficacité de blindage.

ABSTRACT -The reduction of electromagnetic interference (EMI) is a serious issue to be addressed due to the proliferation of electrical devices in the civilian and military fields. This radiation can easily interfere and have harmful effects on the proper functioning of devices. For this reason, research is focused in the field of electromagnetic compatibility of high efficiency materials with the aim of mitigating EMI. Over the years, shielding technology has been perfected to improve the lightness and efficiency of electromagnetic shielding materials. These must be designed and developed in order to inhibit unwanted radiations, in this thesis we studied the influence of plastic deformation on the electrical and magnetic properties of copper and aluminum, we started with a bibliographic study then a protocol preparation of samples by machining then a physical and mechanical characterization of the two metals and finally the study of the shielding efficiency.

يعد الحد من التداخل الكهرومغناطيسي قضية أساسية يجب معالجتها بسبب انتشار الأجهزة الكهربائية في المجالات العسكرية والمدنية. يمكن أن يتداخل هذا الإشعاع بسهولة و أن يكون له آثار ضارة على الأداء السليم للأجهزة. لهذا السبب يتركز البحث في مجال التوافق الكهرومغناطيسي للمواد عالية الكفاءة بهدف تخفيف التداخل الكهرومغناطيسي. يجب تصميمها وتطويرها من. على مر السنين تم إتقان تقنية التدريع لتحسين خفة وكفاءة مواد التدريع الكهرومغناطيسي. أجل منع الإشعاعات غير المرغوب فيها وفي هذه الأطروحة درسنا تأثير تشوه البلاستيك على الخواص الكهربائية والمغناطيسية للنحاس والألمنيوم وبدأنا بدراسة مكتبية و بيداغوجية ثم بروتوكول تحضير العينات بالتشغيل الآلي ثم التوصيف الفيزيائي والميكانيكي للمعدنين وأخيراً دراسة كفاءة التدريع.