



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique

Option : machine électrique.

Thème :

Etude par flux 2D du contrôle non destructif Par la technique de champ tournant Triphasé dans les matériaux magnétiques conducteur

Proposé et dirigé : Pr. Mimoun Soury Mohamed

RESUME (Français et Arabe)

Résumé :

Dans ce travail, nous avons étudié la détection des défauts de matériaux magnétiques conducteurs à l'aide d'un dispositif, nous avons présenté le modèle mathématique et numérique qu'on va utiliser pour modéliser le dispositif, (calcul de champ par les éléments finis) Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé. Nous avons découvert une méthode de détection *FRem* et on va comparer les résultats expérimentaux avec les résultats numériques.

ملخص:

في هذا العمل، قمنا بدراسة اكتشاف عيوب المواد المغناطيسية الموصلة باستخدام جهاز، قدمنا النموذج الرياضي والعددي الذي سيتم استخدامه لنمذجة الجهاز، (حساب العناصر المحدودة) ثم ذهبنا إلى وصف مبدأ الحساب والبرنامج المستخدم. سنكتشف طريقة اكتشاف *FRem* وسنقوم بمقارنة النتائج التجريبية بالنتائج العددية.



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière d'Electrotechnique

MÉMOIRE DE MASTER

Machine Electriques

Présenté et soutenu par :

Ramdane djaballah

Le : Samedi 6 juillet 2019

*Etude par flux 2D du contrôle non destructif par la
technique de champ tournant Triphasé dans les
matériaux magnétiques conducteur*

Jury

Mr. Hamoudi Mohamed Yacine	MCA	Président
Mr. Mimoune Soury Mohamed	Pr	Encadreur
Mr. Rezig Mohamed	MCB	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

Chapitre I

Généralité sur le

contrôle non destructif

Chapitre II
Calcul de champ
Et
méthode des éléments
finis

Chapitre III

*Contrôle par le champ
tournant*

Chapitre IV

Analyse des courants par la technique de Fourier FFT

I.1 Introduction

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances.

On parle aussi d'«essais non destructifs » (END) ou d'«examens non destructifs»[1].

Dans ce chapitre on expose les différentes techniques du contrôle non destructif et le contrôle non destructif par courants de Foucault.

I.2 Les techniques du CND

Le domaine du Contrôle Non Destructif (CND) est très vaste et interdisciplinaire. Le CND joue un rôle crucial en assurant que les composants et des systèmes structuraux remplissent leur fonction de manière fiable et rentable. Les techniciens et les ingénieurs du CND définissent et implémentent des tests qui permettent de caractériser des matériaux et de localiser des défauts qui auraient pu provoquer des accidents de train ou d'avion, des incendies sur des pipelines, ou tout autre incident. Ces tests réalisés ne remettent pas en cause l'intégrité structurelle de la pièce évaluée et donc son usage. Comme le CND permet l'inspection sans dégâts, il fournit un excellent compromis entre qualité du contrôle et coût. Le CND est largement utilisé dans l'industrie. Les méthodes employées sont similaires à celles mises en place dans le domaine médical et appliqué au non vivant. L'évaluation non destructive (END) est un terme parfois employé à la place de CND. Néanmoins, l'END est utilisée pour décrire des mesures qualitatives par nature. Ainsi, non seulement l'END permettrait de détecter un défaut, mais aussi sa taille, sa forme et son orientation. L'END peut aussi permettre de déterminer les propriétés physiques d'un matériau. Les origines et les types de défauts sont nombreux. De nombreuses techniques de CND ont été développées pour répondre aux différents problèmes rencontrés [2].

Tableau I. 1 : Les techniques de C.N.D

Technique	Application
Ressuage	Recherche des défauts de surfaces
Magnétoscopie	Recherche des défauts de surfaces et sous-jacents
Ultrason	Recherche des défauts internes Mesures d'épaisseurs de parois
Radiographie	Recherche des défauts internes
Courants de Foucault	Mesure de l'épaisseur de revêtements Examen de tubes et faisceaux tubulaires
Thermographie infrarouge	Détection de défauts thermiques

I.2.1 Examen visuel

Le contrôle visuel est une technique de base essentielle de contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci :

- des défauts évidents (comme des cassures, de la corrosion, fissures, ...)
- des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur [1].

I.2.2 Ressuage

Le ressuage est une méthode de contrôle non destructif dont le but est la détection et la localisation de défauts ouverts et débouchant en surface sur tous métaux et certains matériaux non métalliques (céramiques, matières plastiques...).

Cette méthode repose sur la capacité de certains liquides à pénétrer, puis à ressuer par capillarité, dans ces discontinuités géométriques.

La capillarité ou la force capillaire caractérise l'aptitude d'un liquide en contact avec un solide à se déplacer par rapport à ce solide [1].

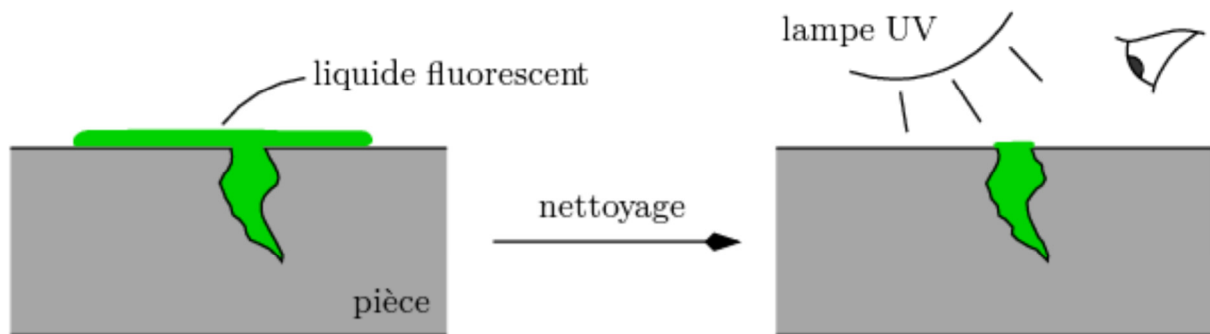


Figure I.1 : Principe des Ressuage



Figure I.2 : Exemple d' une pièce avant (à gauche) et après (à droite) le contrôle par ressuage.

I.2.3. Magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie permet la détection de défauts superficiels débouchant ou sous-jacents dans les matériaux ferromagnétiques (fer, fonte, nickel, cobalt...).

Un matériau est dit ferromagnétique si lorsqu'il est soumis à un champ magnétique de 2400 A/m il présente une induction d'au moins 1 Tesla (NF A 09-125 de Janvier 1982). En effet un champ magnétique élevé ne peut s'obtenir que sur les matériaux ferromagnétiques [1].

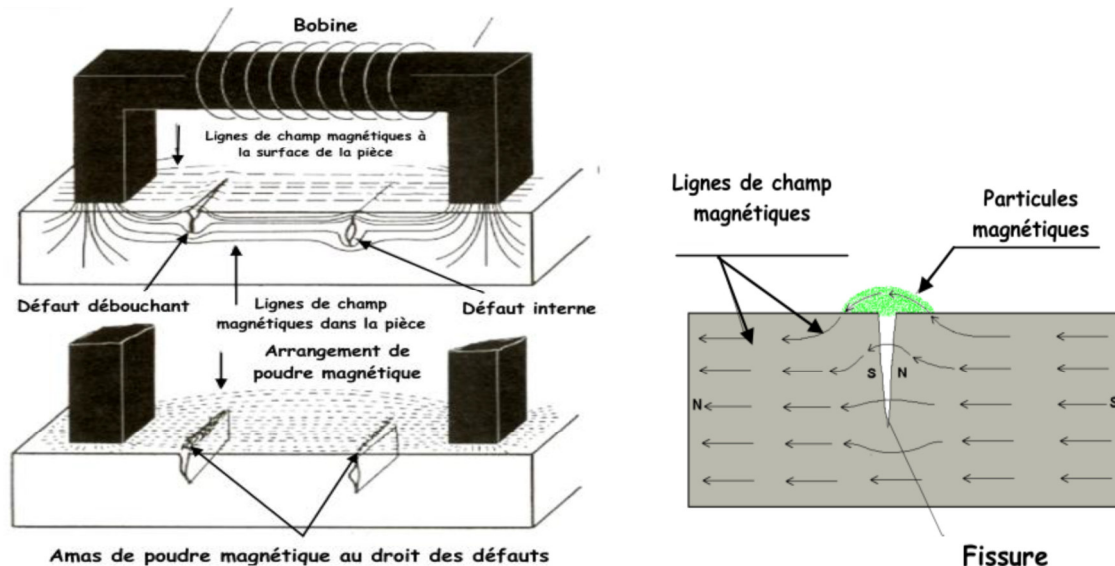


Figure I.3 : Principe des Magnétoscopie

1.2.4 Ultrasons

Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière (défaut) dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités (défauts) à l'aide d'ondes acoustiques. Le contrôle US consiste à observer les échos produits par un manque de matière lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans le matériau.

La vibration est transmise et reçue par un même capteur appelé transducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement. L'impulsion acoustique émise se propage dans tout le matériau et est réfléchi par tout obstacle se trouvant sur son parcours. Le parcours de l'onde ultrasonore définit le faisceau acoustique : il est directif et limité dans l'espace. Il peut être utilisé sur pratiquement tout type de matériau.

Le contrôle de toute la pièce oblige l'opérateur à déplacer le transducteur qui est un dispositif électronique appelé aussi transducteur sur toute la surface de la pièce à contrôler[3].

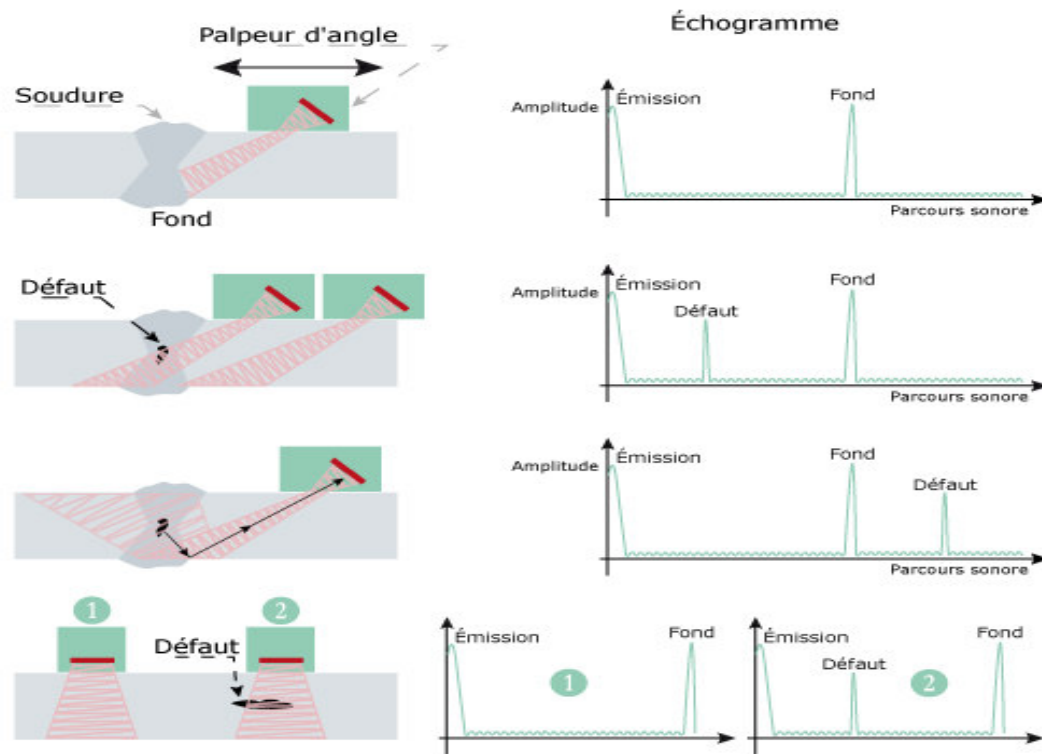


Figure I.4: Principe des ultrasons

1.2.5 Thermographie

La température se mesure à l'aide de thermomètres, par contact ou par rayonnement. La mesure par contact nécessite comme l'indique la définition, un contact entre l'élément dont on veut mesurer la température et l'appareil de mesure. La thermographie fournit à distance et sans contact la cartographie des températures d'une scène observée. La technologie des appareillages qui permettent ce type de mesure a beaucoup évolué.

Actuellement, les caméras thermiques dédiées à la maintenance et à la prévention sont :

- Plus fiables dans leurs images.
- Plus ergonomiques dans leur utilisation (notamment en ce qui concerne l'exploitation des images thermiques sur ordinateur) grâce à la numérisation fine du thermo-signal et au développement de logiciels toujours plus performants.
- Plus flexibles dans leur fonctionnement, de moindre encombrement et de moindre consommation, ces gains étant obtenus grâce aux matrices de détecteurs non refroidies [1].



Figure I.5 : Principe des Thermographie

1.2.6 Radiographie

La radiographie industrielle permet l'examen interne des défauts d'un objet en lui faisant traverser un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (rayons X et γ) et recueillir les variations d'intensité du faisceau sous forme d'image, pour la plus part, sur un film. La quasi-totalité des matériaux peuvent être examinés en radiographie et les épaisseurs peuvent être importantes [3].

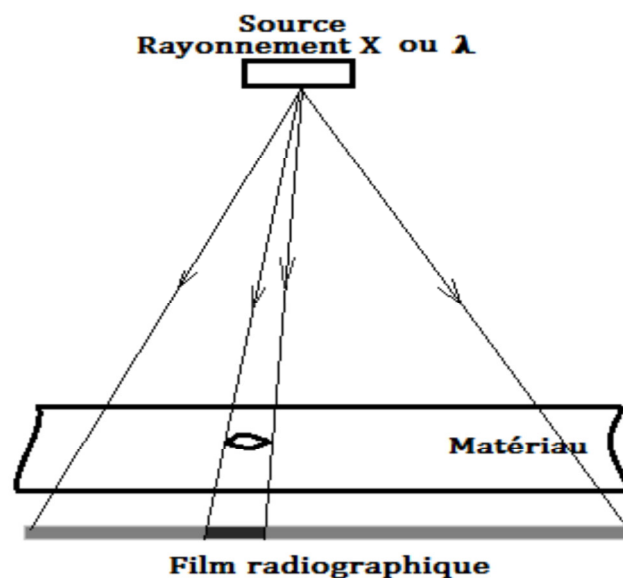


Figure I.6 : Principe des Radiographie

Tableau I.2 : les avantages et les inconvénients de technique du CND [1]

Technique	Avantages	Inconvénients
Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> - Laisse l'utilisateur en dehors de tout danger. - N'affecte d'aucune manière la cible visée. 	<ul style="list-style-type: none"> -Personnel formé -Paramètres d'influence - Equipement couteux
Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en oeuvre possible sur organes montés dans un ensemble. -Très grande fiabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessité d'une bonne préparation des surfaces à contrôler. - Domaine de températures à respecter.
Magnétoscopie	-La méthode est relativement simple de mise en oeuvre, elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacentes et une appréciation de leur longueur.	-La méthode ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.
Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> -Technique possible dans tous les matériaux -Large gamme d'épaisseurs (de quelques fractions de mm à plusieurs centaines de cm) 	<ul style="list-style-type: none"> -Interprétation délicate des images, -Personnel hautement qualifié.
Courants de Foucault	Flexibilité dans le choix de l'équipement pour une grande variété d'applications.CND sans contact. Permet de caractériser le matériau en plus de détecter des défauts.	Restreint aux matériaux conducteurs. Evaluation limitée par la profondeur de pénétration des courants de Foucault. Les défauts parallèles à la bobine ne sont pas détectés

I.3 Le CND par courants de Foucault

Ce type de contrôle s'effectue par un champ magnétique variable, qui embrasse la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur.

En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés, le contrôle en mono fréquence, multifréquences et en mode pulsé [4].

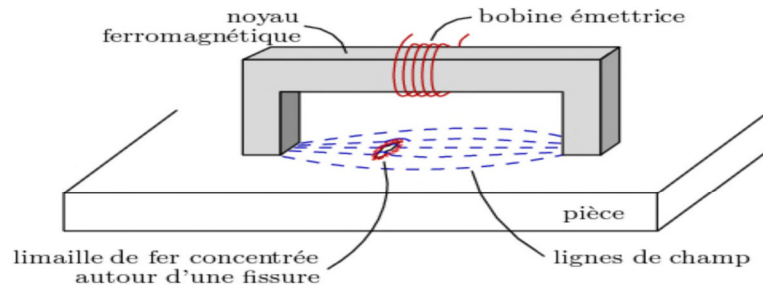


Figure I.7: le contrôle Par courants de Foucault.

I.3.1 Le principe du CND-CF

Les courants de Foucault peuvent être synthétisés de la manière suivante : lorsque l'on place un matériau conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps, des courants induits se développent à l'intérieur de celui-ci sans en altérer les caractéristiques.

Ces courants, créent un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation. Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable crée un champ magnétique variable et, placée en vis-à-vis d'un objet conducteur, donne lieu au phénomène de courant de Foucault.

Le flux magnétique créé par les courants induits modifie la force électromotrice de la bobine et l'analyse de cette variation fournit les informations exploitables pour le contrôle de l'objet. Dès qu'ils rencontrent une fissure, une inhomogénéité, un changement de géométrie, les lignes de courants induits sont déviées, ce qui entraîne une modification du champ de réaction. La figure ci-dessous est une illustration de cette technique de contrôle [4].

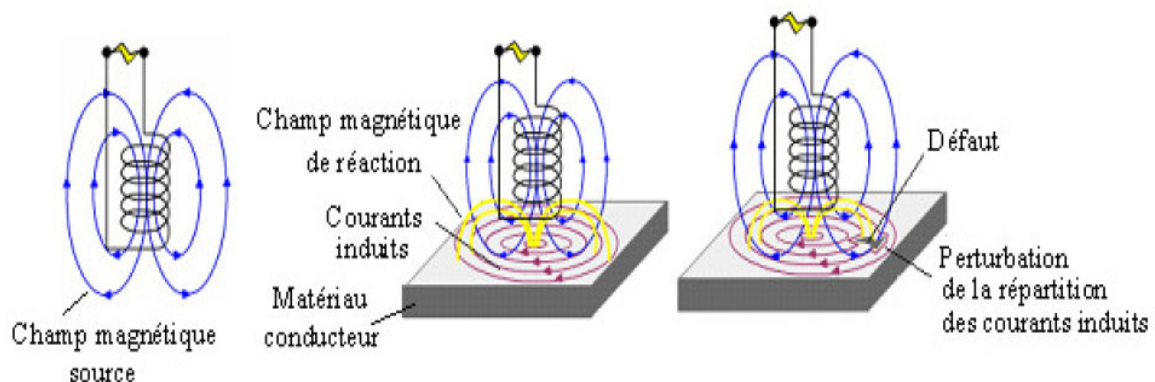


Figure I.8 : Illustration du principe du CND par courants de Foucault .

Le principe de ce procédé consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps de manière à induire des courants dans le matériau. C'est généralement une onde sinusoïdale qui est utilisée. Sa fréquence peut varier suivant la nature des applications envisagées et des points contrôlés, dans une plage comprise entre quelques hertz et plusieurs mégahertz. La sensibilité du procédé pour chaque application est fortement liée au choix de la fréquence qui conditionne la pénétration des courants induits : c'est « l'effet de peau » s'étendant sur une profondeur qui dépend de la perméabilité magnétique absolue du matériau et de sa conductivité électrique.

Les courants induits dans le matériau créés par la circulation d'un courant variable dans la bobine (du capteur) sont appelés courants de Foucault. Les caractéristiques de ces courants dépendent des positions respectives des pièces et des conducteurs, des caractéristiques du matériau (conductivité, perméabilité, forme). Les courants de Foucault induisent eux-mêmes des courants soit dans la bobine placée à proximité, soit dans la bobine excitatrice elle-même. Si un défaut vient perturber la circulation des courants de Foucault, l'induction en retour sur la bobine excitatrice ou sur la bobine de mesure sera elle-même modifiée et l'impédance de cette bobine variera [4].

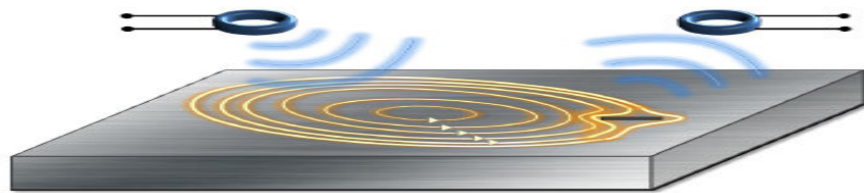


Figure I.9: Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault.

En régime harmonique, on considère une bobine caractérisée par N spires, parcourues par un courant d'excitation $I = I_0 e^{-j\omega t}$ (avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation et f la fréquence), comme montré sur la figure 10. L'impédance de la bobine dans l'air, en Ω , peut être définie par :

$$Z_{bob} = Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (I.1)$$

Avec $X_0 = \omega L_0$. R_0 , X_0 et L_0 sont respectivement la résistance (en Ω), la réactance (en Ω) et l'inductance (en H) de la bobine dans l'air. A proximité d'une pièce conductrice, un champ de réaction s'oppose au champ d'excitation de la bobine, ϕ_0 sur la figure (10), modifiant ainsi la valeur de l'impédance :

$$Z_{bob} = Z_{pièce} = R_{pièce} + jX_{pièce} \quad (I.2)$$

En présence d'un défaut dans la pièce, une variation supplémentaire due à la modification du champ causée par la déviation des courants de Foucault affecte l'impédance de la bobine qui devient :

$$Z_{bob} = Z_{pièce} + (\Delta R_{défaut} + j\Delta X_{défaut}) \quad (I.3)$$

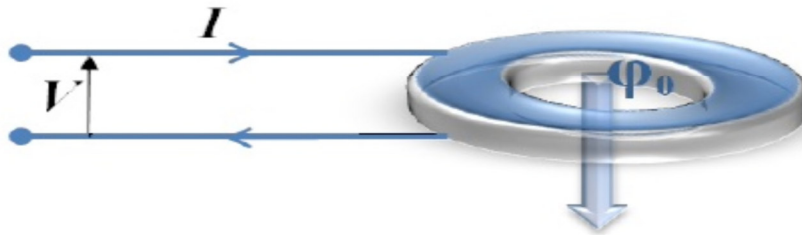


Figure I.10: Bobine parcourue par un courant I et flux magnétique généré par ce courant.

Cette technique est surtout utilisée pour détecter des défauts superficiels dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement à la surface des corps conducteurs, cet aspect est détaillé dans le paragraphe suivant dédié à l'effet de peau. [4]

- L'effet de peau

L'intensité des courants de Foucault dans une cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ (en $S\ m^{-1}$) et une perméabilité magnétique μ (en $H\ m^{-1}$), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelques δ . L'épaisseur de peau est inversement proportionnel à la conductivité, à la fréquence et à la perméabilité magnétique, elle est définie comme suite [4]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\sigma\mu}} \quad (I.4)$$

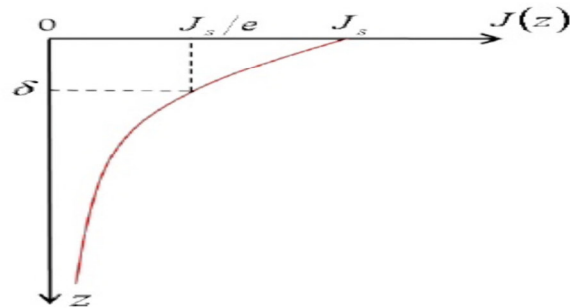


Figure I.11: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z .

I.3.2 Principe physique de CND-CF :

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault (loi de Maxwell Faraday et loi d'Ohm). En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique oppose au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant (excitation et réaction) modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur. Par ailleurs, les courants de Foucault sont importants à la surface de la pièce et s'affaiblissent en allant sur la profondeur. L'utilisation des faibles fréquences peut assurer la capture des défauts profonds. La figure (12) résume le principe de CND par courant de Foucault [4].

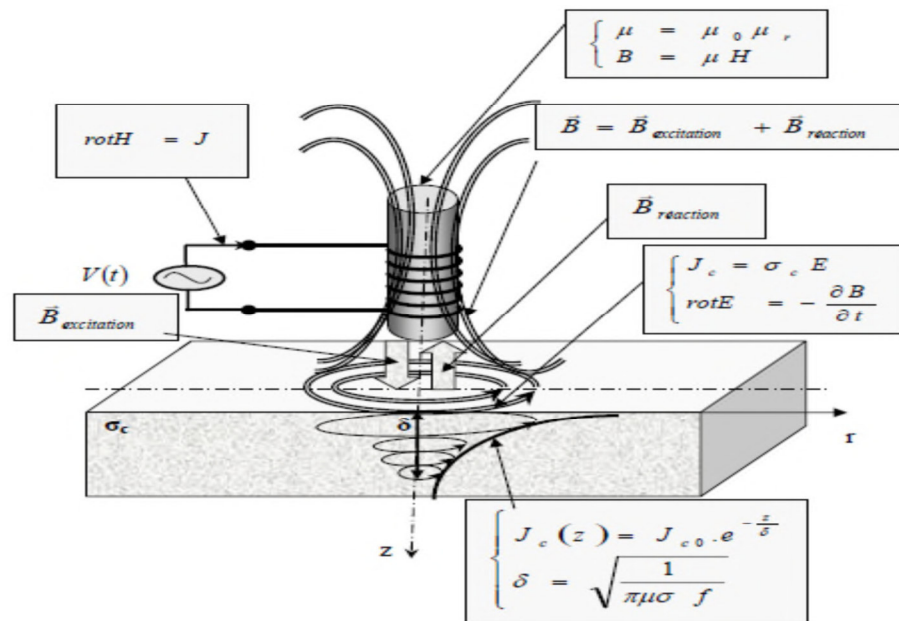


Figure I.12: Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.

I.3.3 Différent types de capteurs

Du point de vue géométrique, on distingue trois types de capteur :

✓ Bobine encerclante

Les bobines encerclantes sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent la pièce à contrôler, ils sont destinés au contrôle des produits long ou des pièces au défilé (tubes, barres,...).

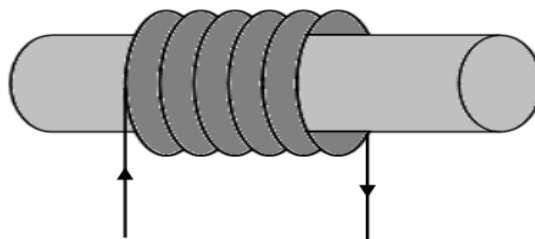


Figure I.13: Représentation d'une bobine encerclant.

✓ Palpeur

C'est une petite bobine qui est destinée à l'examen local d'un produit ou une pièce en se déplaçant sur sa surface.

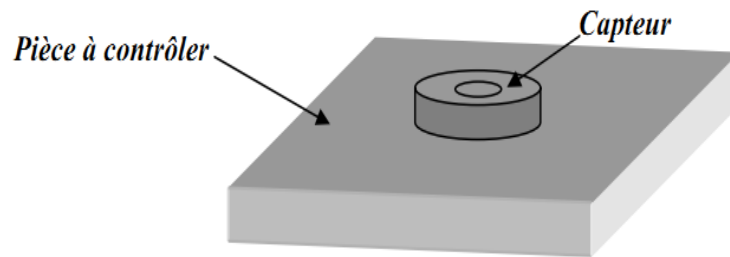
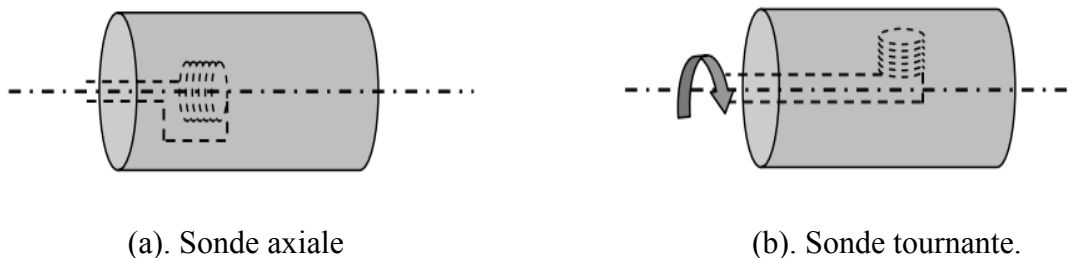


Figure I.14: Représentation d'un palpeur.

✓ Sonde

Elle est destinée à l'examen des tubes par l'intérieur, développée principalement pour l'inspection des tubes des générateurs de vapeur dans les installations nucléaires. Il existe des sondes dites « axiales » pour lesquelles les enroulements sont bobinés autour de leurs axes de translation, et des sondes dites « tournantes » constituées de bobines ponctuelles autour de leurs axes de translation [5].



(a). Sonde axiale

(b). Sonde tournante.

Figure I.15: Représentation d'une sonde.

I.3.3 Modes de fonctionnement des capteurs

On distingue deux modes de fonctionnements des capteurs :

- ✓ Les capteurs à double fonctions, pour lesquels les fonctions d'excitation et de mesure sont assurées par la même bobine.

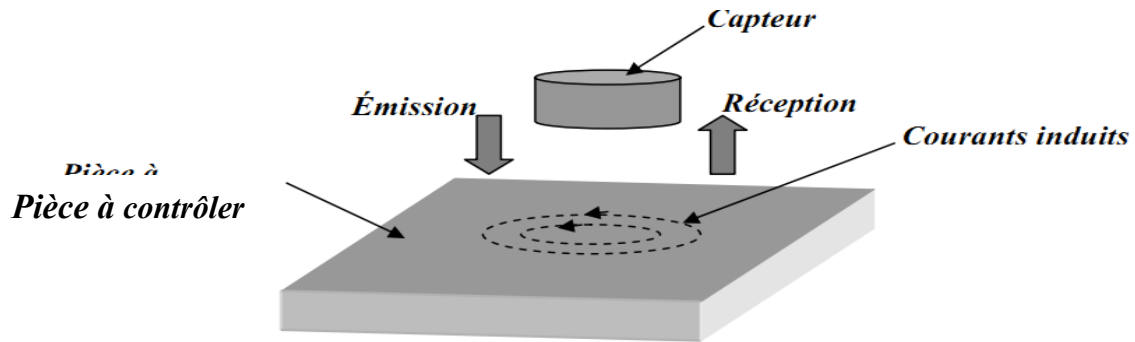


Figure I.16: Représentation d'un capteur à double fonctions.

- ✓ Les capteurs à fonction séparées, pour lesquels les fonctions d'excitation et de mesure sont assurées par des éléments distincts.

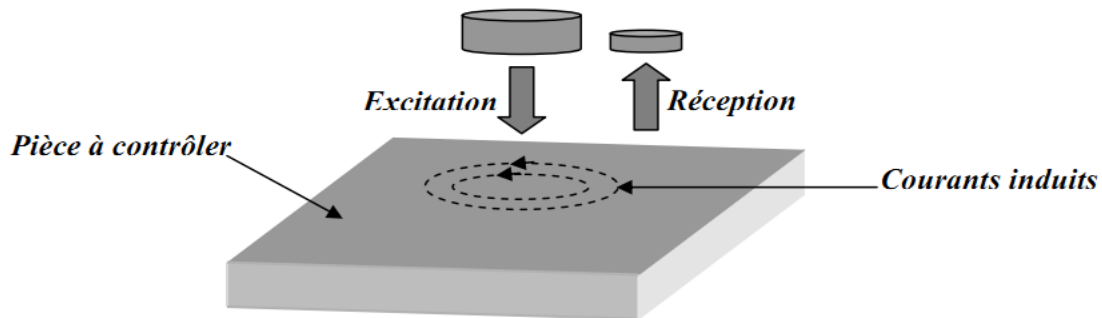


Figure I.17: Représentation d'un capteur à fonction séparée.

I.3.4 Différents modes d'excitation

On distingue trois modes d'excitation :

- ✓ **Excitation mono fréquence**

Les courants de Foucault sont obtenus par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe, le choix de cette dernière dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés.

Pour une fréquence très basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits.

Pour une fréquence trop élevée, font apparaître des phénomènes capacitifs parasites, engendrés notamment par les capacités inter spires du capteur.

✓ Excitation multifréquences

Le contrôle par courant de Foucault multifréquence est très utilisé pour l'inversion des données fournies par le capteur dans le but de déterminer des paramètres du matériau en vue.

Cette méthode consiste à choisir judicieusement les fréquences d'excitation du capteur de manière à recueillir des informations riches et complémentaires sur le matériau à contrôler.

Le principe de la technique multifréquence permet aussi, dans le cas de contrôle difficiles, d'atténuer fortement l'effet des facteurs perturbateurs, ou encore dans d'autres, d'effectuer simultanément la détection de plusieurs types de défauts bien différenciés [5].

✓ Excitation pulsée

L'utilisation de courants pulsés conduit à une technique particulière en courant de Foucault, qui consiste à exciter la bobine sonde par des impulsions plutôt que par un tension sinusoïdale entretenue.

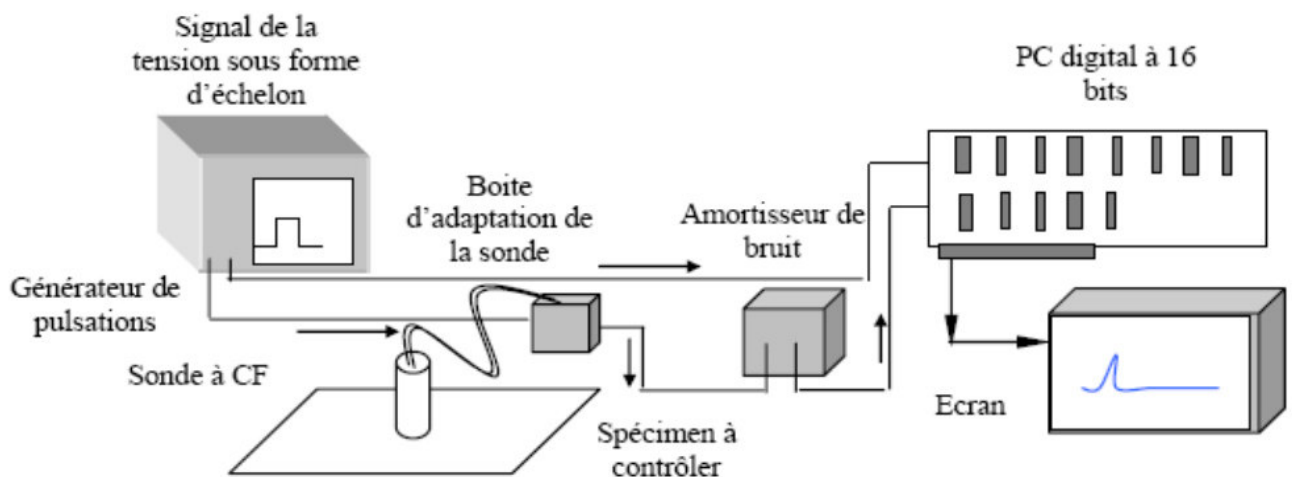


Figure I.18: Représentation de l'appareillage utilisé pour la technique par courant pulsé.

I.3.5. Gammes de fréquences

✓ Gamme basse fréquence [1Hz :1kHz]

Les courants de Foucault à basse fréquence permettent de déterminer l'état global d'une pièce en la mettant au centre de la bobine. Cette technique convient pour le contrôle de produits de forte épaisseur ou le contrôle de qualité (tri de matériaux selon leur nuance à cœur) et les défauts volumiques et profonds. Elle est utilisée préférentiellement pour les

produits ferromagnétiques en raison des problèmes liés à la profondeur de pénétration. C'est une technique très répandue dans l'industrie. Elle est relativement simple à mettre en œuvre, très peu coûteuses, très sensibles aux manques de matière et une résolution spatiale réduite. Néanmoins, si la fréquence est trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la mesure ne sera pas précise à cause du bruit [5].

✓ **Gamme moyenne fréquence [1kHz :1MHz]**

C'est le domaine le plus employé en mesure de faibles épaisseurs, telles que les plaques ou barres co-filées. Ce domaine fréquentiel couvre également le contrôle de santé (détection d'hétérogénéité du type fissures débouchantes, inclusions, occlusion,...) ainsi que le contrôle de caractéristiques métallurgiques (traitements superficiels, conductivités,...) [5].

✓ **Gamme haute fréquence [$>1\text{MHz}$]**

Les fréquences supérieures à 1 MHz sont très peu utilisées. Elles peuvent engendrer des capacités parasites entre les spires du capteur et entre le capteur et le matériau. Son utilisation se limite essentiellement à des mesures d'entrefer, la détection de micro fissure de surface et la modélisation de micro-bobines utilisées dans le domaine de la télécommunication et de la résonance magnétique nucléaire [6].

I.4. Les capteurs et les fréquences utilisées dans les MCFC (CFRP)

En général, les capteurs CF utilisés sont constitués de simples bobines de géométrie circulaire, avec ou sans noyaux de ferrite. Cependant, selon le type de contrôle à effectuer, la structure des CFRPs peut exiger des configurations particulières de capteurs CF. De plus, la faible conductivité de ces matériaux nécessite l'utilisation de fréquences plus élevées que celles utilisées pour l'inspection des matériaux conventionnels. Elles varient d'une dizaine de kilohertz à une dizaine de mégahertz.

Au delà de 10 MHz le rapport signal sur bruit diminue et l'interprétation des résultats de mesure devient difficile [6].

Dans leurs travaux expérimentaux [6], G. Mook et al. ont utilisé un capteur tournant, dont la structure est décrite dans la figure 1.6-a, pour la détection des délaminages et l'orientation des fibres dans les CFRPs. Il s'agit d'un capteur à fonctions séparées dans lequel l'ensemble constitué de la bobine excitatrice (T) et la bobine réceptrice (R) tourne autour d'un axe de révolution. Pour la détection des ruptures de fibres, ces auteurs ont utilisé un simple capteur différentiel dans lequel un noyau en ferrite permet de focaliser le champ magnétique dans le

matériau. Les deux capteurs sont conçus pour fonctionner au-delà de 500kHz. De leur côté, A. Savin, R. Grimberg et al. ont utilisé un capteur à bobines orthogonales, décrit par la figure 1. 25-b, pour la détection des délaminages et l'orientation des fibres dans les CFRPs [6]. La bobine d'excitation est placée à l'intérieur d'une ferrite pour mieux focaliser le champ magnétique dans le matériau. Ce capteur fonctionne à une fréquence de 6MHz.

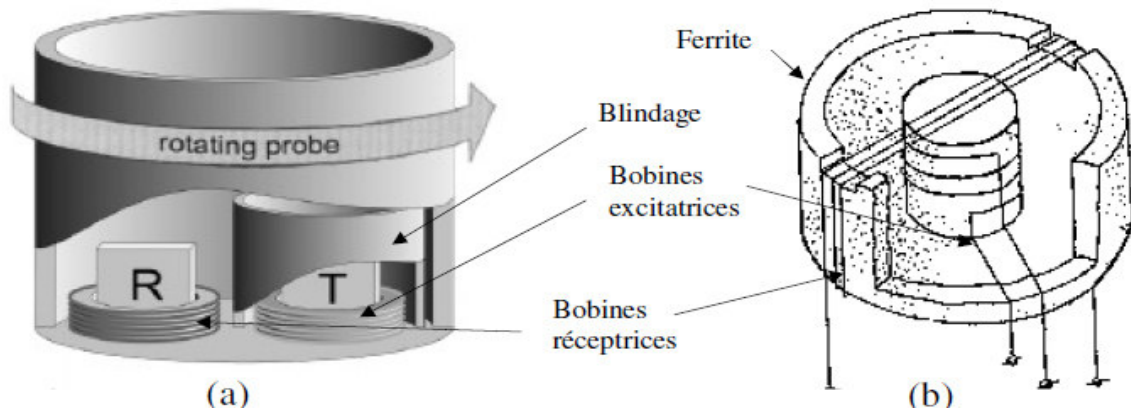


Figure I.19 : Configurations particulières de capteurs CF pour le contrôle des MCFC (CFRP)(a). Capteur tournant, (b). Capteurs à bobines orthogonales.

Récemment les magnétomètres supraconducteurs, appelés SQUIDS « Superconductive Quantum Interference Device », ont été utilisés pour le contrôle des CFRPs [6]. Cette technologie émergente constitue un outil puissant au service du CND par courants de Foucault. En vertu de leur grande sensibilité et leur dynamique élevée, les SQUID sont en mesure de détecter de très faibles perturbations du champ magnétique produites par des anomalies structurelles situées à la surface ou à l'intérieur du matériau testé. Ce type de capteur fonctionne à des fréquences allant de 10Hz à 26kHz [6].

I.4.1 Les grandeurs exploitables

Dans un contrôle mono fréquentiel, selon le type de capteur utilisé, on peut mesurer une tension, un courant ou un champ magnétique.

Lorsqu'on mesure une tension ou un courant, on exploite généralement l'amplitude et la phase du signal mesuré. Cependant, dans ses travaux expérimentaux, X.E. Gros stipule que seule l'amplitude est affectée par la présence d'un défaut dans les CFRPs, tandis que la phase ne change pas de manière significative.

Lorsqu'on mesure un champ magnétique, on s'intéresse aux variations d'amplitude de ses composantes normale et tangentielle à la surface de la pièce testée. Pour éliminer les

perturbations statiques dans l'espace, notamment lorsqu'on a à mesurer des champs faibles, il est préférable de mesurer directement son gradient spatial à l'aide d'un gradiomètre magnétique [6].

I.4.2 La caractérisation des défauts

Tout défaut modifiant de manière significative la répartition des courants induits dans les CFRPs est susceptible d'être détecté par la méthode des courants de Foucault. Les délaminages sont les défauts les moins évidents à détecter, et les avis sont partagés à ce propos. En effet, dans certains travaux on stipule que les délaminages ne peuvent être détectés par la technique des courants de Foucault, du fait que les courants induits circulent dans des plans parallèles à ces délaminages et ne sont donc pas perturbés. S.S. Lane et al. ont conclu que la technique des courants de Foucault ne peut faire qu'une discrimination entre les délaminages avec et sans ruptures de fibres causés par des impacts, en complément au contrôle par ultrasons de ce type de défaut. Cependant, de son côté, X.E. Gros, a pu détecter, expérimentalement, en utilisant un équipement à courants de Foucault standard, des délaminages de 0.01mm sur des pales d'hélicoptères, et des défauts d'impacts entre 0.5 et 0.7 Joules sur des panneaux en CFRPs à cinq plis.

Toutefois, il ne précise pas si ces délaminages sont accompagnés de ruptures de fibres ou non. Dans son travail, G. Mook a pu mettre en évidence la possibilité de détection d'un délaminage par la technique des courants de Foucault. Pour cela, il a réalisé deux stratifiés en CFRPs; le premier est conçu de telle manière à éviter les contacts électriques entre les plis, tandis que le second est conçu de telle manière à établir des contacts électriques entre les plis. En utilisant le capteur à courant de Foucault tournant que nous avons décrit précédemment, il a relevé sur un plan d'impédance des réponses différentes pour les deux stratifiés [6].

I.5 Conclusion

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs.

II.1 Introduction

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations sont le couramment de vieux concepts de la physique.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les lois fondamentales de l'électromagnétisme et le modèle mathématique qui caractérise l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique, et on va également exposer les plusieurs types des méthodes numériques pour le calcul des champs, et également on va expliquer le fonctionnement du logiciel FLUX 2D qui travaille avec la méthode des éléments finis.

Les informations fournies par ce type de simulation nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques.

II.2 Equations de Maxwell :

Les équations de Maxwell sont les modèles mathématiques qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Ces derniers sont décrits par les quatre équations de Maxwell qui lient six grandeurs variables dans le temps et l'espace. Ces équations sont :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Lois de Faraday}) \quad (\text{II-1})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lois d'Ampère}) \quad (\text{II-2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lois de la conservation}) \quad (\text{II-3})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial x} \quad (\text{Théorème de Gauss}) \quad (\text{II-4})$$

Ou :

\vec{H} : est le champ magnétique [A/m]

\vec{E} : est le champ électrique [V/m]

\vec{D} : est l'induction électrique [C/m^2]

\vec{B} : est l'induction magnétique [T]

\vec{j} : est la densité de courant [A/m^2]

ρ : est la densité de charges électriques [C/m^3]

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: exprime la densité de courant de déplacement

II.3 Signification physique des équations de maxwell

II.3.1 Loi induction de FARADAY

L'équation (II.1) est indépendante des sources. Sa forme intégrale est:

$$e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{II-5})$$

Cette équation décrit tous les phénomènes d'induction et montre qu'un champ magnétique variable peut créer un champ électrique à circulation non nulle.

Remarque: Ces équations couplent bien \vec{E} et \vec{B} qui ne peuvent être dans le cas général calculés indépendamment l'un de l'autre [7].

II.3.2 Lois d'Ampère:

L'Equation (II.2) relie le champ magnétique à ses sources et au champ électrique. Sa forme intégrale est :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{j}_s \cdot d\vec{s} \quad (\text{II-6})$$

En régime stationnaire, nous retrouvons le théorème d'Ampère qui montre que le champ \vec{B} tourne autour des courants. Le terme supplémentaire en $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ t'indique qu'un champ électrique variable est source de champ magnétique [7].

II.3.3 La loi d'Ohm :

Elle lie le champ électrique \vec{E} à la densité de courant électrique dans un milieu donné, à travers la conductivité σ , cette loi est donnée par la relation suivante :

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-7})$$

Dans un milieu statique avec courant de source, l'équation (II-18) devienne :

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (\text{II-8})$$

Dans un milieu en mouvement :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) + \vec{J}_s \quad (\text{II-9})$$

Avec :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_s \quad (\text{II-10})$$

Et :

σ : est la conductivité électrique $[\Omega \cdot m]$.

\vec{J}_s : est la densité de courant source donnée en $[A/m^2]$.

\vec{J}_{ind} : est la densité des courants induits exprimée en $[A/m^2]$.

\vec{E} : est le champ électrique induit.

\vec{v} : est vitesse de déplacement du milieu en mouvement $[s \cdot m^{-1}]$.

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique, et le terme $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ représente le courant induit résultant du mouvement [5].

II.3.4 Lois de la conservation

L'équation (II.3) est indépendante des sources. Sa forme intégrale est obtenue en écrivant :

$$\iint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (\text{II-11})$$

Le flux de \vec{B} à travers toute surface fermée est nul. C'est une propriété intrinsèque de \vec{B} qui montre que le champ magnétique ne peut diverger à partir de points de l'espace, ou encore qu'il n'existe pas des charges magnétiques. Nous retrouvons là en fait la même équation qu'en régime stationnaire [7].

II.3.5 Théorème de GAUSS :

L'équation (II.4) relie le champ électrique à ses sources. Sa forme intégrale est :

$$\iint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_s} \quad (\text{II-12})$$

Ce résultat qui exprime que le flux du champ électrique à travers toute surface fermée est égal à la somme des charges intérieures sur ϵ_0 est connu sous le nom de théorème de Gauss. Il montre que le champ électrique peut lui diverger à partir de points où se trouvent des charges électriques. Le « théorème de Gauss » est donc vrai en régime variable [7].

II.4 Modèles en électromagnétiques

Les Modèles de J.C MAXWELL décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais, suivant les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables parmi ces modèles nous citons [7].

La modélisation d'une machine supraconductrice moteur synchrone à inducteur *SH Tc* fait appel à l'étude du modèle magnétodynamique. [7]

Modèle en électromagnétiques sont :

- Le Modèle Electrostatique
- Le Modèle Electrocinétique
- Le Modèle Magnétostatique (scalaire, vectorielle)
- Le Modèle Magnétodynamique

➤ **Modèle électrostatique :**

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas du temps en régime stationnaire (cas de courant continu) de ce faite le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-13})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\begin{cases} \text{div } \vec{D} = \rho \\ \text{rot } \vec{E} = \vec{0} \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

La relation $\text{rot } \vec{E} = \vec{0}$ permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V, telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II-15})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{div} (\varepsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II-16})$$

➤ **Modèle électrocinétique :**

Ce modèle est utilisé dans l'étude de la répartition du courant électrique de conduction dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues. Il est régit par les équations [7].

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} = \vec{0} \\ \text{div } \vec{J} = \vec{0} \\ \vec{D} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

La relation: $\text{rot } \vec{E} = \vec{0}$ montre qu'il existe encore un potentiel électrique scalaire U (tension électrique), tel que $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$

Le modèle se ramène alors à :

$$\operatorname{div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}}(U)) = 0 \quad (\text{II-18})$$

➤ **Modèle magnétostatique scalaire**

Dans ce modèle, on admet que les courants électriques sont négligeables dans la pièce étudié que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps, [7]

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

On aboutit aux relations suivant :

$$\overrightarrow{\operatorname{div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-19})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} = 0 \quad (\text{II-20})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II-21})$$

Dans ce cas le champ dérive d'un potentiel magnétique scalaire (φ)

$$\vec{H} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}}(\varphi) \quad (\text{II-22})$$

Les équations de ce modèle sont regroupe pour former l'équation globale suivant :

$$\operatorname{div}(\mu \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\varphi)) = \operatorname{div} \vec{B}_r \quad (\text{II-23})$$

Ce modèle pose peu de problèmes particuliers et la technique actuelle le permet de la traite dans les tridimensionnels complexes [7].

➤ **Modèle magnétostatique vectorielle**

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est alors nul et les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} sont découplés, par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls [7].

On obtient alors les équations suivantes :

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II-24})$$

$$div\vec{B} = 0 \quad (\text{II-25})$$

$$\vec{B} = \vec{B}_r + \mu\vec{H} \quad (\text{II-26})$$

La relation $div\vec{B} = 0$ permet de définir une fonction vectoriel \vec{A} appelée potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = rot\vec{A} \quad (\text{II-27})$$

Pour que cette fonction soit totalement définie, il faut également fixer sa divergence, on ajoute alors la condition :

$$div\vec{A} = 0 \quad (\text{II-28})$$

Cette condition est appelée JAUGE DE COULOMB

D'où le système d'équation est :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot}\vec{A} \right) = \vec{j} + \overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{B}_r \right) \quad (\text{II-29})$$

➤ Modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme $\frac{d\vec{B}}{dt}$ n'est pas nul, les champs électriques et magnétiques sont alors couplés par la présence des courants induits [7]. Pour représenter l'état électromagnétique en un point, on doit alors faire recourt au potentiel vecteur \vec{A} car $div\vec{B} = 0$; les avantages présentés par ce type de formulation sont nombreux : C'est la plus utilisée et elle réduit le nombre d'inconnues.

Elle permet d'imposer des sources électriques par les bobines.

La connaissance de toute autre grandeur physique peut être déduite.

La première équation indique que l'induction magnétique \vec{B} est un champ rotationnel. Ceci implique qu'il existe un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\begin{cases} \vec{B} = \text{rot } \vec{A} \\ \text{rot } \vec{H} = \vec{J} \\ \text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\overrightarrow{\text{vrot}} \vec{A}) + \delta \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II-31})$$

C'est à partir de ces équation de base de ce modèle que nous pouvons déterminer l'équation décrivant l'évolution des prénommement électromagnétique. L'utilisation de ce modèle est très réponde dans l'étude des machines électriques, des transformateurs, etc....[7].

II.5 Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique

A partir de l'équation du flux magnétique, on définit le potentiel vecteur magnétique \vec{A} par l'équation suivante.

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{II-32})$$

En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire U est nul, donc, tout vecteur $\vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}} U$ satisfait la relation $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$ d'où la nécessité d'imposer une condition de Jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la Jauge de Coulomb $\overrightarrow{\text{div}} \vec{A} = 0$.

Dans le cas général, il existe une infinité de vecteur \vec{A} pouvant satisfaire la relation $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$.

$$\text{rot } \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial(\text{rot } \vec{A})}{\partial t} = -\text{rot} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II-33})$$

Ce qui implique que :

$$\text{rot } \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II-34})$$

Le champ $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$ de l'équation (II.17) est conservatif, donc à partir de cette relation, on peut définir un potentiel scalaire U tel que:

$$(\vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}) = -\overrightarrow{grad} U \tag{II-35}$$

On a aussi :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \delta \vec{E} \quad \text{Donc} \quad \delta \vec{E} = \vec{J} - \vec{J}_{ex} = -(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}) + \overrightarrow{grad} U \tag{II-36}$$

D'autre part, on a : $\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$ mais :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \text{rot} \quad \rightarrow \quad \text{rot}(\frac{\vec{B}}{\mu}) = \vec{J} = \frac{1}{\mu} \text{rot} (\text{rot } \vec{A})$$

Donc

$$\frac{1}{\mu} \text{rot} (\text{rot } \vec{A}) = \vec{J}_{ex} - (\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) + \overrightarrow{grad} U + \delta (\vec{V} \nabla \vec{B}) \tag{II-37}$$

$$\frac{1}{\mu} \text{rot} (\text{rot } \vec{A}) + \delta (\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) - \delta (\vec{V} \nabla \vec{B}) = \vec{J}_{ex} - \overrightarrow{grad} U \tag{II-38}$$

$$\vec{J}_{ind} = \delta \vec{E} + \delta (\vec{V} \nabla \vec{B}) \quad \rightarrow \quad \vec{J} = \vec{J}_{ex} + \vec{J}_{ind} \tag{II-39}$$

Les termes $(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t})$ et $\delta (\vec{V} \nabla \vec{B})$ représentent les densités des courants induits. Ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques, pour la pompe MHD à conduction proposée, le champ magnétique imposé est constant ; donc le premier terme 'annule. $(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t})=0$ Puisque la pompe est alimentée avec courant continu. [7]

Le terme $-\delta (\overrightarrow{grad} U) = \vec{J}_a$ décrit la densité du courant imposée à travers les électrodes. U représente le potentiel scalaire électrique en Volts.

Pour pouvoir résoudre l'équation (II.22), on ajoute une autre équation pour que la solution soit unique. On fixe la divergence de \vec{A} (jauge de Coulomb) :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \tag{II-40}$$

Le modèle électromagnétique de la pompe sera comme suit :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} A \right) + \delta \overrightarrow{\text{grad}} U - \delta (\overrightarrow{V} \nabla \overrightarrow{B}) = \overrightarrow{J}_{\text{ex}} \\ \text{rot } \overrightarrow{A} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-41})$$

II.6 Les méthodes numériques utilisées pour le calcul des champs

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisant les problèmes physiques, lorsqu'il s'agit de calculer des effets dont les causes (densité du courant (tension), densité de la puissance dissipée) sont connues à l'avance. Ces méthodes sont :

- Les méthodes analytiques.
- les méthodes numériques.

Les méthodes analytiques, s'avèrent d'applications très difficiles dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux, dans des conditions de fonctionnement optimales, présentent des non linéarités physiques, donc mathématiques.

L'apparition des ordinateurs, de grandes puissances, a mis en valeur l'intérêt des méthodes dites numériques. Celles-ci font appel à des techniques de discrétisation.

Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points situés aux noeuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation. Parmi ces méthodes, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, la méthode des intégrales de frontières et la méthode des circuits couplés,... etc [8].

II.6.1 Méthode des Différences Finis (MDF)

La (MDF) est basée sur un maillage du domaine d'étude et le développement limite en série de TAYLOR de la fonction à déterminer, en chacun des noeuds.

L'écriture de cette transformation pour tous les noeuds du maillage. Conduit à un système algébrique dont la solution permet d'obtenir la distribution de l'inconnu dans le domaine d'étude.

La mise en oeuvre de cette méthode est simple, mais elle s'adapte mal aux objets de géométrie complexe à cause de la « rigidité » du maillage. D'autre part, la prise en compte des conditions de passage d'un milieu physique à un autre (Fer - air) par exemple et des non linéarités (saturation ...), nécessite un traitement spécifique [7].

II.6.2 Méthode des Volumes Finis (MVF)

La MVF se déduit à partir de la MDF. Le domaine d'étude (Ω) est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies).

L'EDP est intégrée sur chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs [8].

II.6.3 Méthode des Eléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) sur tout dans les géométries complexes et quelques soient les conditions physiques de fonctionnements.

A la différence avec la MDF, la MEF consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue pour transformer les EDP en équations algébriques. Toutefois, cette méthode ne s'applique pas directement aux EDP, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes :

- La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement, l'énergie du système étudié. Cette méthode n'est donc applicable que si on connaît une fonctionnelle équivalente au problème différentiel que l'on veut résoudre.
- La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.

A l'une ou à l'autre des deux méthodes, on associe une subdivision du domaine d'étude, en éléments simples, appelés éléments finis et à approximer la fonction inconnue sur chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de degré un, ou deux [8].

II.7 LE PRINCIPE DE LA METHODE DES ELEMENT FINIS

Le principe de la méthode des éléments finis est défini sur le partition du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie appelé élément fini. Le vecteur potentiel, dans un élément peut être approximé par des fonctions d'interpolation linéaire ou parabolique. Ces fonctions d'interpolation doivent assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'interpolation du potentiel dans un élément sont des d'interpolation parabolique. Pour un élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{II-42})$$

Pour les éléments quadrilatéraux, on a:

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II-43})$$

Les constantes a, b, c et d sont à déterminer en utilisant les potentiels aux nœuds correspondants. Le potentiel A_e est défini sur l'élément et nul ailleurs. La valeur approximée du potentiel dans tous les éléments du domaine de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (\text{II-44})$$

e : Numéro d'élément.

n_e : Le nombre totale des éléments du domaine.

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Figure. II.1).

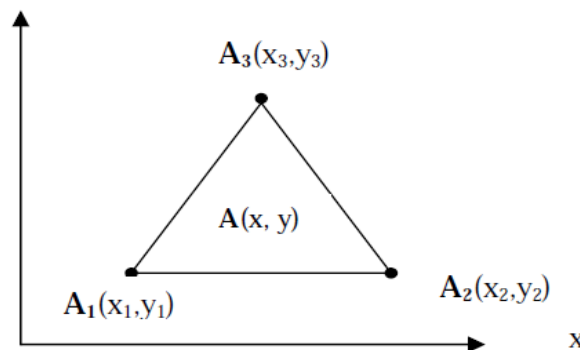


Figure II.1 : fonction d'interpolation d'un élément

II.8 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure maniable où les différentes étapes de résolution peuvent être décrites comme suit [7].

- introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- Maillage
- résolution.

- exploitation des résultats.

Et qui sont séquentiellement exécutées.

Les modules correspondant à ces étapes doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée du domaine d'étude pourra être traitée sous plusieurs cas où seules les sources d'alimentation en courant ou tension avec les conditions aux limites sont à modifier. On peut faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

La méthode des éléments finis permet de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources.

II.9 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D

En s'inspirant du guide du logiciel flux2d, on peut donner une petite introduction de ce logiciel . C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

- Module **Construction (Preflux)** Il contient trois fonctions :
 - **(geometry & physics)** ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.
 - **(Circuit)** définit le schéma et les données du circuit électrique.
 - **(Materials database)** permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

- Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

➤ **Module Solving Process**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (**Direct**) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

➤ **Module Analyses**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

L'enchaînement de ces modules de Flux 2D est schématisé par la figure II.2.

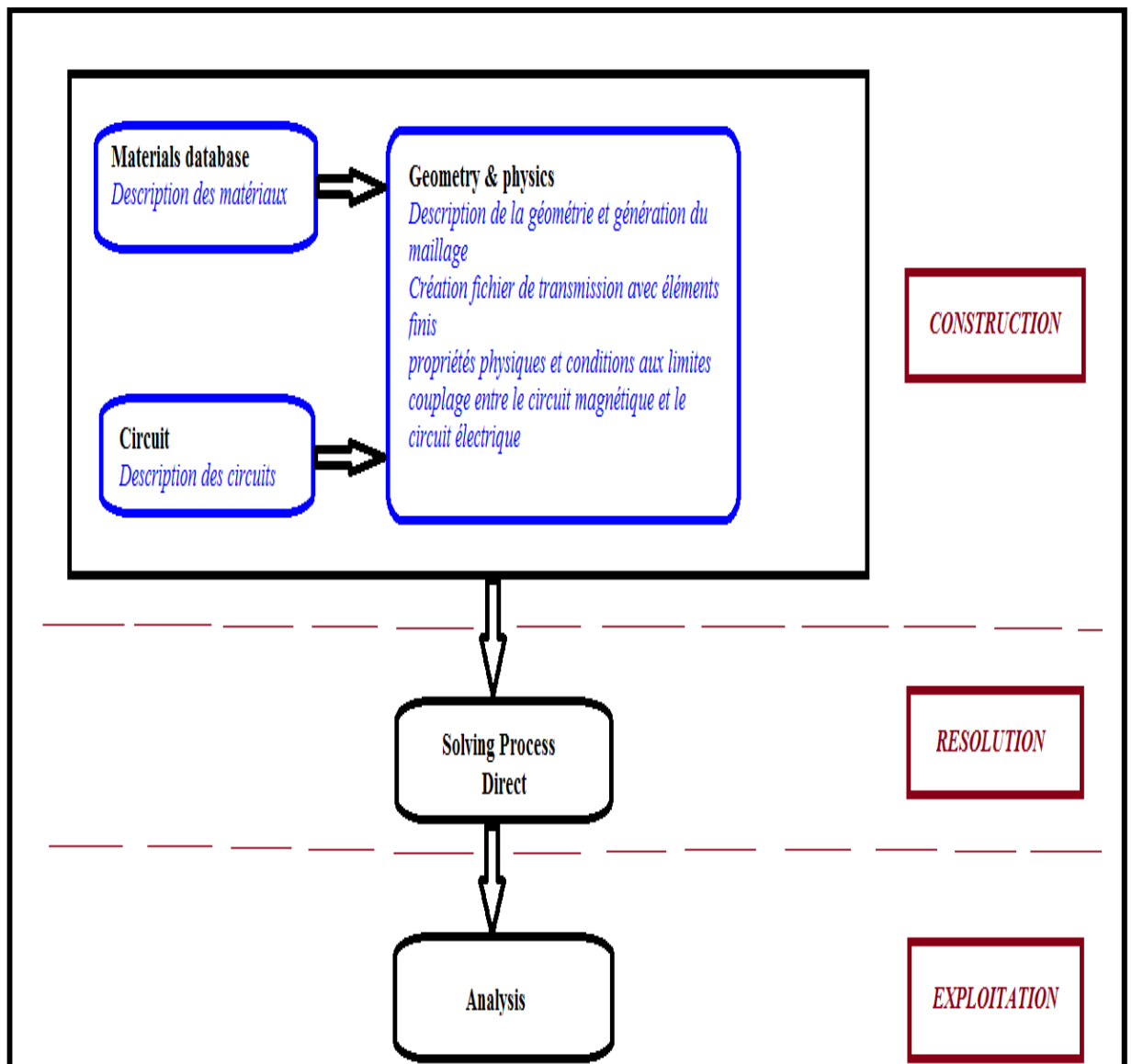


Figure II.2 : l'enchaînement des programmes de Flux 2D

II.10 Les données du dispositif de étudiée

La figure présente la géométrie du dispositif étudié et ses dimensions. Elle représente le stator triphasé qui interagit avec une conduite de forme cylindrique en acier magnétique représentant le pipeline.

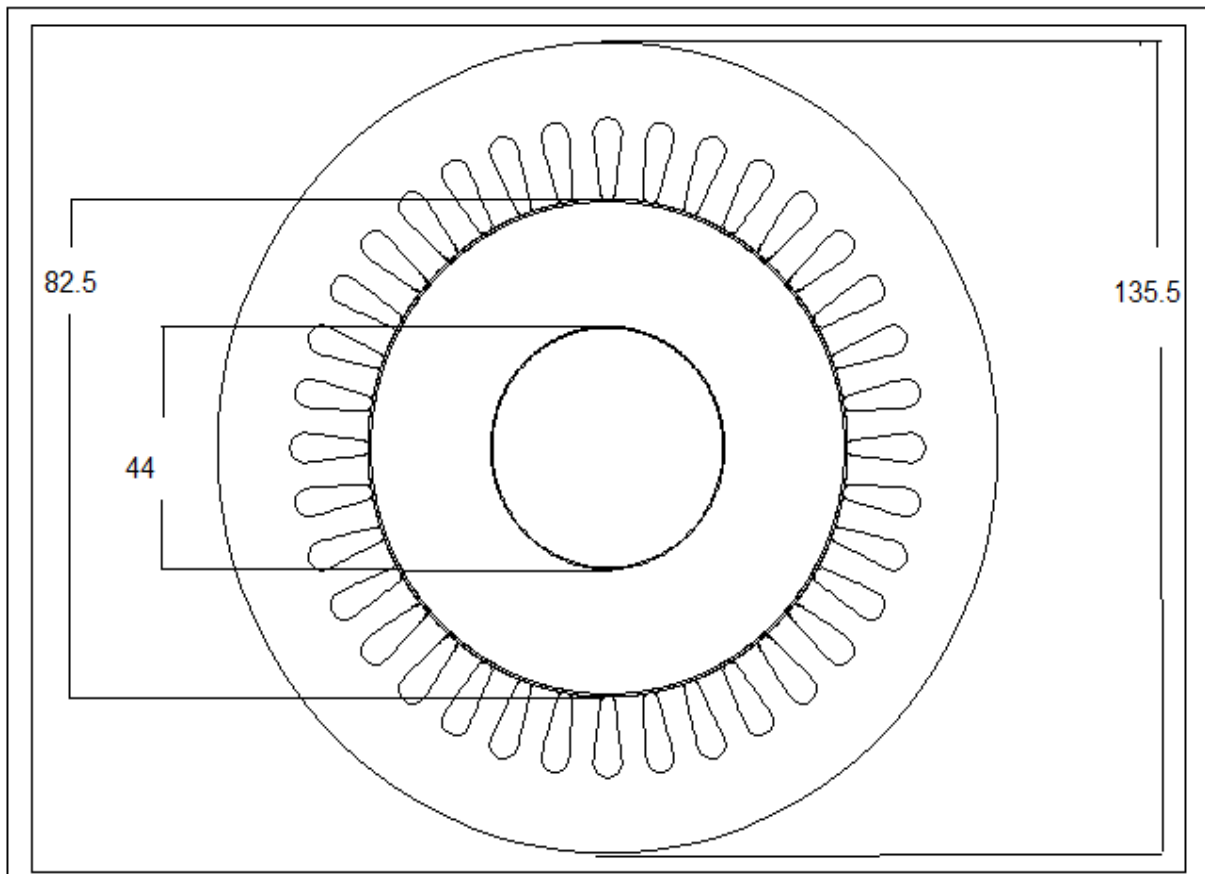


Figure II.3 : géométrie de la machine étudiée.

La figure représente la description détaillée des régions du dispositif pour le calcul électromagnétique dans le logiciel flux2d avec le bobinage statorique.

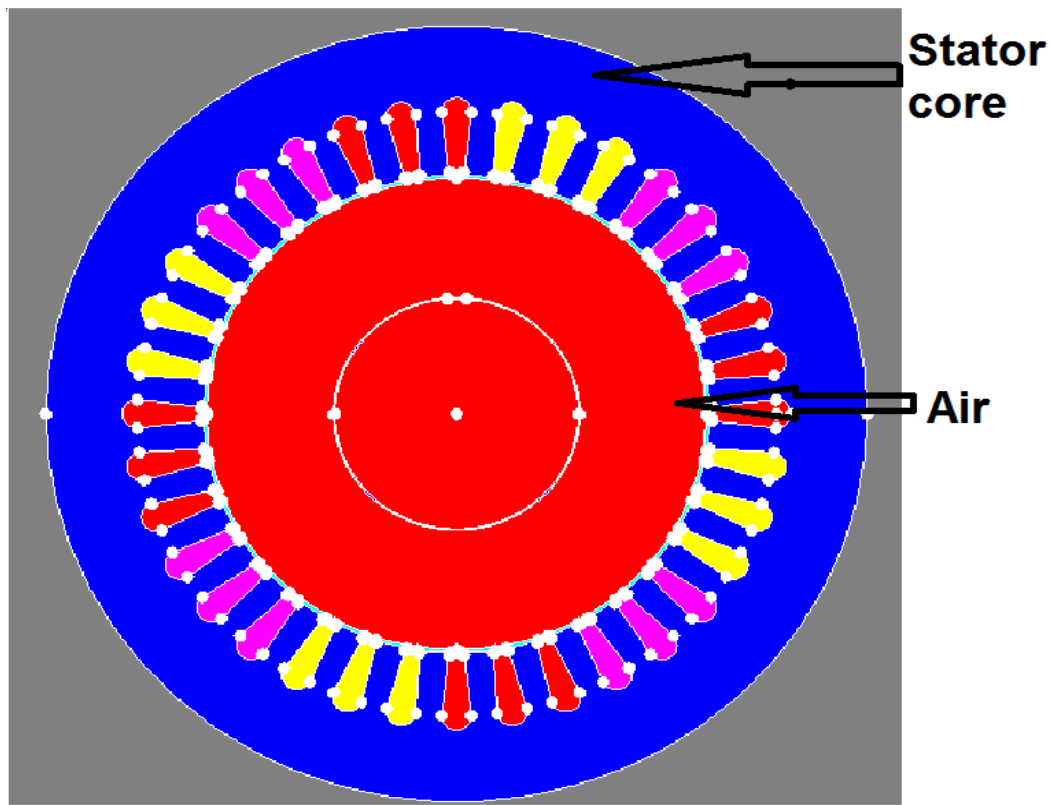


Figure II.4 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.

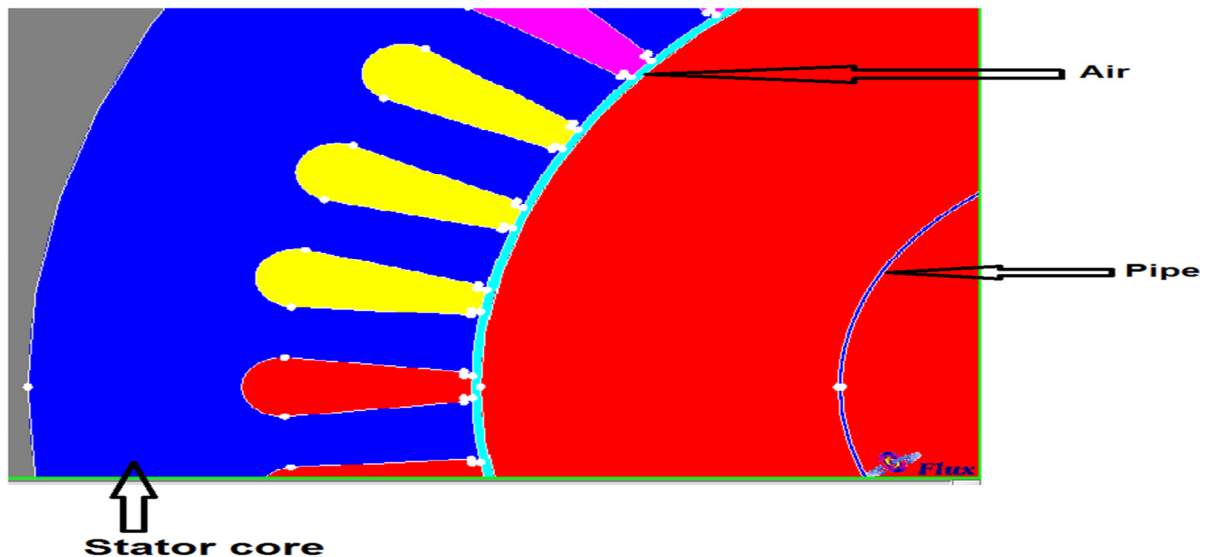


Figure II.5 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.

Les caractéristiques du dispositif étudié sont données au tableau suivant :

Tableau II.1 : Paramètres globales du dispositif

Partie	Paramètres	Valeurs
Dispositif de machine	Puissance	1.1 Kw
	Tension	380 V
	Couplage	Δ
	Courant	2.8 A
	Vitesse	1405 tr/min
	Fréquence	50 Hz
	Nombre de pole	4
	$\text{Cos}\varphi$	0.82
	Rendement	75
	Φ de fil	0.6/isole 0.661
	Nombre de spire	66
	Nombre de faissea	3
	Nombre de bobine	6
STATOR	Nombre de phases	3
	Nombre d'encoche	36
	Diamètre extérieur	135 mm
	Diamètre intérieur	82.5 mm
	Résistance par phase	21.5 Ω
TUBE	Diamètre extérieur	20.25 mm
	Diamètre intérieur	20 mm
ENTREFER	Epaisseur	21 mm

II.10.1 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

Pour simplifier la méthode de construction, on commence par faire entrer des paramètres et des systèmes de coordonnées pour le modèle puis schématiser la première encoche statorique et la première partie de la tôle. Le reste de la géométrie et du maillage est créé par propagation

Les paramètres à entrer représentent les dimensions des différentes parties du dispositif, mais sont indépendants d'aucune unité de mesure. L'intérêt de ces paramètres est qu'ils simplifient l'entrée du problème et les modifications dans la géométrie par définition des coordonnées des points en fonction de ces paramètres, par exemple, on définit le diamètre intérieur de stator comme (DIS) et si on veut le changer il suffit de changer son paramètre, Flux2D vas automatiquement mettre à jour les points et les lignes correspondants à ce paramètre et le maillage. Sans ce paramètre il faut redéfinir les coordonnées de chaque point et chaque ligne cités à cette distance ainsi que le maillage.

Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle de la tôle et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construits par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure de la tôle et celle extérieure de stator.[8]

II.10.2 Génération du maillage:

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le module **Preflux**, mais le size du maillage peut être contrôlé par création des points et des lignes du maillage puis l'association de ces derniers aux points de la géométrie. Preflux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps.

La figure si dessous représente la géométrie avec les points du maillage.

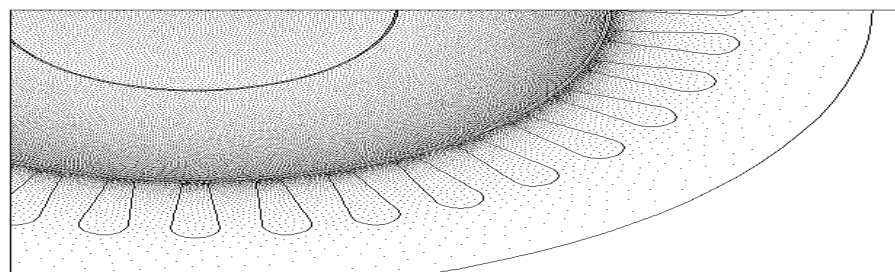


Figure II.6: Les points de maillage

La figure si dessous représente le maillage

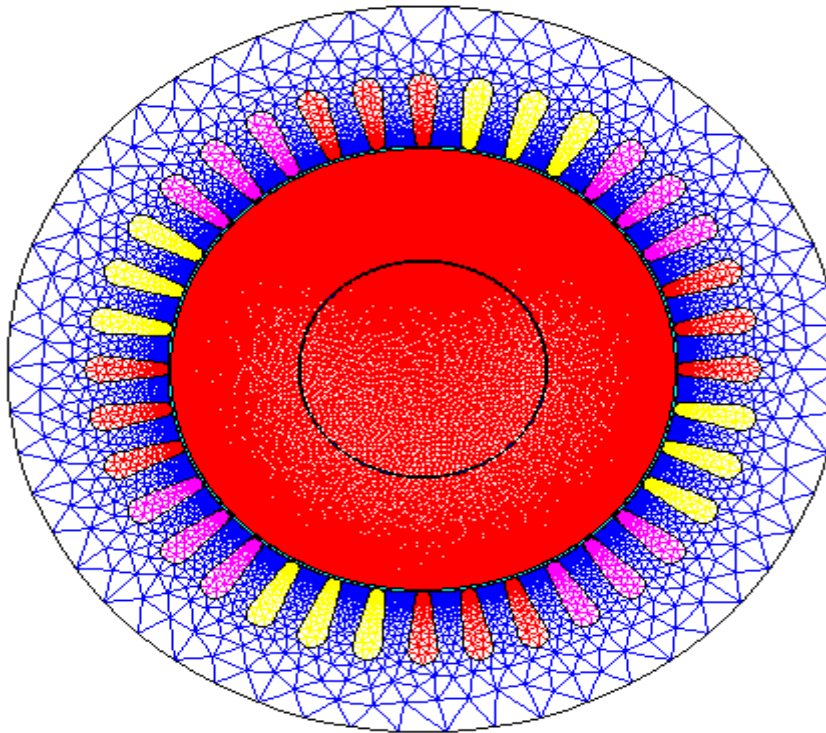


Figure II.7: Répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul [9].

➤ **Création des matériaux**

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : IRON (défini comme un matériau ferromagnétique non linéaire), l'Aluminium et l'air.

L'aluminium est défini comme un matériau linéaire par une résistivité et une perméabilité relative constante. Il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres propriétés (propriétés thermiques par exemple) parce qu'ils ne sont pas prises en compte pour notre cas (analyse magnétique).

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques $B(H)$ [9].

Tableau II.2: B(H) du matériau magnétique AZAZGA.

H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]
0	0	138	1.107	383.3	1.449	1734	1.639
55.5	0.050	175.3	1.220	492.2	1.487	2359	1.678
64	0.088	222.9	1.297	659.2	1.524	3229	1.717
89.2	0.390	258.3	1.335	915	1.562	4432	1.756
110.8	0.730	311.6	1.373	1254	1.600	5785	1.795

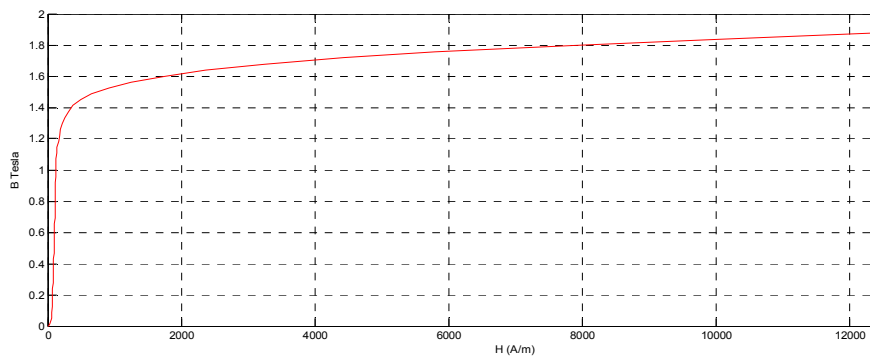


Figure II.8:Caractéristiques B(H) du matériau magnétique AZAZGA.

II.11. Le circuit électrique

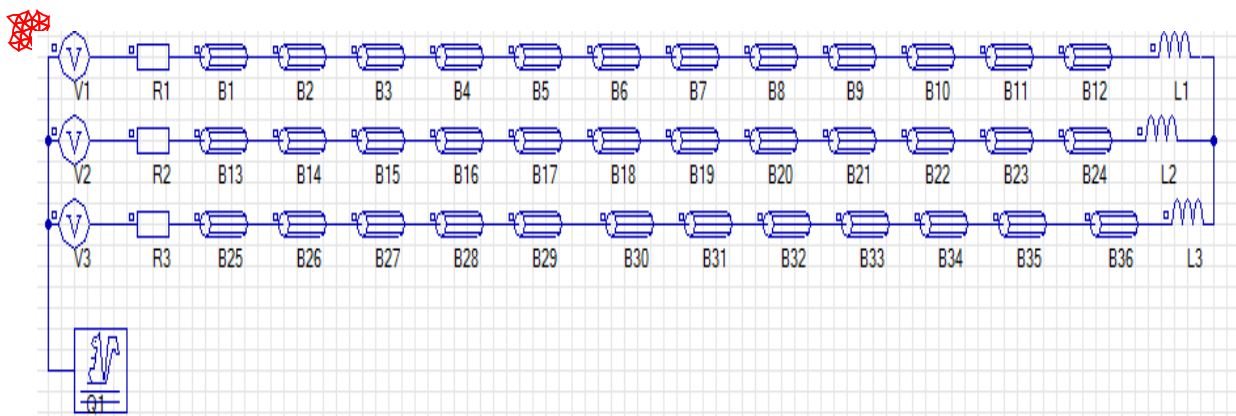


Figure. II.9 . CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations.

➤ **Les paramètres du circuit électrique qui aimanté la machine a simulé**

$$R1, R2, R3 = 0.7 \Omega$$

$$L1, L2, L3 = 0.019 \text{ (mH)}$$

$$B1..12, B13..24, B25..36 = 0.5775 \Omega$$

$$R \text{ cage d'écureuil} = 1.47E-6 \Omega$$

$$L \text{ cage d'écureuil} = 2.6E-9 \text{ H}$$

$$V1 = 380 * \sin(314.159 * \text{TIME} + 0)$$

$$V2 = 380 * \sin(314.159 * \text{TIME} - 2.094)$$

$$V3 = 380 * \sin(314.159 * \text{TIME} + 2.094)$$

➤ **Les propriétés physiques et régions**

Le problème étant défini par une application magnétique de 2D en magnéto-transitoire (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés précédemment sont importés.

Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

- **Fixé** : définit les parties fixes du modèle.
- **En mouvement** : définit les parties du modèle qui sont en mouvement.
- **Compressible** : définit les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

Le couplage entre la géométrie du modèle et le circuit d'alimentation est effectué par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est défini par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondent dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble mécanique. Puis ces régions sont associées aux surfaces de la géométrie par la commande (**assign regions to faces**).[8]

II.12 Résultats de simulation par la magnétodynamique

➤ **Avantage :**

- Simplicité de mise en œuvre.
- Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive
- La prise en compte des courants induits.

➤Inconvénients :

- Utilisation possible uniquement pour le régime permanent.
- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.

II.13 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique et numérique qu'on a utilisé pour modéliser le dispositif de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell.

Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé (Flux 2d), on a cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

III.1 Introduction

Le contrôle non destructif employant les courants de Foucault est très employé pour les matériaux conducteurs non magnétiques (Cuivre, Aluminium, etc.) mais si on veut l'employer pour les matériaux conducteur et magnétique comme l'Acier par exemple, la technique devienne très difficile. Et cette technique devienne inutilisable si on l'utilise dans les matériaux uniquement magnétiques car il y'aurait absence total des courants induit ou de Foucault et on emploi dans ce cas la magnétoscopie. Dans ce travail, on va utiliser une technique qui va prendre en compte les matériaux qui ont en même temps les propriétés conductrice et magnétique et leurs diagnostics non destructifs (CNDem).

Dans ce chapitre, on va comparer les résultats expérimentaux avec les résultats numériques et on va introduire la technique de contrôle non destructif électromagnétique CNDem dans les dispositifs magnétiques conducteurs et magnétiques en utilisant la technique du champ tournant électromagnétique *FRem*. Cette technique comme on va découvrir va nous permettre une bonne détection des défauts.

III.2. Description de la technique *FRem*

La technique *FRem* vient surmonter le problème du contrôle non destructif par courant de Foucault par l'utilisation du champ tournant électromagnétique. L'augmentation de la fréquence au domaine des kHz n'aura pas d'importance dans cette technique et l'emploi de la fréquence industrielle est largement suffisant. Le stator d'un moteur asynchrone triphasé de marque Azazga 1.1 kW, 380V, 50 Hz en triangle est utilisé comme source de champ électromagnétique tournant (FigureIII.1).

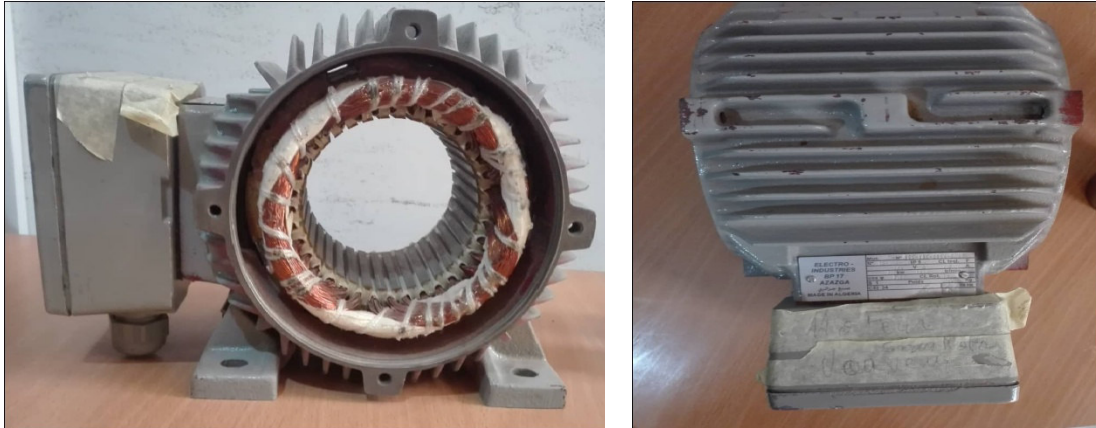


Figure III.1 : machine de AZAZGA

Pour valider les résultats de cette technique, des tests ont été entamés sur une pièce magnétique et conductrice de forme cylindrique comportant une fissure complète (Figure III.2)

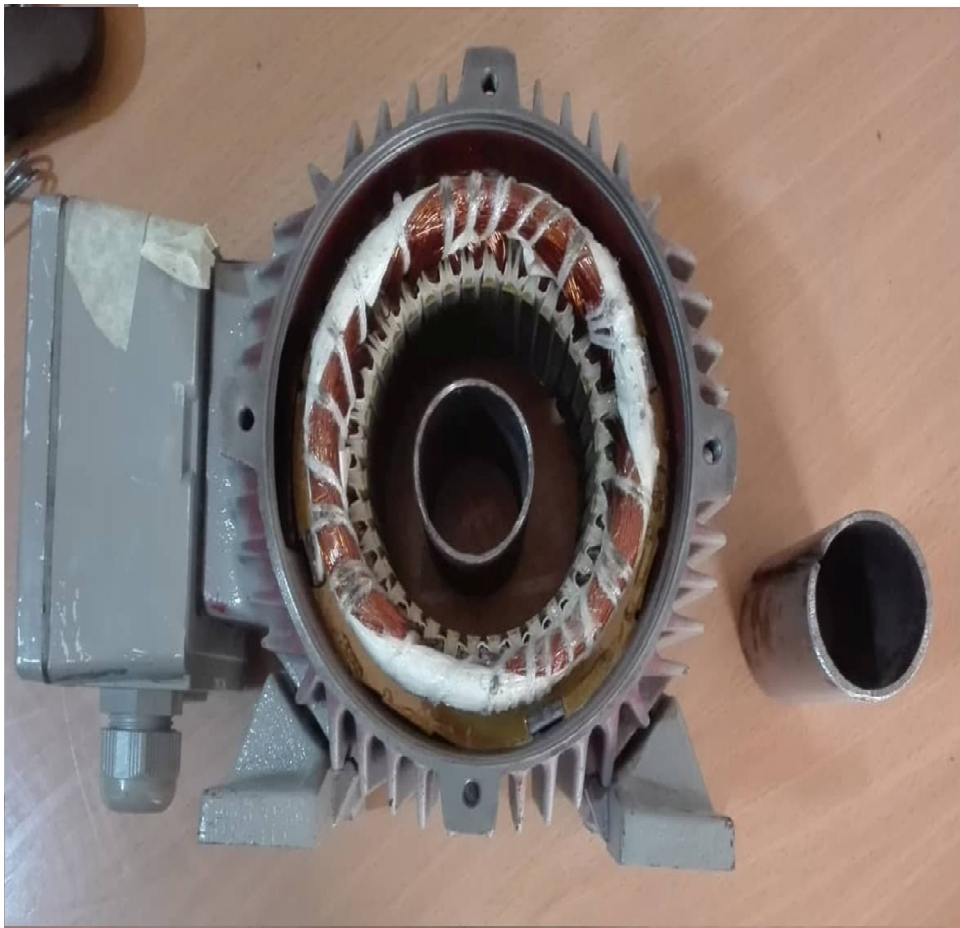


Figure III.2 : stator avec deux pièces magnétiques et conductrices de forme cylindrique

Les trois phases du stator sont alimentées par trois tensions triphasées modifiées en étoile. Vu que l'entrefer entre le stator et la pipe est très grand, alors les pertes magnétiques

engendrent des courants important au niveau du stator. Pour cela l'alimentation au niveau du stator est réduite et on alimente dans le premier test les trois phases (ABC) par un tension 20V-50Hz et on augmente la tension pour 40V, 60V et 80V tout en respectant le courant nominal de 2.8 A exigé par les phases statoriques. Enfin, on relève les mesures des courants dans la phase (A) .



Figure III.3 : test expérimental

III.3 Résultats expérimentaux

Dans le test expérimental, on a alimenté le stator par trois tensions triphasées en étoile 20V, 40V, 60V et 80V et on relève les courants statoriques en régime permanent :

➤ Cas 20 V :

- Sans pipe (A) - Avec pipe (B) - Pipe avec défaut (C)

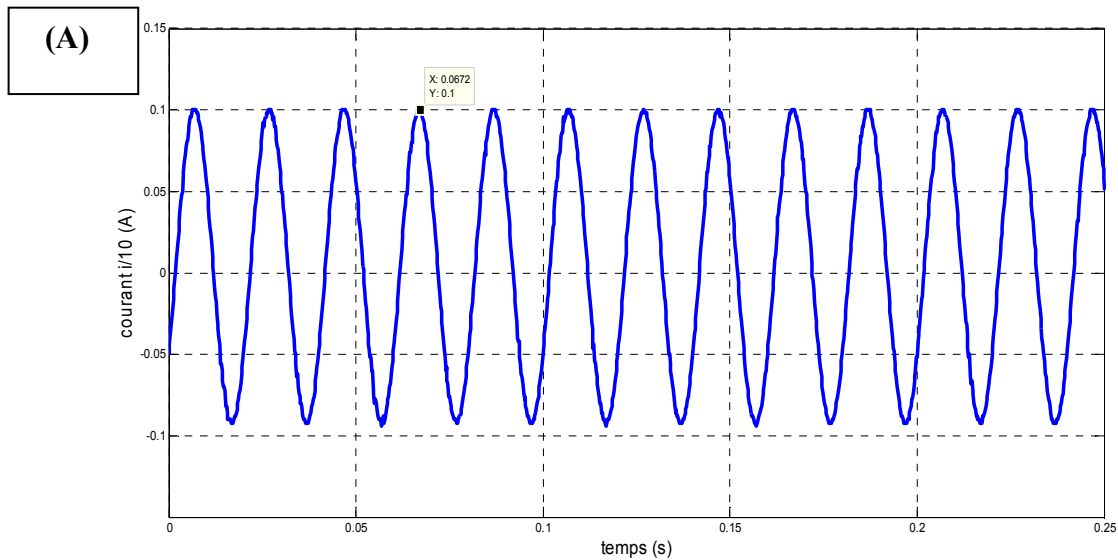


Figure III.4: le courant statorique de la phase (A) sans pipe

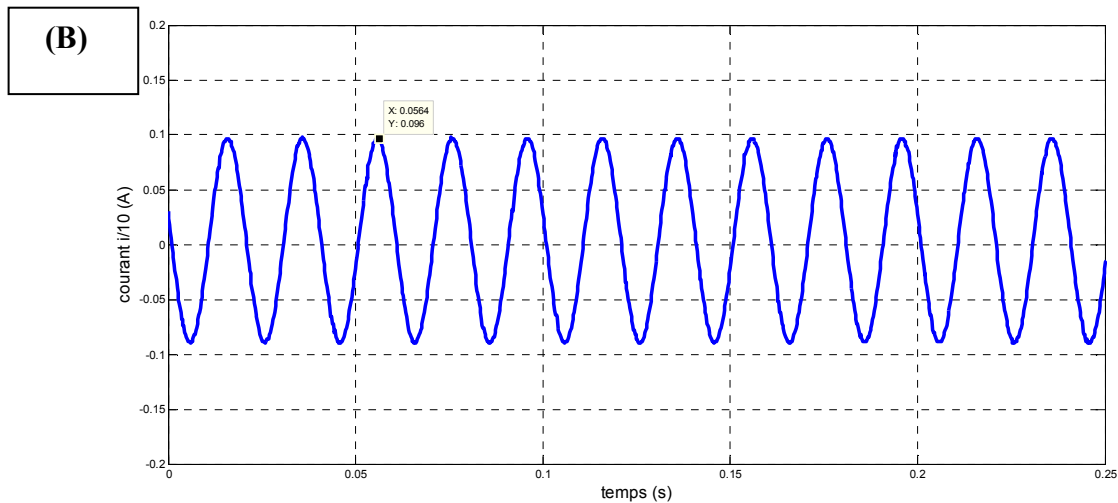


Figure III.5: le courant statorique de la phase (A) avec pipe

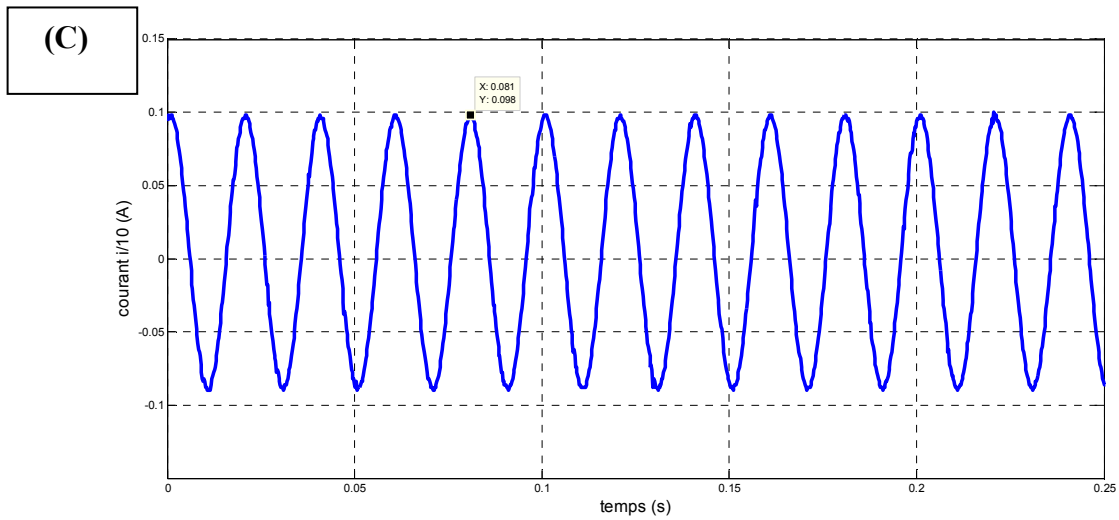


Figure III.6: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut

➤ Cas 40 V :

- Sans pipe (A) - Avec pipe (B) - Pipe avec défaut (C)

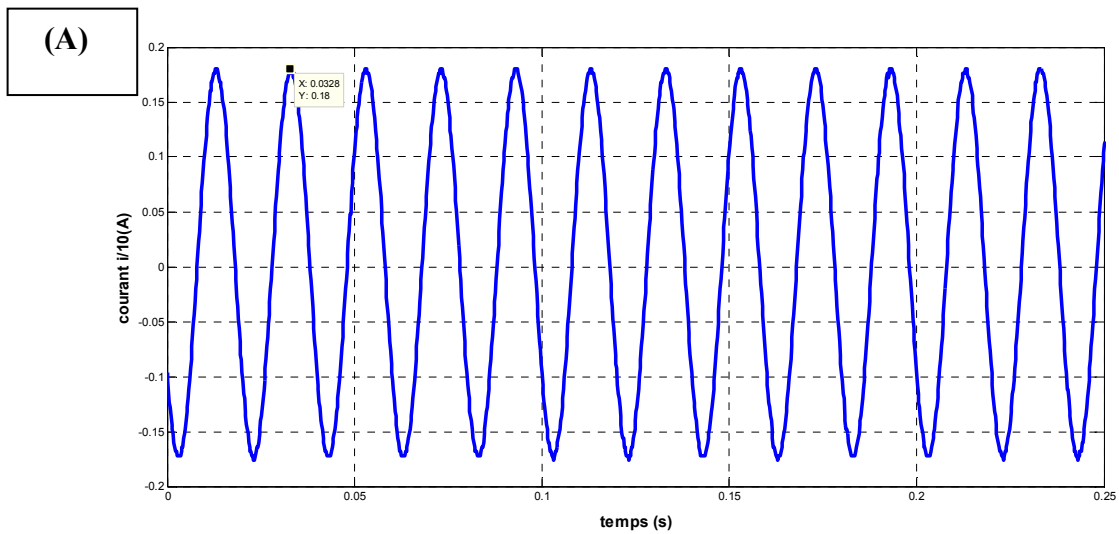


Figure III.7: le courant statorique de la phase (A) sans pipe

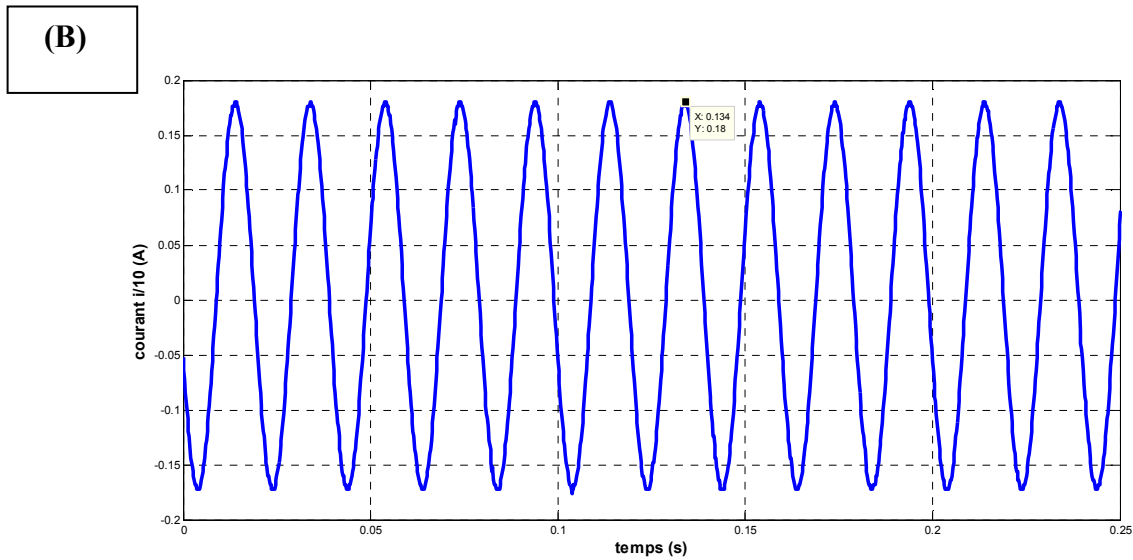


Figure III.8: le courant statorique de la phase (A) avec pipe

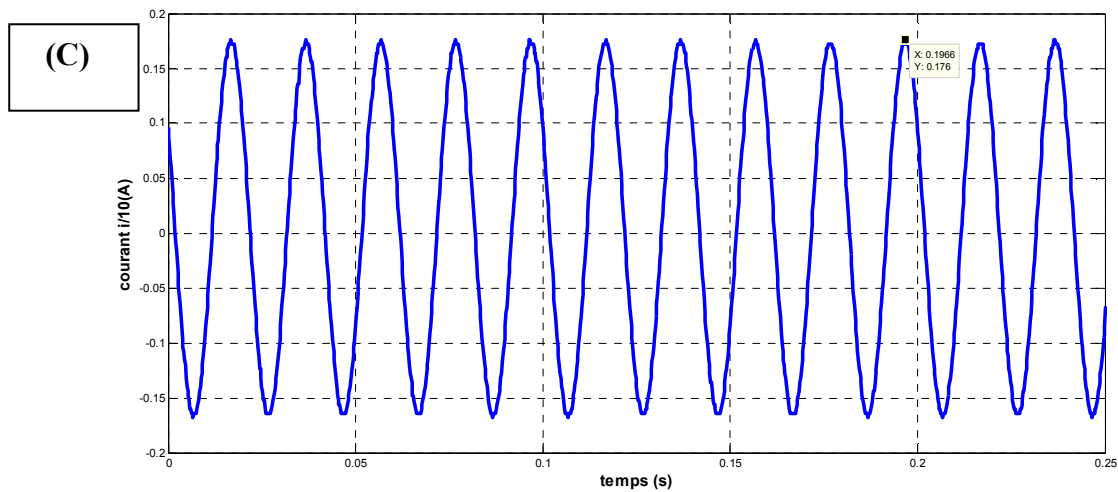


Figure III.9: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut

➤ Cas 60 V :

- Sans pipe (A) - Avec pipe (B) - Pipe avec défaut (C)

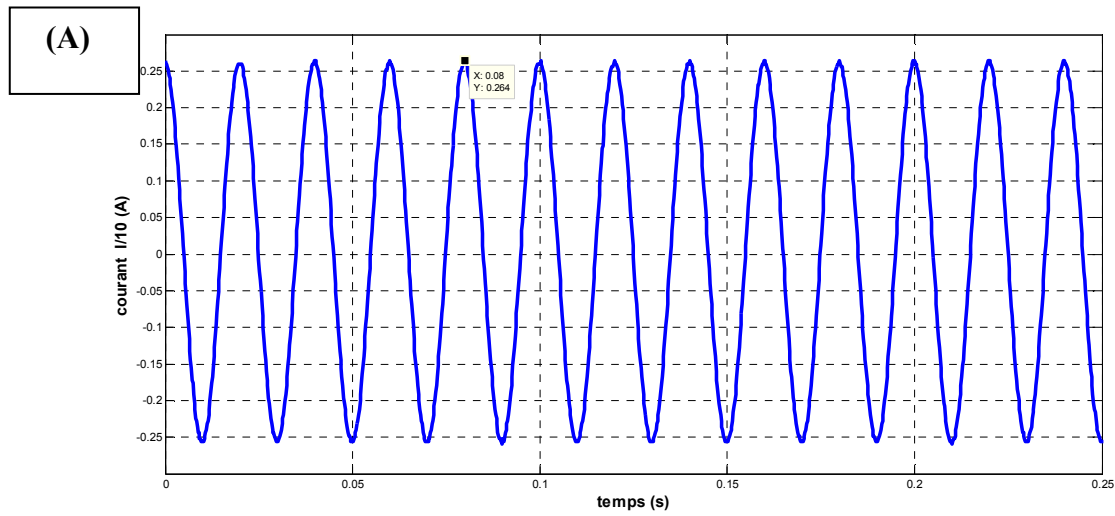


Figure III.10: le courant statorique de la phase (A) sans pipe

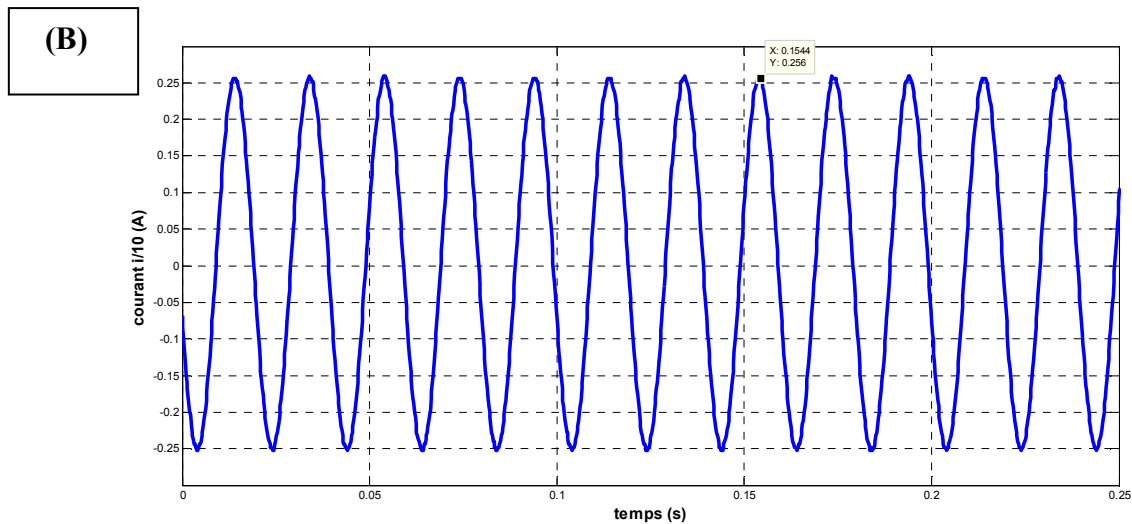


Figure III.11: le courant statorique de la phase (A) avec pipe

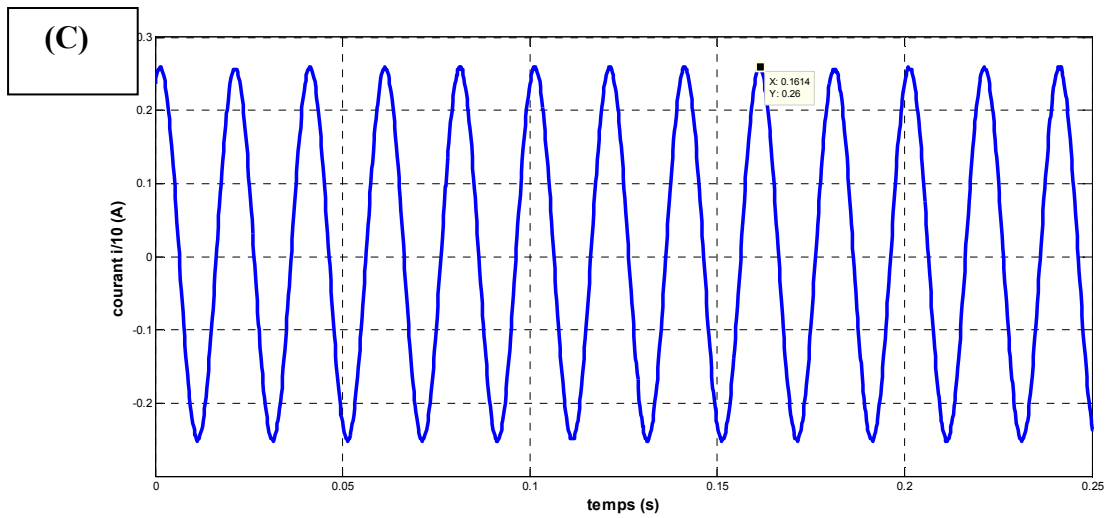


Figure III.12: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut

➤ Cas 80 V :

- Sans pipe (A) - Avec pipe (B) - Pipe avec défaut (C)

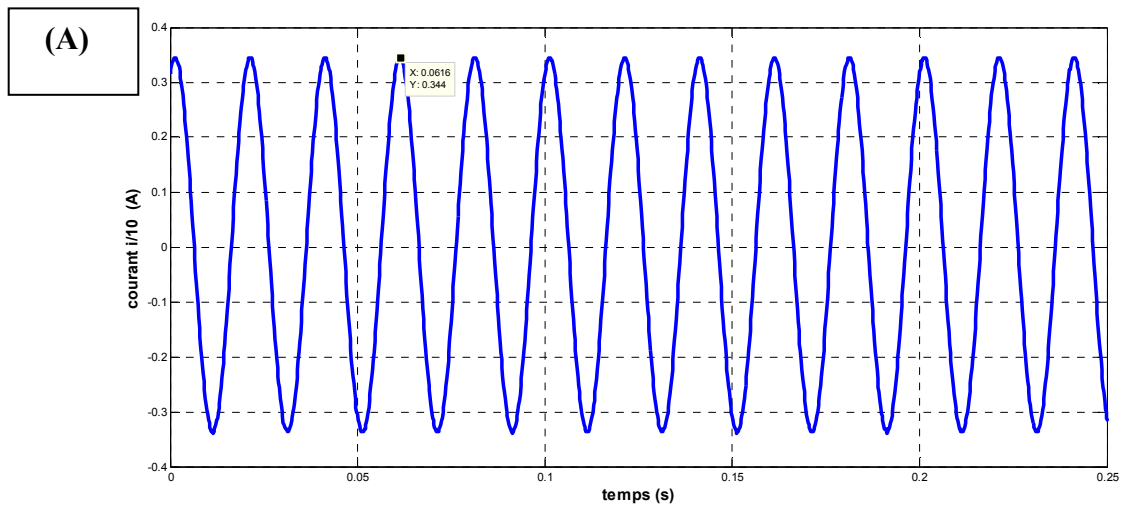


Figure III.13: le courant statorique de la phase (A) sans pipe

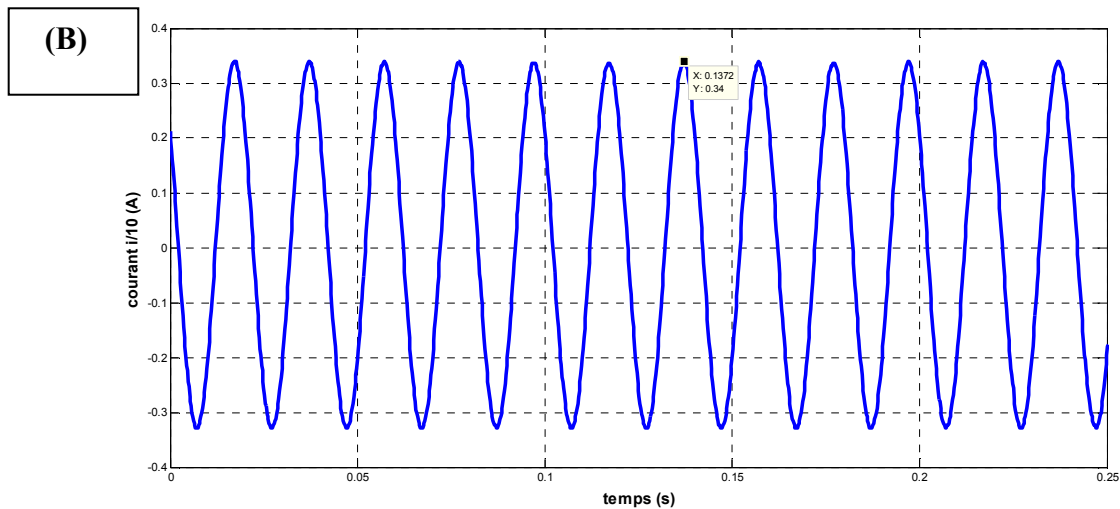


Figure III.14: le courant statorique de la phase (A) avec pipe

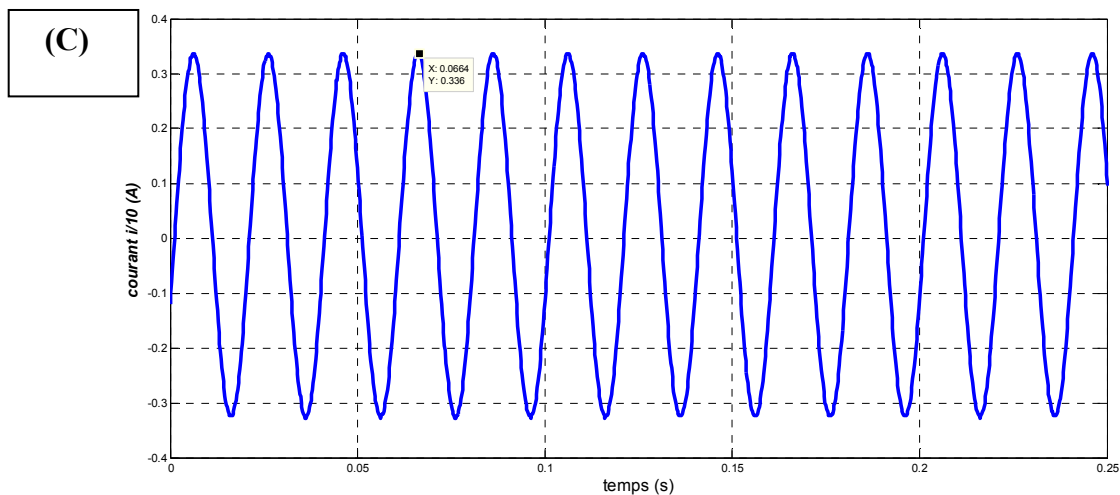


Figure III.15: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut

D'après ces courbes, on remarque que les courants statoriques augmentent avec la tension appliquée jusqu'à atteindre un courant limite d'environ 2.4A pour la tension 80V au-delà le stator chauffe. On remarque que pour la même tension le courant est plus grand dans le cas sans pipe et que les courants avec pipe saine ou avec défaut sont similaires c'est pourquoi une analyse fréquentielle est préférable et qui sera étudiée dans le prochain chapitre.

III.4. Résultats numériques par le Flux2D

Dans ce test, on alimente les trois phases (A,B,C) par des tensions simples 20V, 40V, 60V et 80V et on relève dans les figures suivantes la distribution des lignes de flux,

l'induction magnétique, le courant dans la phase A, et ce dans les trois cas (sans pipe-avec pipe –pipe avec défaut) :

III.4.1 Cas : pour une tension simple 20V/50Hz :

- La distribution des lignes de flux
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – pipe avec défaut (C)

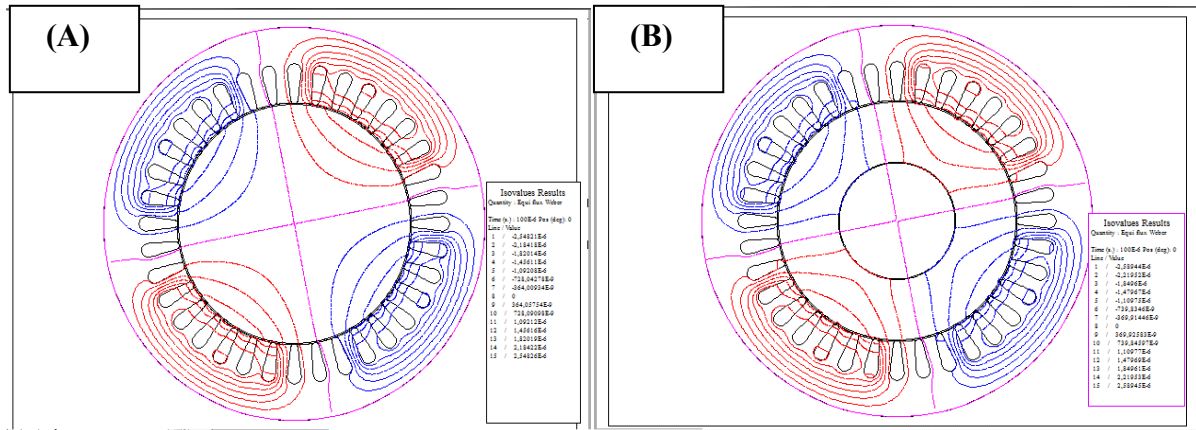


Figure III.16: la distribution des lignes du flux

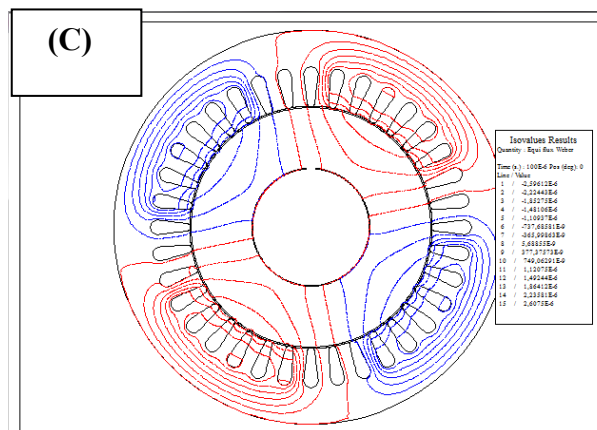


Figure III.17: la distribution des lignes du flux

- l'induction magnétique :
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – pipe avec défaut (C)

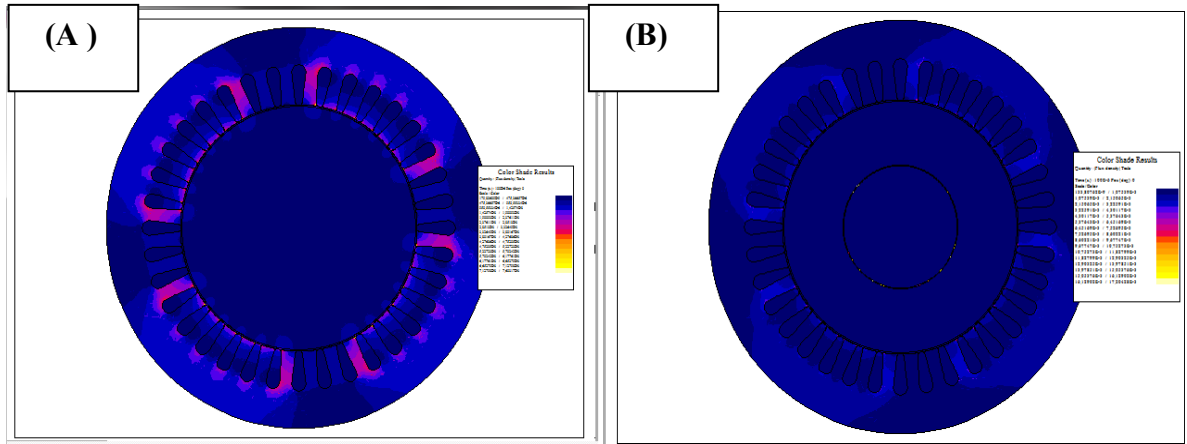


Figure III.18: l'induction magnétique

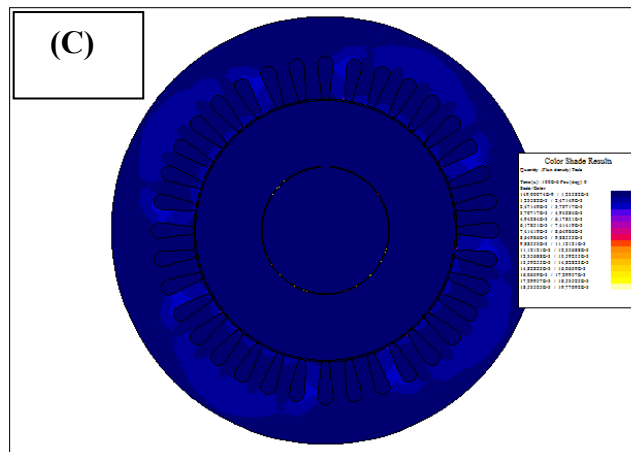


Figure III.19: l'induction magnétique

- le courant dans la phase A
 Sans pipe (A) – avec pipe (B) – pipe avec défaut (C)

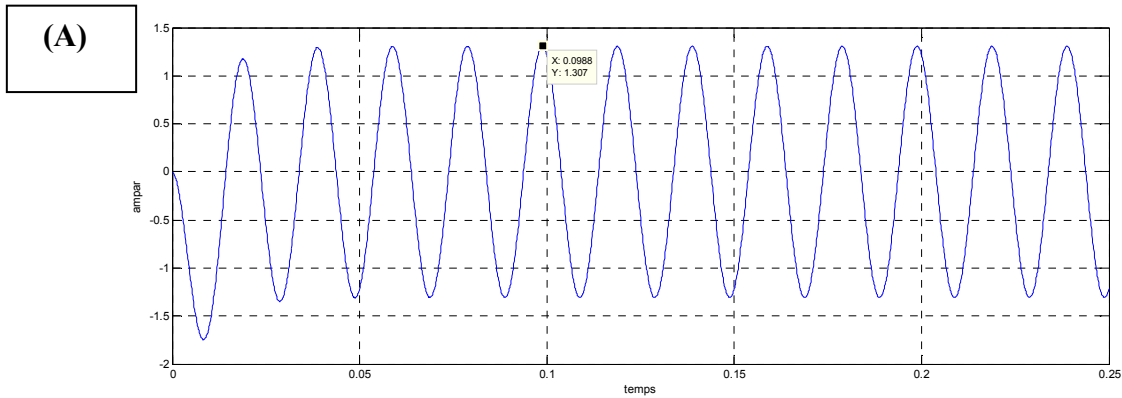


Figure III.20 : le courant statorique de la phase A sans pipe.

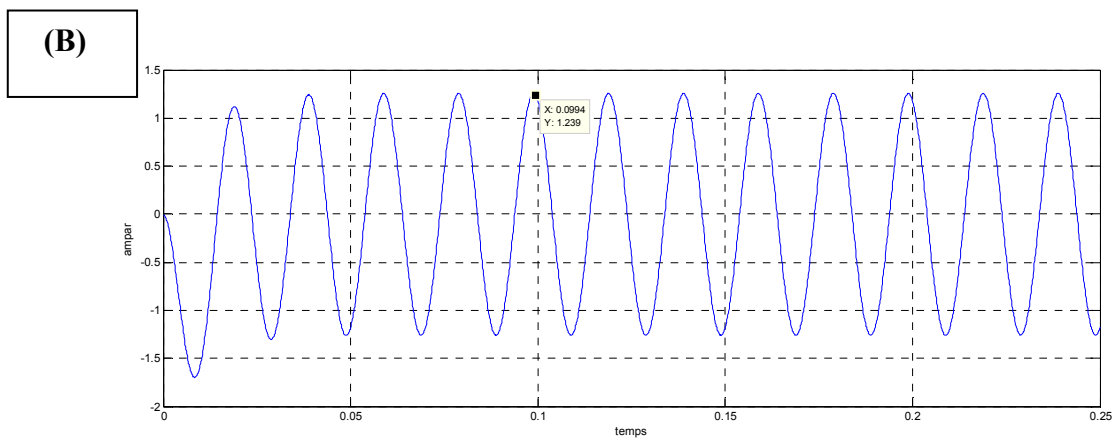


Figure III.21: le courant statorique de la phase A avec pipe.

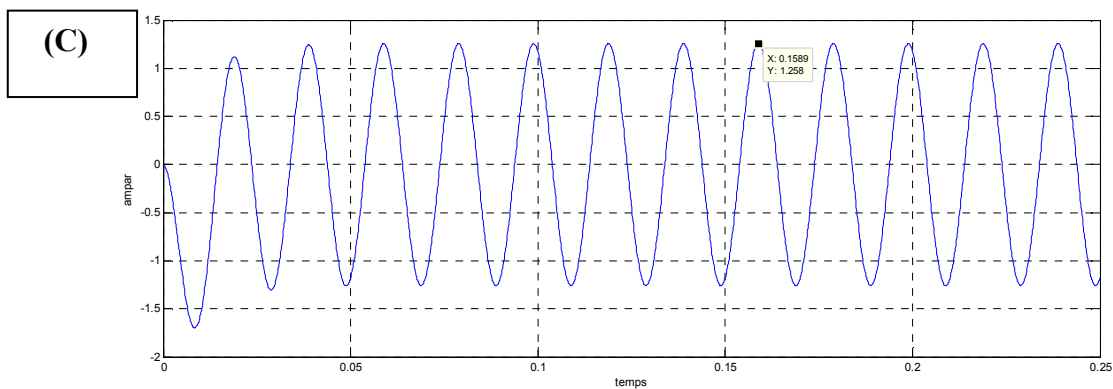


Figure III.22 : le courant statorique de la phase A pipe avec défaut.

III.4.2 Cas : pour une tension simple 40V/50Hz :

- La distribution des lignes de flux
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

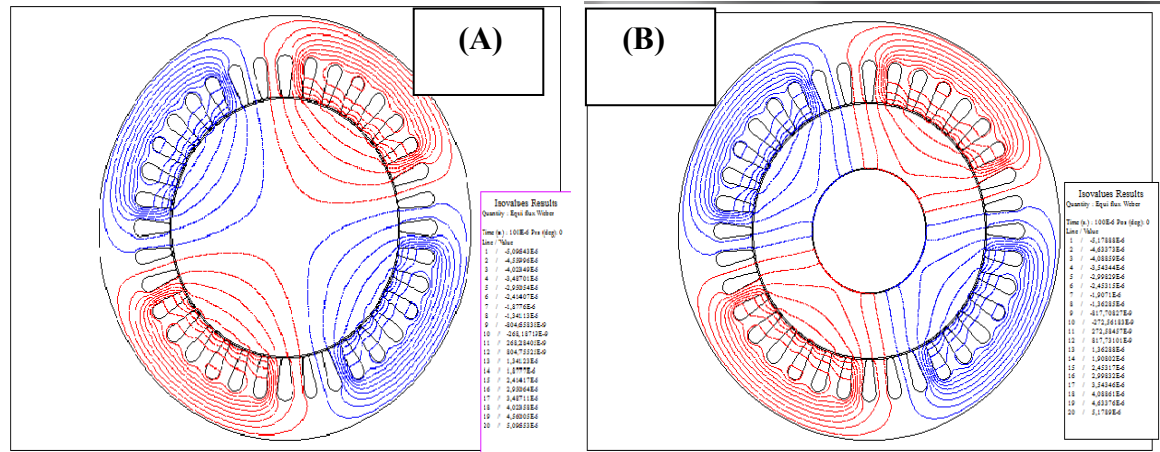


Figure III.23: la distribution des lignes du flux

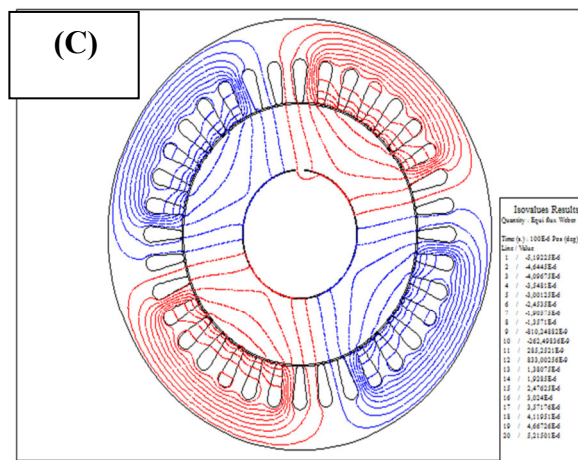


Figure III.24: la distribution des lignes du flux

- l'induction magnétique :
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

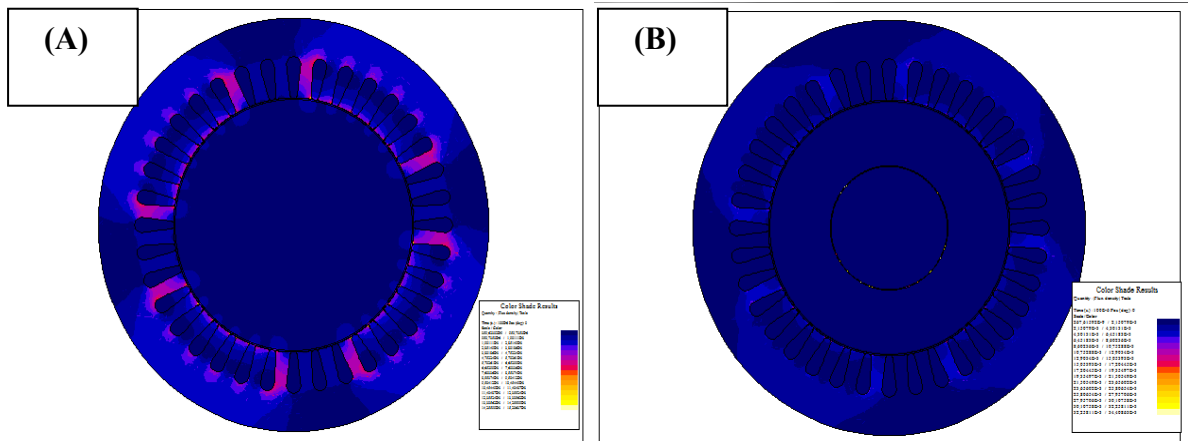


Figure III.25: l'induction magnétique

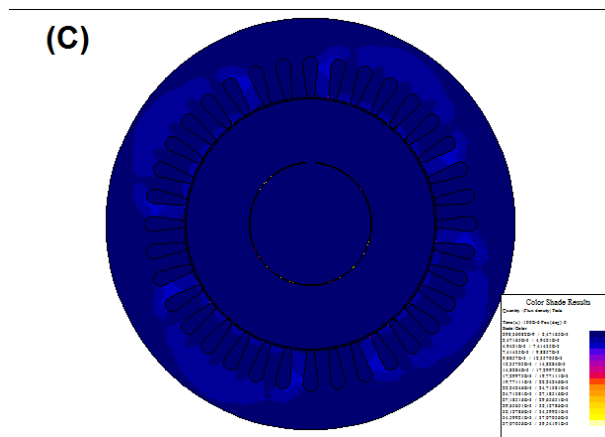


Figure III.26: l'induction magnétique

- le courant dans la phase A
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

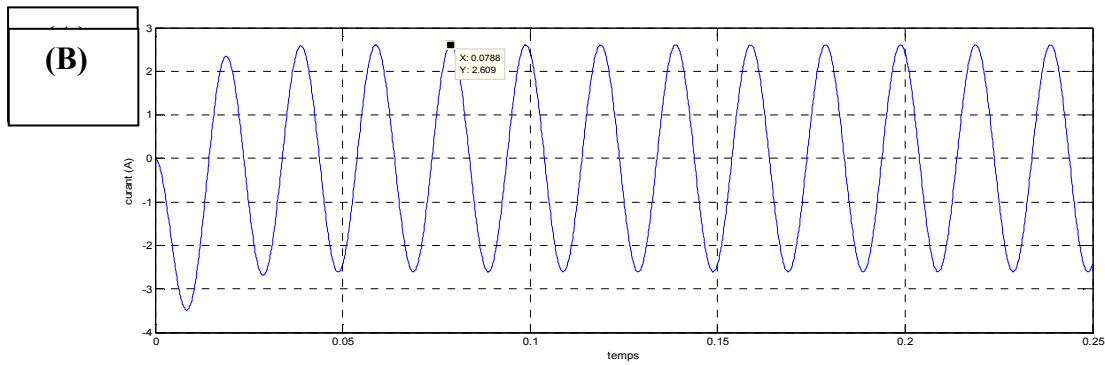


Figure III.27 : le courant statorique de la phase A sans pipe.

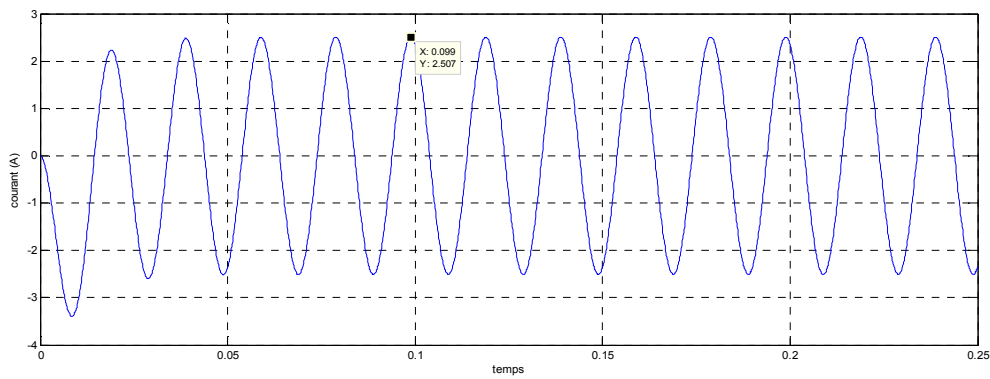


Figure III.28 : le courant statorique de la phase A avec pipe.

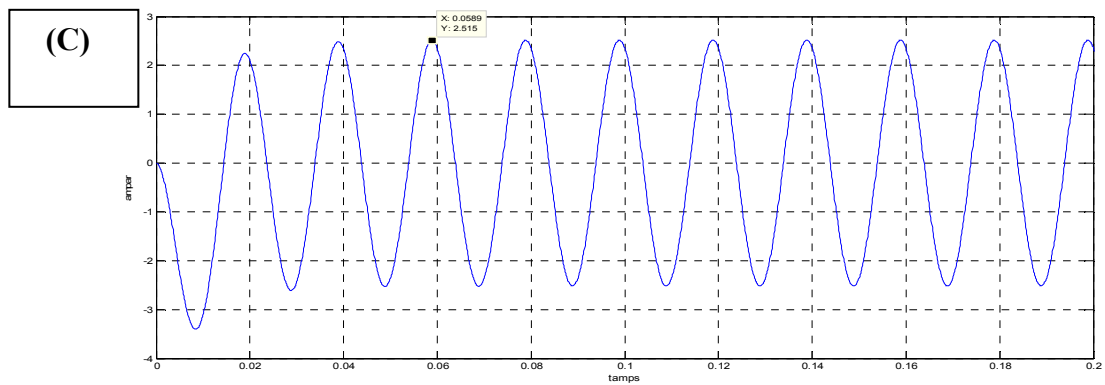


Figure III.29: le courant statorique de la phase A défaut pipe.

III.4.3 Cas : pour un tension simple 60V/50Hz :

- La distribution des lignes de flux
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

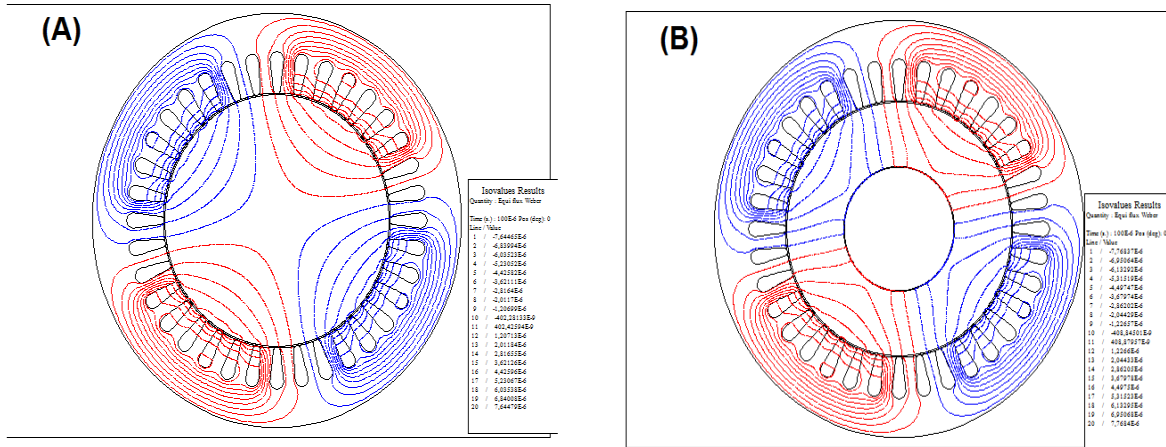


Figure III.30: la distribution des lignes du flux

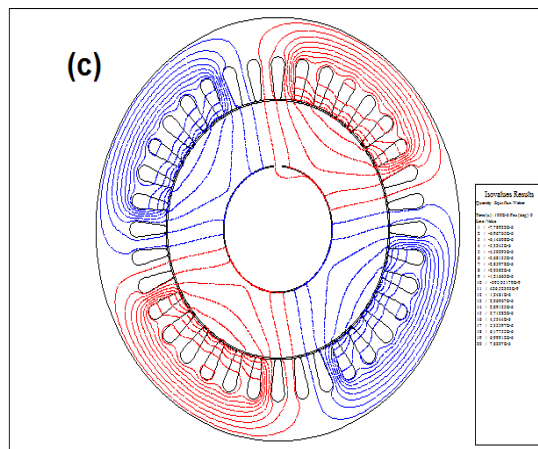


Figure III.31: la distribution des lignes du flux

- l'induction magnétique :
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

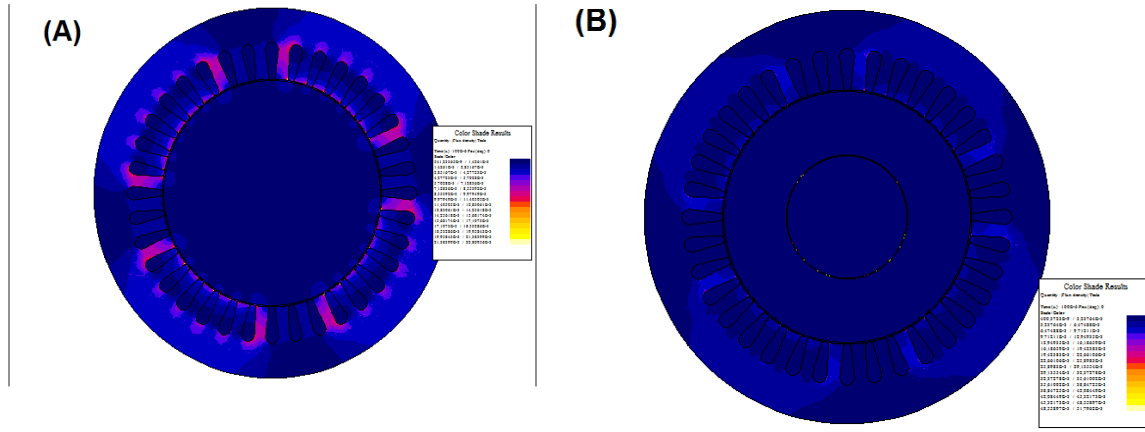


Figure III.32: l'induction magnétique

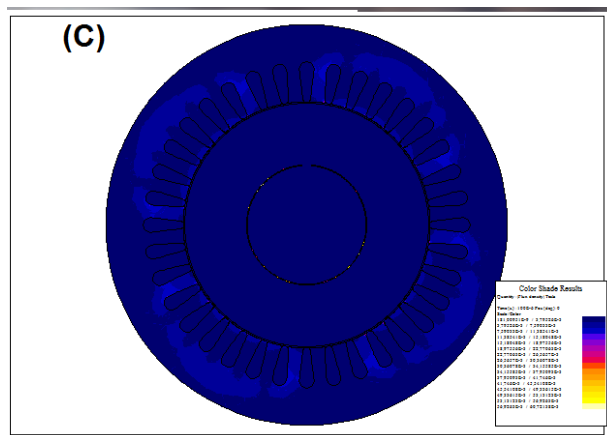


Figure III.34: l'induction magnétique

- le courant dans la phase A
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

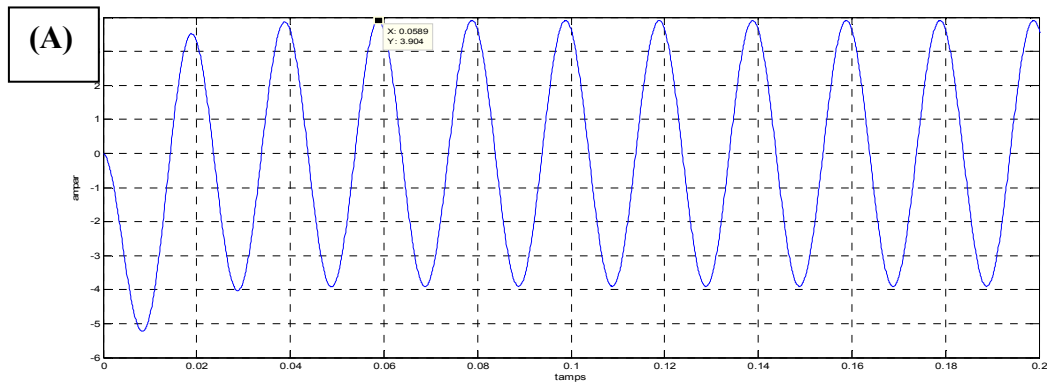


Figure III.35 : le courant statorique de la phase A sans pipe.

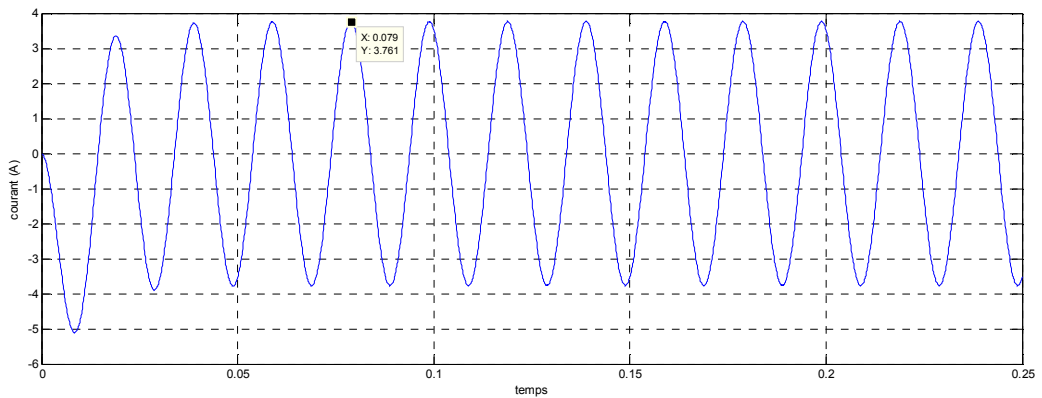


Figure III.36 : le courant statorique de la phase A avec pipe.

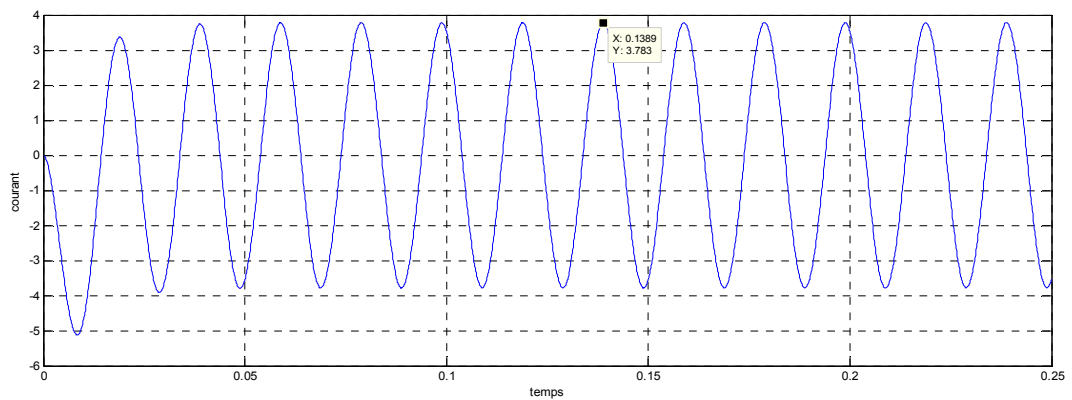


Figure III.37 : le courant statorique de la phase A pipe avec défaut .

III.3.4 Cas : pour une tension simple 80V/50Hz :

- La distribution des lignes de flux
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

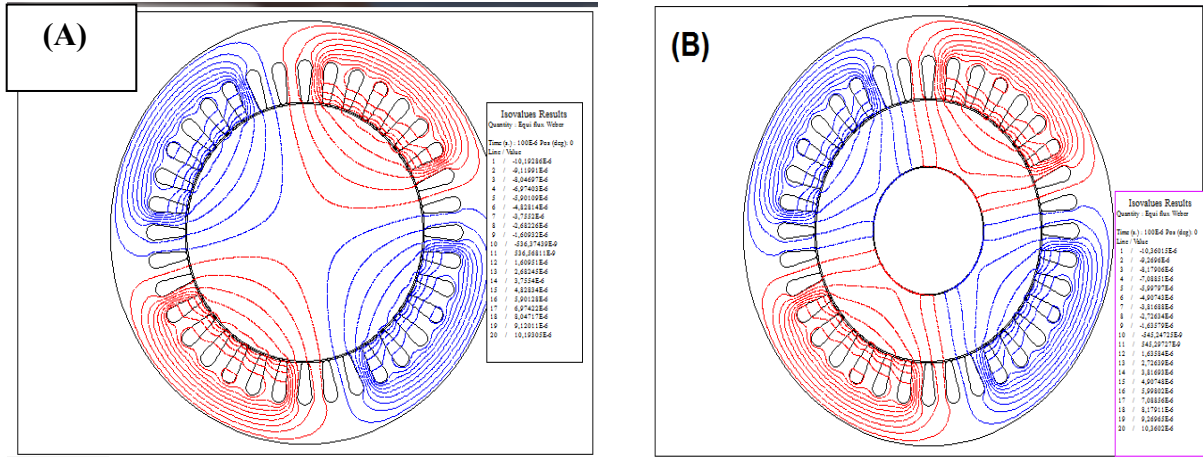


Figure III.38: la distribution des lignes du flux

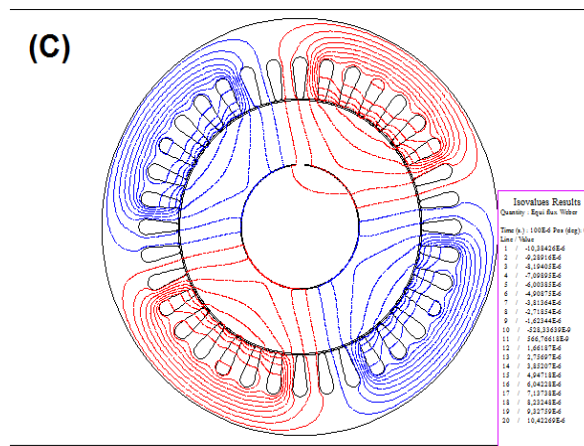


Figure III.39: la distribution des lignes du flux

- l'induction magnétique :
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

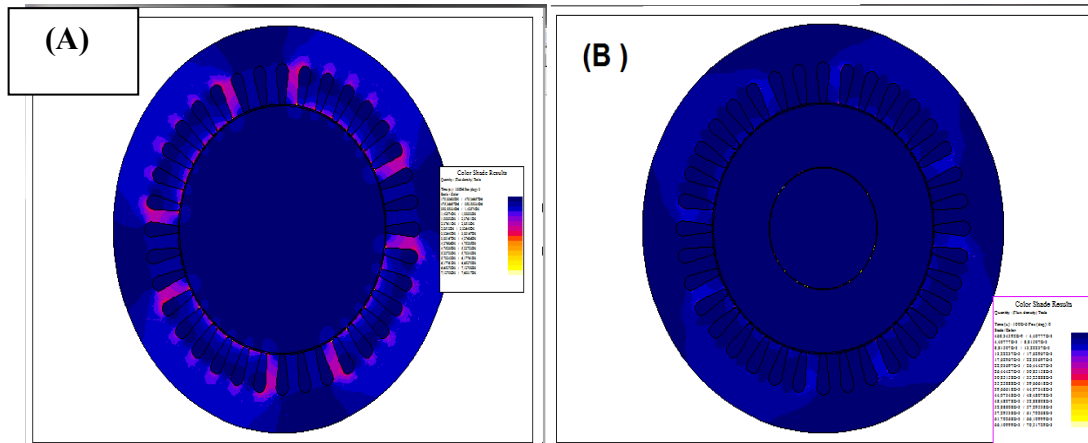


Figure III.40: l'induction magnétique

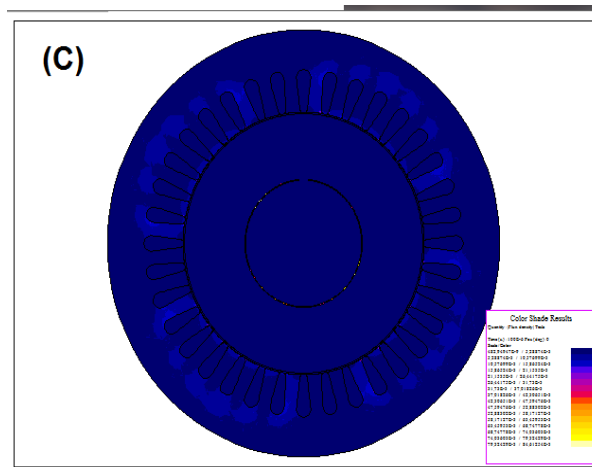


Figure III.41: l'induction magnétique

- le courant dans la phase A
- Sans pipe (A) – avec pipe (B) – avec défaut (C)

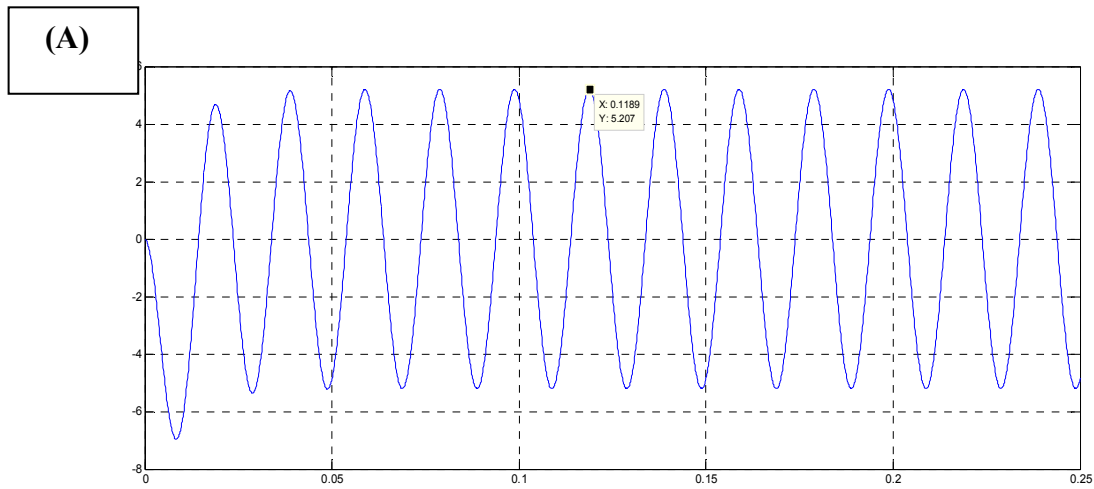


Figure III.42 : le courant statorique de la phase A avec pipe.

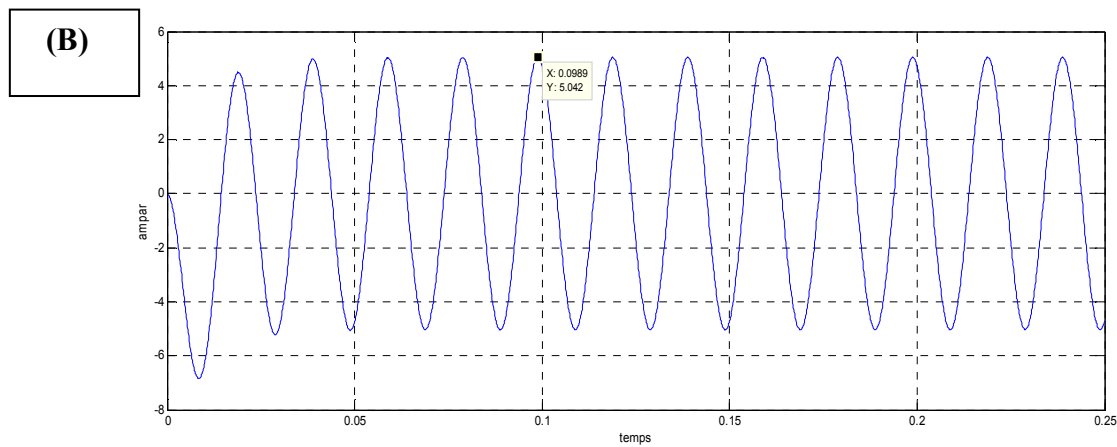


Figure III.43 : le courant statorique de la phase A avec pipe.

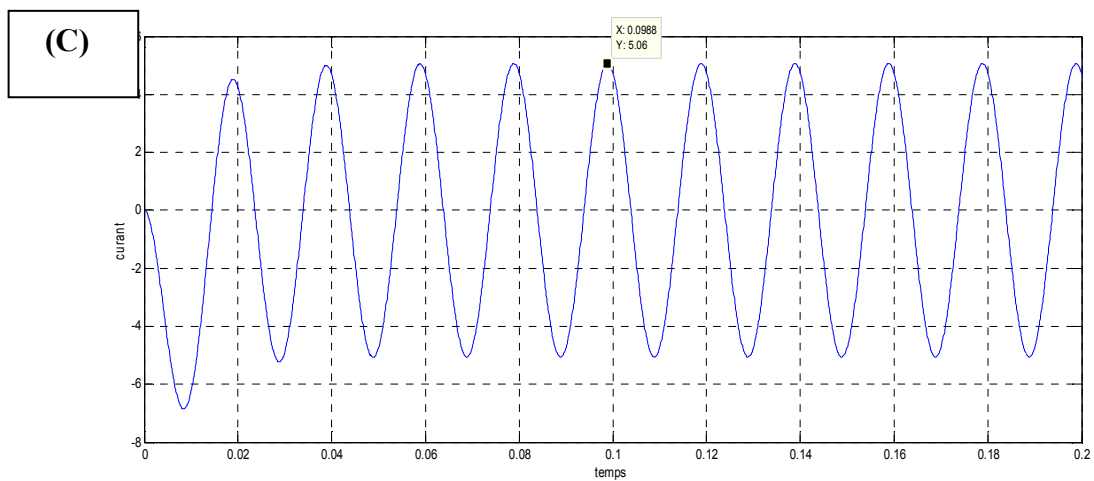


Figure III.44: le courant statorique de la phase A pipe avec défaut

L'analyse des résultats numériques, montre que les lignes de flux sont un peut modifiées par la présence du défaut puisque la direction du champ se trouve sur le chemin du défaut et ce changement augmente lorsque on augmente la tension d'alimentation.

Le tableau (III.1) représente les valeurs efficaces expérimentales et numériques des courants :

Tableau III.1 : les valeurs expérimentale et numérique de courant de la phase (A)

Tension	Courant (A)	Sans pipe	Avec pipe	Pipe avec défaut
20 V	Expérimental	0.707	0.678	0.692
	Numérique	0.924	0.876	0.889
40 V	Expérimental	1.272	1.272	1.244
	Numérique	1.844	1.772	1.778
60 V	Expérimental	1.883	1.810	1.838
	Numérique	2.760	2.659	2.674
80 V	Expérimental	2.432	2.432	2.375
	Numérique	3.68	3.56	3.57

III.5 Conclusion

Des résultats des courants expérimentaux et numériques, on remarque que les courants statoriques augmentent avec la tension appliquée jusqu'au atteindre un courant limite d'environ 2.4A (expérimental) pour la tension 80V au-delà, le stator chauffe. On remarque aussi que pour la même tension le courant est plus grand dans le cas sans pipe et que les courants avec pipe saine ou avec default sont similaire c'est pourquoi une analyse fréquentielle est préférable et qui sera étudiée dans le prochain chapitre.

IV.1. Introduction

Les signaux fournis par les différents capteurs contiennent des informations pertinentes disponibles pour le diagnostic. Le diagnostic associe, suite à l'analyse de ces signaux, des signatures correspondant au fonctionnement normal ou anormal du procédé ou du système à surveiller. La précision de l'analyse effectuée est essentielle pour une bonne décision de diagnostic. Il s'agit de détecter toute déviation par rapport à un comportement de référence, puis de diagnostiquer les causes de cette modification.[10].

Dans ce chapitre, on va voir le spectre de courant par la FFT pour le cas sans et avec défaut dans la résultant expérimental et numérique.

IV.2. Spectre de courant par la FFT

On a alimenté dans les premiers tests les trois phases (A.B.C) par un tension simple 20V-50Hz puis on a répété les trois testes avec des tensions différentes (40V/50Hz 60V/50Hz-80V/50Hz). Une analyse spectrale des courants par la FFT est conduite pour le cas sans et avec défaut (numérique et expérimental).

IV.2.1 cas de tension d'alimentation 20V

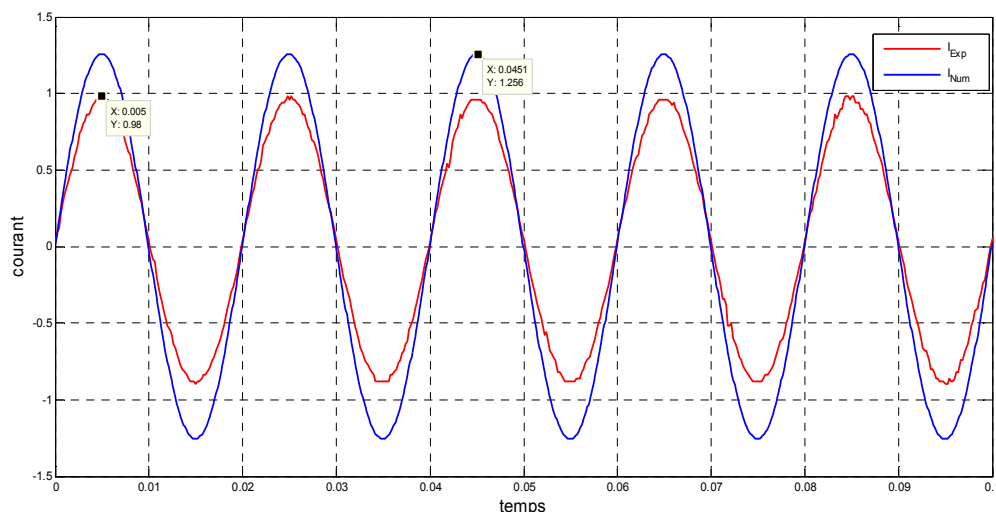


Figure IV.1: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe sans défaut

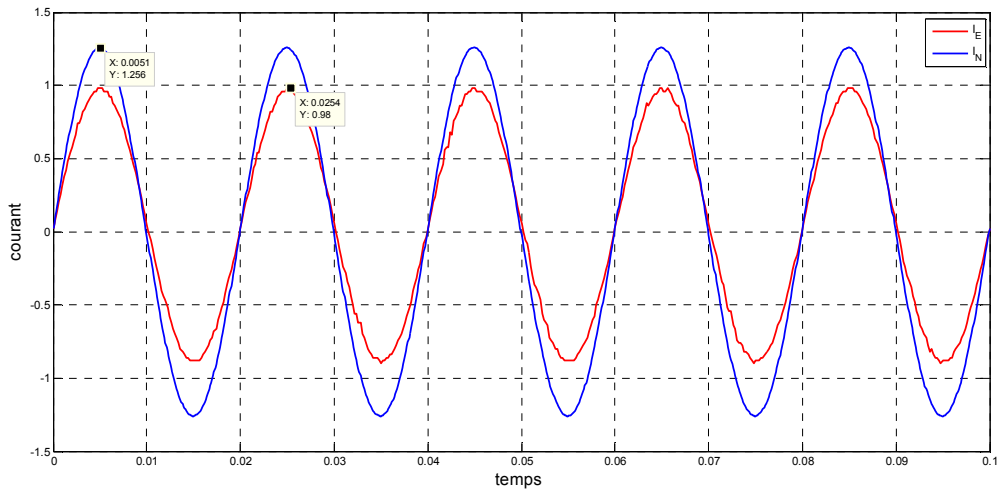


Figure IV.2: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe avec défaut

➤ cas de tension d'alimentation 60V/50Hz

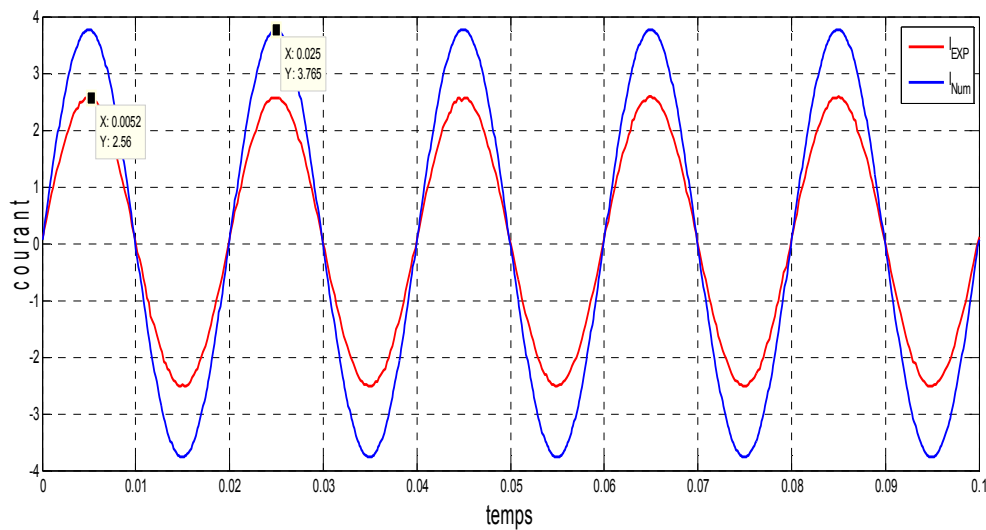


Figure IV.3: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe sans défaut

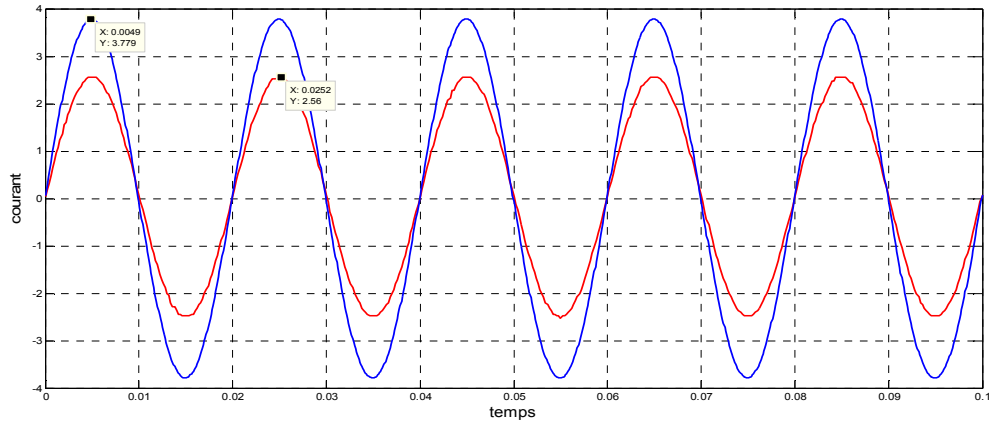


Figure IV.4: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe avec défaut

➤ cas de tension d'alimentation 80V/50Hz

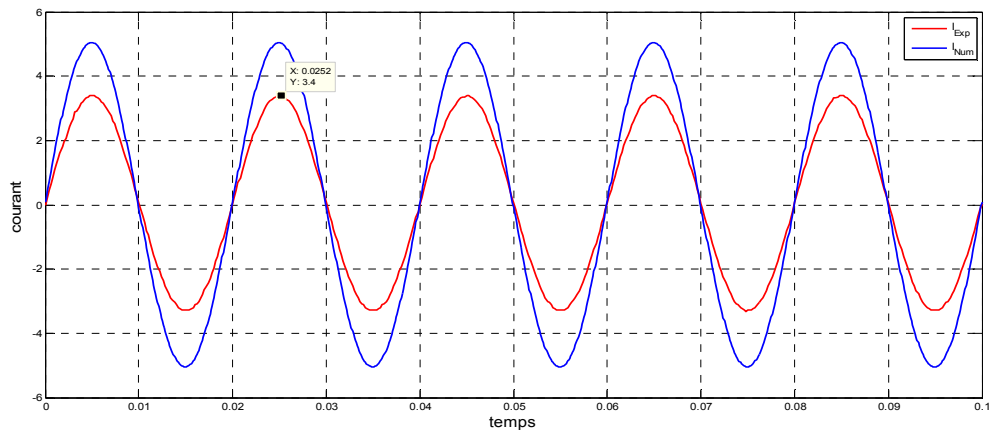


Figure IV.5: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe sans défaut

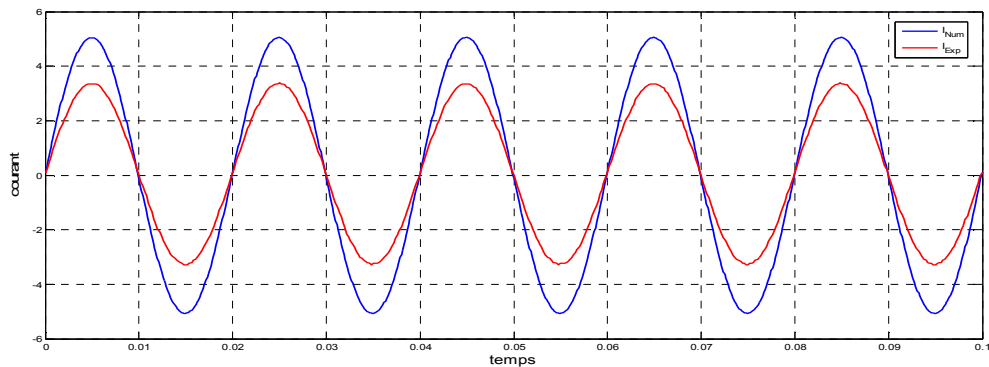


Figure IV.6: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe avec défaut

Spectrale des courants par la FFT est conduite pour le cas sans et avec défaut (numérique et expérimental).

➤ expérimental

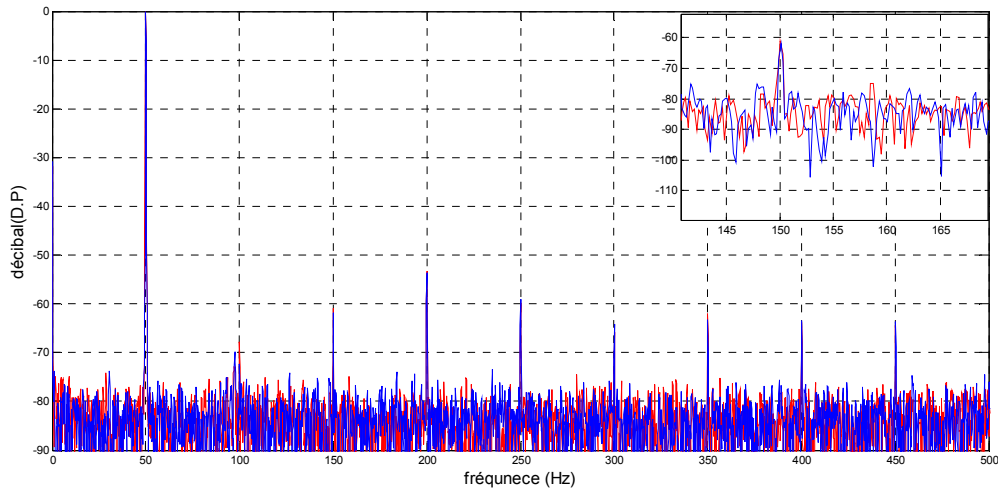


Figure IV.7: Spectre du courant statorique avec et sans défaut (20V)

➤ Numérique

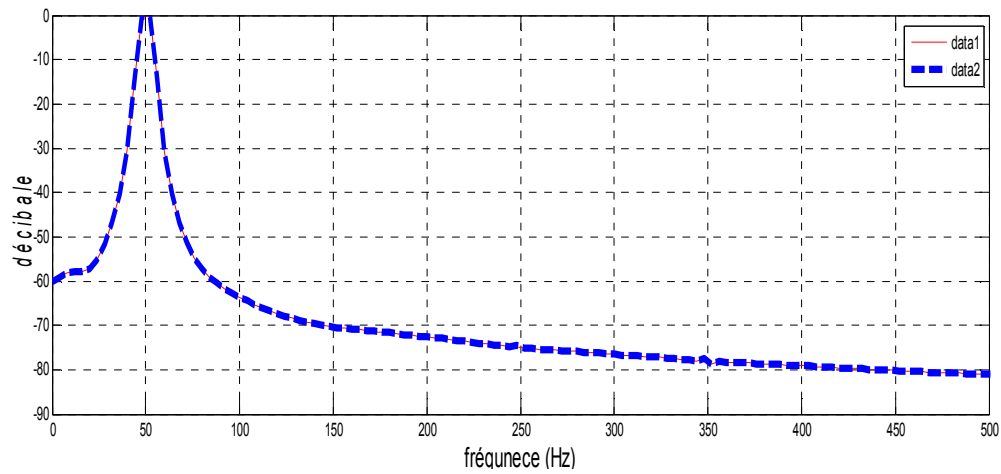


Figure IV.8: Spectre du courant statorique avec et sans défaut (20V)

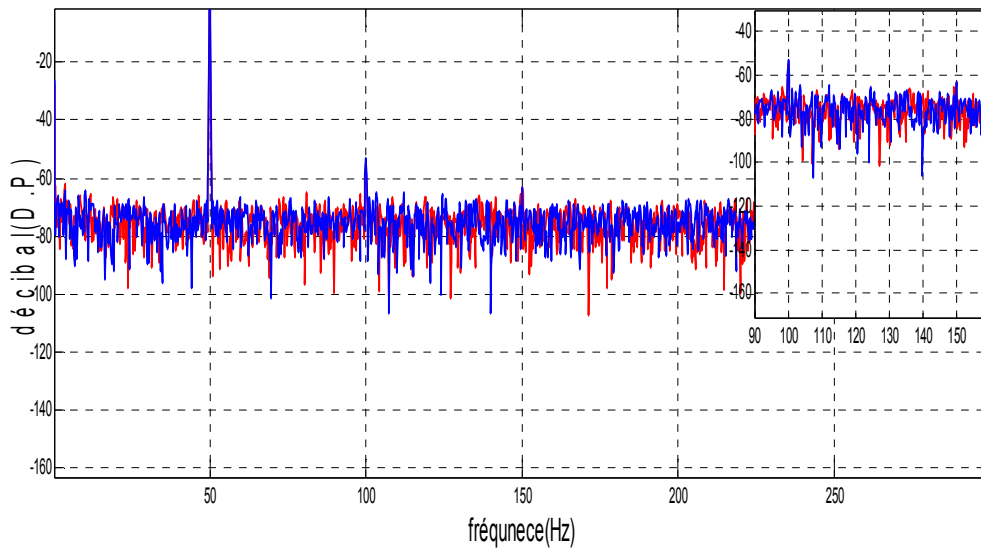
➤ **Expérimental**

Figure IV.9: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (40V)

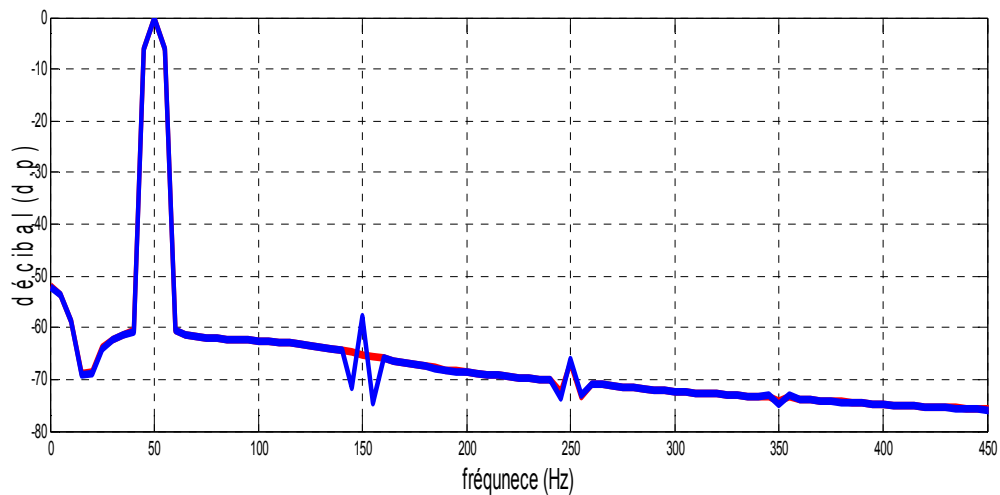
➤ **Numérique**

Figure IV.10: Spectre du courant statorique avec et sans défaut (40V)

➤ **Expérimental**

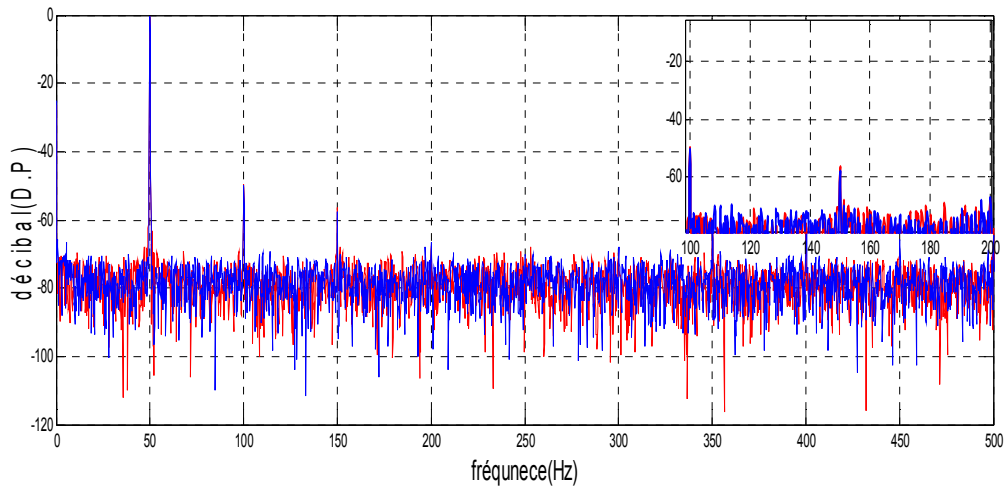


Figure IV.11: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (60V)

➤ **Numérique**

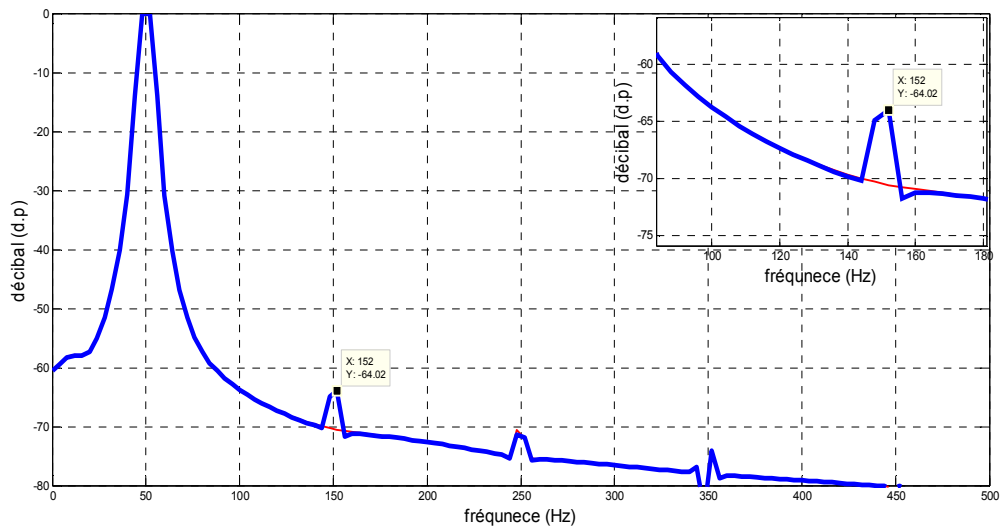


Figure IV.12: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (60V/50Hz)

➤ **Expérimental**

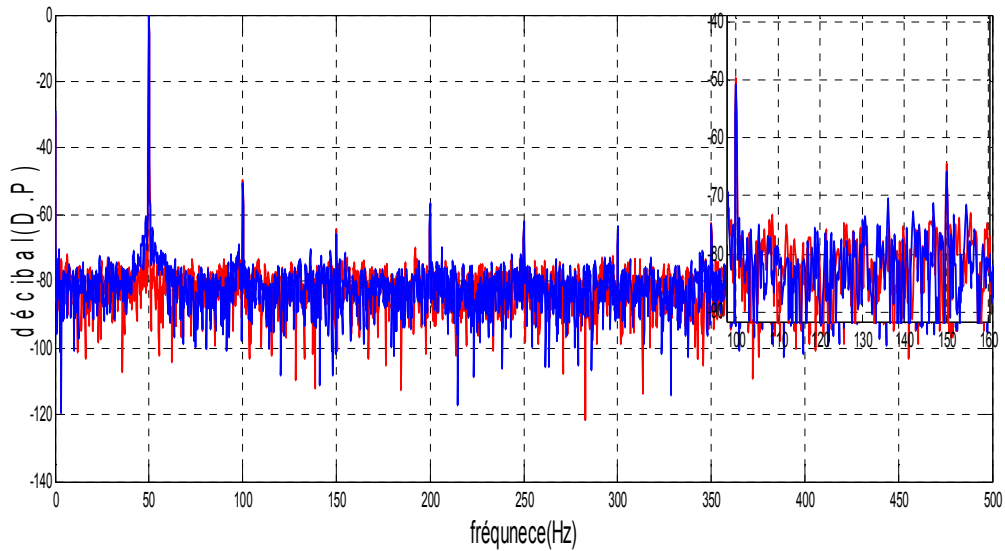


Figure IV.13: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (80V)

➤ **Numérique**

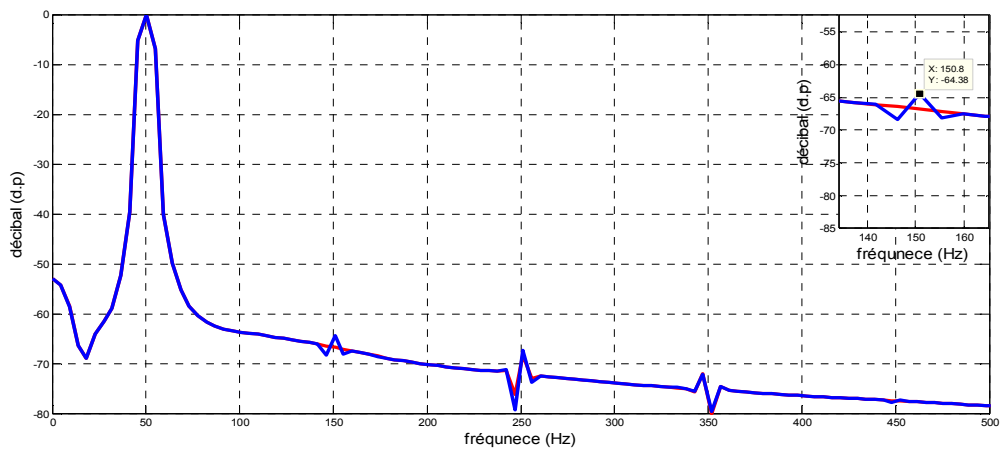


Figure IV.14: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (80V)

D'après les courbes de l'analyse spectrale FFT des courants dans le cas expérimental et numérique, on a constaté que l'analyse FFT pour le cas expérimental n'a pas donné de résultats significatifs cela peut être est due à la grande valeur de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le pipeline. Mais l'analyse FFT pour l'étude numérique a montré une certaine signature du défaut. Le tableau suivant donne les résultats de cette signature.

Tableau IV.1 : les valeurs de spectre de courant statorique (phase A) dans le test numérique

La tension	Pipe sans défaut	Pipe avec défaut
20V/50Hz	-70.65	-70.65
40 V/50Hz	-65.16	-57
60 V/50Hz	-70.54	-64.02
80 V /50Hz	-66.72	-64.38

IV.3 Conclusion

L'analyse spectrale FFT des courants dans le cas expérimental n'a pas donné de résultats significatifs. Mais l'analyse FFT pour l'étude numérique a montré une certaine signature du défaut. Cela peut être est due à la grande valeur de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le pipeline. En perspective peut être l'utilisation dans le future de pipeline de diamètre plus grand et qui est proche du stator avec un entrefer plus réduit ou l'utilisation d'un stator réduit serait une autre solution.

Conclusion Générale

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs.

Dans ce travail, nous avons présenté le modèle mathématique et numérique qu'on va utiliser pour modéliser le dispositif, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans le dispositif électrique qui sont les équations de Maxwell. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé, on a cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

On a introduit une technique du contrôle non destructif électromagnétique CNDem dans les dispositifs magnétiques conducteurs en utilisant le champ tournant cette nouvelle technique *FRem* peut contribuer au contrôle non destructif de défauts dans les pièces magnétiques on a vu les courants statoriques augmentent avec la tension appliquée jusqu'au atteindre un courant limite d'environ 2.4A (expérimental) . On a vu aussi pour la même tension le courant est plus grand dans le cas sans pipe et que les courants avec pipe saine ou avec défaut .

On a introduit L'analyse spectrale FFT des courants et on a vu dans le cas expérimental n'a pas donné de résultats signifiants. Mais l'analyse FFT pour l'étude numérique a montré une certaine signature du défaut. Cela peut être est due à la grande valeur de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le pipeline. En perspective peut être l'utilisation dans le future de pipeline de diamètre plus grand et qui est proche du stator avec un entrefer plus réduit ou l'utilisation d'un stator réduit serait une autre solution.

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers.

A mon cher père que rien au monde ne vaut tes efforts fournis, jour et nuit, pour mon éducation et mon bien être.

A ma très chère aimée mère et tante qui m'a donnée la vie tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, Que Dieu, le tout-puissant, te préserve et t'accorde santé, longue vie et bonheur.

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

*A mes très chères sœurs et frère AYMEN,
OUSSAMA, MOHAMED, ABED
LHAKI, AMIRA, ADAM, INASE et mes cousins*

fateh, amir et abdallah

Toutes mes familles djabllah, zahwani et koutti .

A tous mes ami(e): mohamed, walid, hakim et amine qu'elles avec lesquels j'ai partagé des moments de joie et de bonheur, à tous ceux qui ont été à mes côtés jusqu'à aujourd'hui.

A tous les honorables enseignants qui ont contribué à ma formation

*A Toute la promotion Electronique des Systèmes Embarqués
2018/ 2019.*

Tous ceux qui m'aiment.

Tous ceux que j'aime.

Introduction générale

Introduction Générale

Le domaine du Contrôle Non Destructif (CND) est très vaste et interdisciplinaire. Le CND joue un rôle crucial en assurant que les composants et des systèmes structuraux remplissent leur fonction de manière fiable et rentable. Les techniciens et les ingénieurs du CND définissent et implémentent des tests qui permettent de caractériser des matériaux et de localiser des défauts qui auraient peut provoquer des accidents de train ou d'avion, des incendies sur des pipelines, ou tout autre incident.

Ces tests réalisés ne remettent pas en cause l'intégrité structurelle de la pièce évaluée et donc son usage. Comme le CND permet l'inspection sans dégâts, il fournit un excellent compromis entre qualité du contrôle et coût. Le CND est largement utilisé dans l'industrie. Les méthodes employées sont similaires à celles mises en place dans le domaine médical et appliqué au non vivant.

Le contrôle non destructif employant les courants de Foucault *CNDcf* est très employé dans les matériaux conducteurs non magnétiques (Cuivre, Aluminium, etc.) mais si on veut l'employer pour les matériaux magnétiques peu conducteurs (Acier), la technique devient très difficile. Et cette technique devienne inutilisable si on l'utilise dans les matériaux uniquement magnétiques car il y'aurait absence total des courants induit de Foucault.

L'objectif essentiel de notre travail est l'introduction de technique FREM pour le contrôle non destructif des pièces magnétique non conducteur de forme cylindrique comme dans les pipelines.

Le plan de notre travail est comme suit :

Dans le premier chapitre, on expose les différentes techniques du contrôle non destructif à savoir : l'examen visuel, Ressuage, Magnétoscopie, Radiographie, Thermographie, Ultrasons et Le contrôle non destructif par courants de Foucault.

Dans le deuxième chapitre, nous allons exposer les lois fondamentales de l'électromagnétisme et le modèle mathématique qui caractérise l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique, et on va également exposer les plusieurs types des méthodes numériques pour le calcul des champs, et également on va expliquer le fonctionnement du logiciel FLUX 2D qui travaille avec la méthode des éléments finis.

Introduction générale

Les informations fournies par ce type de simulation nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques.

Dans le troisième chapitre, on va comparer entre les résultats expérimentaux avec les résultats numériques et on va introduire une technique du contrôle non destructif électromagnétique CNDem dans les dispositifs magnétiques conducteurs en utilisant la technique du champ tournant électromagnétique *FRem*.

Dans le quatrième chapitre, on va On va voir l'analyse des courants par la technique de Fourier FFT pour le cas sans et avec défaut dans la résultats numériques et expérimental.

Chapitre I

Figure I.1 : Principe des Ressuage.....	5
Figure I.2 : Exemple d'une pièce avant (à gauche) et après (à droite) le contrôle par ressuage.	5
Figure I.3 : Principe des Magnétoscopie	6
Figure I.4:Principe des ultrasons.....	7
Figure I.5 : Principe des Thermographie.....	8
Figure I.6 : Principe des Radiographie	9
Figure I.7: le contrôle Par courants de Foucault.....	10
Figure I.8 : Illustration du principe du CND par courants de Foucault	11
Figure I.9: Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants deFoucault.....	11
Figure I.10: Bobine parcourue par un courant I et flux magnétique généré par ce courant.....	12
Figure I.11: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de laprofondeur z.	13
Figure I.12: Schéma de principe de contrôle par courant de Foucault.....	14
Figure I.13: Représentation d'une bobine encerclant.....	14
Figure I.14: Représentation d'un palpeur.	15
Figure I.15: Représentation d'une sonde.	15
Figure I.17: Représentation d'un capteur à fonction séparée.....	16
Figure I.18: Représentation de l'appareillage utilisé pour la technique par courant pulsé.....	17
Figure I.19 : Configurations particulières de capteurs CF pour le contrôle des MCFC (CFRP)(a). Capteur tournant, (b). Capteurs à bobines orthogonales.....	19

Liste des figures

Chapitre II

Figure II.1 : fonction d'interpolation d'un élément.....	32
Figure II.2 : l'enchaînement des programmes de Flux 2D.....	34
Figure II.3 : géométrie de la machine étudiée.	35
Figure II.4 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.....	36
Figure II.5 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.....	36
Figure II.6: Les points de maillage	38
Figure II.7: Répartition du maillage	39
Figure II.8:Caractéristiques B(H) du matériau magnétique AZAZGA.	40
Figure. II.9 . CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations.....	40

Chapitre III

Figure III.1 : machine de AZAZGA.....	45
Figure III.2 : stator avec deux pièces magnétiques et conductrices de forme cylindrique	46
Figure III.3 : test expérimental	46
Figure III.4: le courant statorique de la phase (A) sans pipe.....	47
Figure III.6: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut.....	48
Figure III.7: le courant statorique de la phase (A) sans pipe.....	48
Figure III.8: le courant statorique de la phase (A) avec pipe.....	49
Figure III.9: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut.....	49
Figure III.10: le courant statorique de la phase (A) sans pipe.....	50
Figure III.11: le courant statorique de la phase (A) avec pipe.....	50
Figure III.12: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut.....	51
Figure III.13: le courant statorique de la phase (A) sans pipe.....	51

Liste des figures

Figure III.14: le courant statorique de la phase (A) avec pipe.....	52
Figure III.15: le courant statorique de la phase (A) pipe avec défaut.....	52
Figure III.16: la distribution des lignes du flux.....	53
Figure III.17: la distribution des lignes du flux.....	53
Figure III.18: l'induction magnétique.....	54
Figure III.19: l'induction magnétique.....	54
Figure III.21: le courant statorique de la phase A avec pipe.	55
Figure III.23: la distribution des lignes du flux.....	56
Figure III.24: la distribution des lignes du flux.....	56
Figure III.25: l'induction magnétique.....	57
Figure III.26: l'induction magnétique.....	57
Figure III.30: la distribution des lignes du flux.....	59
Figure III.32: l'induction magnétique.....	60
Figure III.34: l'induction magnétique.....	60
Figure III.35 : le courant statorique de la phase A sans pipe.....	61
Figure III.36 : le courant statorique de la phase A avec pipe.	61
Figure III.37 : le courant statorique de la phase A pipe avec défaut	61
Figure III.38: la distribution des lignes du flux.....	62
Figure III.39: la distribution des lignes du flux.....	62
Figure III.40: l'induction magnétique.....	63
Figure III.41: l'induction magnétique.....	63
Figure III.43 : le courant statorique de la phase A avec pipe.	64

Chapitre VI

Figure IV.1: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe sans défaut 65

Figure IV.2: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe avec défaut 66

Figure IV.3: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe sans défaut 66

Figure IV.4: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe avec défaut 67

Figure IV.5: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe sans défaut 67

Figure IV.6: le courant numérique et expérimental de la phase (A) pipe avec défaut 67

Figure IV.7: Spectre du courant statorique avec et sans défaut (20V) 68

Figure IV.9: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (40V)..... 69

Figure IV.10: Spectre du courant statorique avec et sans défaut (40V) 69

Figure IV.11: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (60V)..... 70

Figure IV.12: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (60V/50Hz)..... 70

Figure IV.13: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (80V)..... 71

Figure IV.14: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 150Hz (80V)..... 71

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 : Les techniques de C.N.D 4

Tableau I.2 : les avantages et les inconvénients de technique du CND [1] 9

Chapitre II

Tableau II.1 : Paramètres globales du dispositif..... 37

Tableau II.2: B(H) du matériau magnétique AZAZGA..... 40

Chapitre III

Tableau III.1 : les valeurs expérimentale et numérique de courant de la phase(A) 65

Chapitre VI

Tableau IV.1 : les valeurs de spectre de courant statorique (phase A) dans le test numérique 72

- [1] HADJ BRAHIM Boujemla, Cours Contrôle Non Destructif, ISET Siliana 2017/2018.
- [2] YUE LI, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques caractérisant des structures composites complexes », thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, 2012.
- [3] ALI RAID, CONTRÔLE NON DESTRUCTIF RESSUAGE, MAGNÉTOSCOPIE, RADIOGRAPHIE, COURANTS DE FOUCAULT ET ULTRASON, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Algérienne ,2017/2018.
- [4] TITOUAH Lounis et ZIANE Abdeslam , Caractérisation Non Destructive par Courants de Foucault Pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplé , UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE,2013/2014.
- [5] M. HAMEL, « Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [6] H. MENANA, « Modélisation 3D simplifiée pour l'évaluation non destructive des matériaux composites anisotropes », Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, France, 2009.
- [7] DEBOUB Ilyas, Etude Et Dimensionnement D'une Machine Supraconductrice, Université Mohamed Khider Biskra,2016/2017

Références bibliographiques

[8] HIRECHE Abdelhakim, Diagnostic des défauts de cassure de barres dans les machines asynchrones par la technique du rotor bloqué, Université Mohamed Khider Biskra, 2016/2017

[9] M. Feliachi, «Contribution au Calcul du Champ Electromagnétique par la Méthode des Eléments Finis en Vue d'une Modélisation Dynamique de Machines Electriques», thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, France 1981.

[10] Samir TALEB , Génération de symptômes flous par FFT et SWT applications à la détection de vibrations, DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE,2007

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la volonté, la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

*Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à **P.r Mimoune Souri Mohamed**. Mon encadreur pour le soutien, l'aide et les conseils qu'il m'a dispensés. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury **hamoudi mohamed** et **rezig mohame**, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions, je les remercie tout particulièrement pour l'attention et le temps qu'ils y ont consacrés pour lire ce manuscrit.*

Je remercie mes parents pour leurs contributions, leurs soutiens, leurs patiences, leurs prières et leurs encouragements.

*Je remercie, aussi, à toute l'équipe du laboratoire de génie électrique pour le soutien moral et pour leur accueil bienveillant et leurs conseils avisés surtout **khaled**.*

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à tous mes enseignants, mes proches et mes amis., pour leur encouragement au cours de la réalisation de ce travail et leur présence chaleureuse.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de Ce travail.

Table des matières

Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur le contrôle non destructif

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les techniques du CND.....	3
I.2.1 Examen visuel.....	4
I.2.2 Ressuage.....	4
I.2.3. Magnétoscopie.....	6
I.2.5 Thermographie.....	7
I.2.6 Radiographie.....	8
I.3 Le CND par courants de Foucault.....	10
I.3.1 Le principe du CND-CF.....	10
I.3.2 Principe physique de CND-CF	13
I.3.3 Différent types de capteurs.....	14
I.3.4 Modes de fonctionnement des capteurs.....	15
I.3.5 Différents modes d'excitation.....	16
I.3.6. Gammes de fréquences.....	17
I.4. Les capteurs et les fréquences utilisées dans les MCFC (CFRP).....	18
I.4.1 Les grandeurs exploitables.....	19
I.5 Conclusion.....	20

Table des matières

Chapitre II : Calcul de champ et MEF

II.2 Equations de Maxwell :	21
II.3 Signification physique des équations de maxwell	22
II.3.1 Loi induction de FARADAY	22
II.3.2 Lois d'Ampère:	22
II.3.3 La loi d'Ohm :	22
II.3.4 Lois de la conservation	23
II.3.5 Théorème de GAUSS :	23
II.4 Modèles en électromagnétiques	24
II.5 Formulation en termes de potentiel vecteur magnétique	27
II.6 Les méthodes numériques utilisées pour le calcul des champs	29
II.6.1 Méthode des Différences Finis (MDF)	30
II.6.2 Méthode des Volumes Finis (MVF)	30
II.6.3 Méthode des Eléments Finis (MEF)	30
II.7 LE PRINCIPE DE LA METHODE DES ELEMENT FINIS	31
II.8 Logiciel de résolution	32
II.9 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D	33
II.10 Les données du dispositif de étudiée	34
II.10.1 Procédure de construction du modèle par FLUX2D	38
II.10.2 Génération du maillage:	38
II.11. Le circuit électrique	40
II.12 Résultats de simulation par la magnétodynamique	41
II.13 CONCLUSION	42

Table des matières

Chapitre III : Contrôle par le champ tournant

III.1 Introduction.....	44
III.2. Description de la technique <i>FRem</i>	44
III.3 Résultats expérimentaux.....	47
III.4. Résultats numériques par le Flux2D.....	52
III.4.1 Cas : pour une tension simple	52
III.4.2 Cas : pour une tension simple	55
III.4.3 Cas : pour un tension simple 60V/50Hz	58
III.3.4 Cas : pour une tension simple 80V/50Hz.....	61
III.5 Conclusion.....	65

Chapitre IV : Analyse des courants par la technique de Fourier FFT

IV.1. Introduction.....	65
IV.2. Spectre de courant par la FFT.....	65
IV.2.1 cas de tension d'alimentation 20V.....	65
IV.2.2 cas de tension d'alimentation 40V.....	66
IV.2.3 cas de tension d'alimentation 60V :.....	67
IV.2.4 cas de tension d'alimentation 80V.....	68
IV.3 Conclusio.....	72
Conclusion Générale.....	73
Référence bibliographiques.....	74