

République Algérienne Démocratique et Populaire  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*



**UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES**  
**Faculté de Génie Electrique**  
**Département d'Electrotechnique**

Thèse présentée par :

**MERAHI Amir**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle : Réseaux Electriques/Commande des  
actionneurs électriques**

*Option : Réseaux Electriques*

Intitulé de la thèse :

**Etude et réalisation d'un séparateur semi-  
Industriel à courant de Foucault**

*Présentée devant le jury composé de :*

Pr. BENDAOU D Abdelber	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès	Président
Pr. MEDLES Karim	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès	Directeur de thèse
Pr. TILMATINE Amar	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès	Co- Directeur de thèse
Pr. OUIDDIR Rabah	Professeur	UST. MB. Oran	Examineur
Dr. MILOUDI Mohamed	MC. A	Université de Sidi Bel Abbès	Examineur

Soutenu le : 01 / 06 / 2016

# Dédicaces

*A cœur vaillant rien d'impossible  
A conscience tranquille tout est accessible  
Quand il y a la soif d'apprendre  
Tout vient à point à qui sait attendre  
Quand il y a le souci de réaliser un dessein  
Tout devient facile pour arriver à nos fins  
Malgré les obstacles qui s'opposent  
En dépit des difficultés qui s'interposent  
Les études sont avant tout  
Notre unique et seul atout  
Ils représentent la lumière de notre existence  
L'étoile brillante de notre réjouissance  
Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal  
Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal  
Espérant des lendemains épiques  
Un avenir glorieux et magique*

*Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis  
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri  
Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,  
Nous prions dieu que cette soutenance  
Fera signe de persévérance  
Et que nous serions enchantés  
Par notre travail honoré MC*



*Je dédie cette thèse à ...*



***A MA TRÈS CHÈRE MÈRE :***  
***MERAHI FATIMA***

*Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi.*  
*Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours.*  
*Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait.*  
*En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime.*  
*Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.*

***A MON TRÈS CHER PÈRE :***  
***MERAHI DJAMEL EDDINE***

*Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes sont-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance.*  
*Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie.*  
*Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite.*  
*Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter.*  
*Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal.*



## *A ma très chère épouse*

*Quand je t'ai connu, j'ai trouvé la femme de ma vie, mon âme sœur et la lumière de mon chemin. Ma vie à tes cotés est remplie de belles surprises.*

*Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénibles, de solitude et de souffrance.*

*Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.*

*Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce travail soit témoignage de mon amour, de mon admiration et de ma grande affection, je te prie de trouver dans ce travail l'expression de mon estime et mon sincère attachement.*

*Je prie dieu le tout puissant pour qu'il te donne bonheur et prospérité.*

*A mon très cher frère Salim Yassine, son épouse*

*Amina*

*Et leurs petits garçons*

*Yousef Abdelmalek & Ibrahim Abdel Jallil*



*A mon très cher petit frère Tayeb*

*Vous avez toujours été présents pour les bons conseils.*

*Votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours au  
long de ma vie professionnelle et personnelle.*

*Veillez trouver dans ce modeste travail ma reconnaissance pour  
tous vos efforts.*

*A mon oncle MOHAMMED et tous les membres de ma  
famille, petits et grands*

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon  
affection*

*A mes beaux-parents :*

*Lhaj ABED BOUMNED et Lhajja Zohra*

*Je ne pourrais jamais exprimer le respect que j'ai pour vous.  
Vos prières, vos encouragements et votre soutien m'ont toujours  
été d'un grand secours.*

*Puisse Dieu, le tout puissant vous préserver du mal, vous  
combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.*

*A mes beaux-frères et sœurs: Nadir, Khalifa Farouk, Mouna et  
son mari Nadir, Oum Farouk, Oum Nazim  
Ainsi qu'à leurs enfants FAROUK IYED ET NAZIM*

*Aux familles :*

*BENKADOUR BENATTIA, MCHERNEN, LOUATI,  
FIDOUH, HADER BEKRITI. BENGUELIL.*

*À la famille adoptive :*

*Membres de laboratoires IRECOM et APELLEC*

*Merci de m'avoir accueilli parmi vous.  
Puisse ce travail témoigner de ma profonde affection et de ma  
sincère estime.*

# Remerciements

*A mon directeur de thèse mon professeur  
MEDLES Karim*

*Les septes dernières années J'ai eu le privilège de travailler parmi  
votre*

*équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs.  
Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir  
M'a énormément marqués.*

*Veillez trouver ici l'expression de ma respectueuse  
considération et ma profonde admiration pour toutes vos  
qualités scientifiques et surtout humaines.*

*Ce travail est pour moi l'occasion de vous témoigner  
ma profonde gratitude.*

*A mon co-directeur de thèse le professeur  
TILMATINE AMAR*

*.Vous m'avez toujours réservé le meilleur accueil, malgré vos  
obligations professionnelles.*

*Vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre  
gentillesse méritent toute admiration.*

*Je saisi cette occasion pour vous exprimer ma  
profonde gratitude tout en vous témoignant mon respect.*



*Je tiens aussi à remercier les membres de mon jury :*

*Monsieur **Bendaoud Abdelber**, Professeur à l'Université Djillali*

*Liabes de Sidi Bel Abbés d'avoir accepté de présider ce jury.*

*Je suis très honoré que Monsieur **MILOUDI Mohamed** Maitre*

*de conférence à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés*

*Monsieur **Ouiddir Rabah** Maitre de conférences à l'USTO*

*, aient accepté d'être examinateurs de ce travail.*





## Terminologie et définitions

**Aimant** : objet fabriqué dans un matériau magnétique dur, c'est-à-dire dont le champ rémanent et l'excitation coercitive sont grands. Cela lui donne des propriétés particulières comme d'exercer une force d'attraction sur tout matériau ferromagnétique. Les aimants contiennent presque systématiquement des atomes d'au moins un des éléments chimiques suivants : fer, cobalt ou nickel, ou de la famille des Lanthanides (terres rares). Les aimants naturels sont des oxydes mixtes de Fer II et de Fer III de la famille des ferrites (oxyde mixtes d'un métal divalent et de fer). Ce sont des matériaux magnétiques durs (à cycle d'hystérésis large).

**Aimant Anisotropique** : Un aimant ayant une direction préférée d'orientation magnétique, pour que les caractéristiques magnétiques soient optimales dans une direction préférée.

**Aimant bipolaire** : aimant ayant les deux pôles sur le même côté.

**Aimant isotropique** : Un matériau d'aimant dont les propriétés magnétiques sont les mêmes dans n'importe quelle direction et qui peut donc être magnétisé dans n'importe quelle direction sans perte de caractéristiques magnétiques.

**Anisotropie** : Propriété de certaines magnitudes physiques spécifiques ayant des valeurs différentes selon certaines directions. Les aimants fabriqués anisotropiquement sont exposés à un champ magnétique élevé, dans une direction concrète, pendant le processus de frittage. Dans la direction de ce champ magnétique on atteint des valeurs magnétiques supérieures à une direction transversale.

**Bobines d'Helmholtz** : Les bobines d'Helmholtz, du nom d'Hermann Ludwig von Helmholtz, sont un dispositif constitué de deux bobines circulaires de même rayon, parallèles, et placées l'une en face de l'autre à une distance égale à leur rayon. En faisant circuler du courant électrique dans ces bobines, un champ magnétique est créé dans leur voisinage qui a la particularité d'être relativement uniforme au centre du dispositif dans un volume plus petit que les bobines elles-mêmes.

**Calibration** : (d'un aimant permanent) En général, la tolérance du flux magnétique est de  $\pm 10\%$ . Cependant, dans certaines applications, il est nécessaire d'atteindre une tolérance plus petite.

**Champ rémanent** : est le champ magnétique existant dans le matériau en l'absence de courant.

**Chemin de Retour** : élément de conduction dans un circuit magnétique qui présente un chemin de basse réticence au flux magnétique.

**Circuit fermé :** circuit d'aimant dont le flux externe est limité par un matériau de haute perméabilité.

**Circuit magnétique :** Assemblage consistant de certains ou toutes choses suivantes : aimants permanents, éléments de conduction ferromagnétiques, vides aériens, courants électriques.

**Coefficient de perméabilité,  $P_c$  :** Proportion de l'induction magnétique,  $B_d$ , à sa propre force de démagnétisation,  $H_d$ .  $P_c = B_d / H_d$ . Aussi appelé "ligne de charge", "la pente de la ligne d'exploitation", ou point opérant de l'aimant et qui est utile dans l'évaluation de la production du flux de l'aimant dans diverses conditions. Comme première ordre approximation,  $B_d / H_d = L_m / L_g$ , où  $L_m$  est la longueur de l'aimant et  $L_g$  est la longueur d'un vide aérien auquel l'aimant est soumis. Le  $P_c$  est donc une fonction de la géométrie du circuit magnétique.

**Coercivité,  $H_{ci}$  Ou  $I_{hc}$  :** Il s'agit de la résistance d'un matériel magnétique à la désaimantation. La valeur  $H$  annule l'induction magnétique ou l'émanation et elle est mesurée en Oersteds ou en Ampères par mètre A/m.

**Coercivité Intrinsèque :** Valeur du champ, mesurée en Oersteds ou en A/m, qui indique la résistance d'un matériel à la désaimantation. La valeur maximale est obtenue après avoir porté l'aimant vers la saturation.

**Conservateur :** Un morceau de fer doux qui est placé sur ou entre les poteaux d'un aimant, diminuant la réticence du vide aérien et réduisant ainsi la fuite de flux de l'aimant.

**Constante magnétique,** également nommée **perméabilité du vide** ou encore permittivité magnétique du vide, est une constante physique. Elle est symbolisée par  $\mu_0$ . Sa valeur est exactement :  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ . La constante magnétique est souvent exprimée en Henry par mètre :  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ . La valeur donnée est exacte par définition de l'ampère.  $\mu_0$  peut être vue comme la perméabilité magnétique intrinsèque du vide.

**Courbe de démagnétisation :** Le deuxième quart de cercle de la boucle d'hystérésis, décrivant généralement le comportement des caractéristiques magnétiques dans leur utilisation réelle. Aussi connu comme la Courbe de B-H. C'est la partie de la courbe d'un cycle complet d'hystérésis dans le deuxième cadran qui définit les principales propriétés magnétiques d'un aimant. Elle décrit le changement dû à l'induction magnétique ou à la désaimantation depuis la valeur de rémanence jusqu'à zéro en y appliquant un champ en sens négatif.

**Courbe De Hystérésis :** Il s'agit de la courbe fermée obtenue au moment de mesurer l'induction  $B$  ou l'aimantation  $M$  quand elle est soumise à un champ magnétique  $H$  qui décrit un cercle complet entre les limites définies par l'induction ou l'aimantation de saturation du premier quadrant au troisième.

**Densité Du Flux :** Flux magnétique par secteur d'unité d'une section normale à la direction de flux. Aussi connu comme induction magnétique. Mesuré en Gauss, dans le système cgs d'unités. Il s'agit d'une façon de définir le champ d'induction comme le numéro de ligne de force par unité de l'aire :  $B = \frac{\Phi}{A}$

**Diamagnétique :** Propriété magnétique des matériaux qui présentent des valeurs de perméabilité inférieures à 1 (ex. : argent, cuivre, eau, or, plomb, zinc...)

**Direction d'Orientation :** La direction dans laquelle un aimant anisotrope doit être magnétisé pour réaliser des propriétés magnétiques optimales. Aussi appelé "axe", "axe facile", ou "angle d'inclinaison".

**Entrefer :** Il s'agit de l'espace magnétique entre les pôles d'un aimant, qui peut être rempli de n'importe quel matériel non magnétique, comme le laiton, le bois ou le plastique.

**Excitation coercitive :** Avec la valeur de l'excitation coercitive **Hc** on peut savoir quelle est l'intensité du champ magnétique opposé nécessaire pour complètement démagnétiser un aimant. Autrement dit, plus sa valeur est grande et plus l'aimant gardera ses capacités magnétiques quand il sera soumis à un champ de direction opposée. Il sera fait une différence entre l'excitation coercitive  $bH_c$  d'intensité de flux et l'excitation coercitive  $jH_c$  de polarisation. Si l'aimant est plongé dans un champ contraire de valeur  $bH_c$ , il n'y a plus de flux magnétique visible. L'aimant lui-même est toujours magnétique, les champs s'annulent simplement. C'est seulement si l'aimant est soumis à un champ contraire de valeur supérieur à  $jH_c$  qu'il perdra sa magnétisation. L'unité du SI pour l'intensité du champ magnétique est l'ampère par mètre (A.m<sup>-1</sup>).

**Ferromagnétique :** Propriété magnétique des matériaux qui présentent des valeurs de perméabilité supérieures de 60 à plusieurs milliers de fois à  $\mu_0$  et qui présente des phénomènes d'hystérésis. Ex. : (cobalt, fer, mumétal, nickel...).

**Flux :** Il s'agit du nombre de « lignes magnétiques de force », mesurées en Gauss ou en Tesla. Ces lignes peuvent être visualisées en utilisant de la poussière de fer. Quand l'induction magnétique est normale à la superficie, alors le flux est  $B = \frac{\Phi}{A}$ . Le flux d'induction magnétique  $F$  qui traverse une surface est égal au nombre de lignes de forces du champ d'induction magnétique  $B$  qui pénètre une surface  $S$ .

**Fluxmètre :** Appareil pour mesurer le flux magnétique qui marche comme amplificateur opérationnel.

**Force Coercitive, Hc :** Aussi appelée coercivité. C'est le champ magnétique  $H_c$  nécessaire pour réduire l'induction  $B$  ou l'aimantation  $M$  à zéro. Elle est mesurée en Oersteds ou en Ampères / mètres et elle sert à mesurer la résistance d'un matériel magnétique à sa désaimantation.

**Force De Champ Magnétique :** C'est la force d'aimantation ou de désaimantation, mesurée en Oersteds. Elle détermine l'habileté d'un courant électrique, ou un matériel magnétique pour produire un champ magnétique dans un point déterminé.

**Force Magnétomotrice, F :** Analogue à la tension dans les circuits électriques, c'est la différence magnétique potentielle entre n'importe quels deux points.

**Fuite de Flux :** Partie du flux magnétique qui est perdu par la fuite dans le circuit magnétique en raison de la saturation ou des vides aériens et qui donc est incapable d'être employé.

**Gauss :** Unité de mesure de l'induction, B, dans le système gaussien.  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$  ;  $1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$  Lignes de flux magnétique par centimètre carré en unité de densité de flux cgs , équivalent aux lignes par pouce carré dans le système anglais et Weber par mètre carré ou Tesla dans le système SI.

**Gaussmètre :** Appareil utilisé pour mesurer la valeur instantanée de l'induction magnétique B.

**Hystérésis :** Il s'agit de la capacité d'un matériel magnétique à conserver la force magnétique au moment d'être exposée à une force de désaimantation.

**Induction Intrinsèque, Bi :** la contribution du matériel magnétique à l'induction totale magnétique, B. C'est la différence vectorielle entre l'induction magnétique dans le matériel et l'induction magnétique qui existerait dans un vide sous la même force des champs, H. Ce rapport est exprimé comme :  $B_i = B - H$ .

**Induction Magnétique :** Il s'agit de la force d'aimantation ou de désaimantation, mesurée en Oersteds, qui détermine la capacité d'un courant électrique, ou d'un matériel magnétique, à infliger un champ magnétique sur un point déterminé.

**Induction magnétique B :** couramment appelé induction, est un phénomène qui lie la tension électrique dans une boucle conductrice et la variation d'un champ magnétique la traversant. Cette tension est fréquemment appelée force électromotrice ou FEM.

**Induction Résiduelle, Br :** c'est le point auquel la boucle d'hystérésis croise l'axe B à zéro de la force de magnétisation et représente la production de flux maximale du matériau aimanté donné. Par définition, ce point apparaît au point zéro du vide aérien et ne peut pas être utilisé dans les matériaux aimantés.

**Isotropie :** Un aimant est considéré isotropique quand ses propriétés sont indépendantes de son orientation. Les particules sont orientées de façon aléatoire. Elles ne possèdent pas d'orientation magnétique préférée, ce qui permet d'aimanter dans n'importe quelle direction.

**Maxwell :** Unité par flux magnétique dans le système de mesure de Gauss. Un Maxwell équivaut à une ligne de flux magnétique.

**Oersted, Oe** : unité de mesure cgs pour décrire la force de magnétisation. L'équivalent en système anglais est l'Ampère/tour par Pouce et, en systèmes SI l'Ampère/tour par mètre. L'unité de force de champ magnétique, H, dans le système électromagnétique GSM.  $1 \text{ Oersted (Oe)} = 0,8 \text{ A/cm}$ .

**Paramagnétique** : Propriété magnétique des matériaux qui présente des valeurs de perméabilité proche de 1. La perméabilité absolue  $\mu$  des matériaux diamagnétiques et paramagnétiques est donc pratiquement égale à celle du vide, c'est-à-dire  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ . (ex.: air, aluminium, magnésium, platine...)

**Perméabilité magnétique** : Est la faculté d'un matériau à produire un champ magnétique, c'est à dire à concentrer les lignes de flux magnétique et donc à augmenter la valeur de l'induction magnétique. Cette valeur de l'induction magnétique dépend ainsi du milieu dans lequel il est produit.

**Perméabilité Relative** : Le rapport de la perméabilité d'un matériau à celui d'un vide. Dans le système cgs, la perméabilité est par définition égale à 1 dans le vide. La perméabilité de l'air est aussi en pratique égale à 1.

**Perméamètre** : Appareil utilisé pour calculer la perméabilité des noyaux de basse perméabilité, et qui mesure les caractéristiques d'un matériel.

**Permissivité** : L'inverse de la réticence (reluctance), analogue à conductance dans circuits électriques.

**Permittivité** : La permittivité d'un matériau en électromagnétisme, est le rapport D/E du déplacement électrique (aussi appelé induction électrique ou excitation électrique) D (en Coulombs par mètre carré) et de l'intensité du champ électrique E (en volts par mètre). La permittivité est exprimée en Farads par mètre (F/m).

**Perte Irréversible** : Changements irréversibles qui se donnent quand un aimant se désaimante partiellement ou complètement à cause de l'exposition à hautes ou basses températures, ou à cause d'autres facteurs tels que les champs externes de désaimantation. Quand les aimants sont à nouveau aimantés, ces pertes sont récupérées. Définies comme démagnétisations partielles d'un aimant causées par champs externes ou d'autres facteurs. Ces pertes sont seulement récupérables par la remagnétisation. Les aimants peuvent être stabilisés pour empêcher la variation de performances causée par des pertes irréversibles.

**Pôle Nord** : Pôle magnétique d'un aimant qui est attiré par le Pôle Sud géographique de la Terre.

**Pôle Sud** : Pôle magnétique d'un aimant attiré par le Pôle Nord géographique de la Terre.

**Produit d'énergie (Bh) Max** : Il s'agit de l'énergie qu'un matériel magnétique peut fournir à un circuit magnétique externe quand il opère sur un point de sa courbe de désaimantation. Il est mesuré en megaGauss-Oersteds, MGOe, ou en  $\text{kJ/m}^3$ . BHmax représente l'énergie maximum qui peut être emmagasinée dans un

aimant. L'unité utilisée est le  $\text{kJ.m}^3$  (kilo joule par mètre cube) ou MGOe (méga Gauss Oersted).

**Rémanence ( $B_r$ )** : Il s'agit de l'aimantation résiduelle de l'aimant qui a été aimanté jusqu'à la saturation dans un circuit fermé.  $B_r$  est calculé en Tesla (T), miniTeslas (mT) ou en Gauss (G), et il correspond à l'induction magnétique ressortissant dans le matériel après avoir été aimanté jusqu'à la saturation et préparé pour son usage final. La rémanence  **$B_r$**  mesure l'induction ou la densité de flux persistante dans un aimant après avoir été magnétisé. Pour simplifier, plus cette valeur est grande et plus l'aimant est fort. La densité de flux magnétique se mesure en Tesla (T). Le **Gauss (G)** est aussi utilisé, **1Tesla = 10.000 Gauss**.

**Résistivité électrique** : Il s'agit de la résistance électrique au flux de courant par unité de longueur du matériel (ohm/cm).

**Saturation** : Il s'agit de la valeur maximale de l'aimantation, en faisant référence à la descente de la perméabilité avec la force d'aimantation croissante. Il s'agit du flux de densité d'une valeur maximale d'aimantation, la polarisation magnétique plus élevée qu'un aimant peut obtenir. Dans le cas d'un inducteur, elle correspond à la descente de l'inductance par courant. Condition dans laquelle tous les moments magnétiques élémentaires sont devenus orientés dans une direction. Un matériel ferromagnétique est saturé quand une augmentation de la force de magnétisation appliquée ne produit aucune augmentation de l'induction. La densité du flux de saturation pour les aciers est dans la gamme de 16.000 à 20.000 Gauss.

**Stabilisation** : Exposition d'un aimant aux influences de démagnétisation pouvant être rencontrées dans l'utilisation pour empêcher des pertes irréversibles en utilisation réelle. Les influences de démagnétisation peuvent être causées par des températures hautes ou basses, ou par des champs magnétiques externes.

**Susceptibilité magnétique** : La susceptibilité magnétique est la faculté d'un matériau à réagir à l'action d'un champ magnétique. La réaction est de deux types : apparition d'une force mécanique et aimantation du matériau.

**Tesla** : Unité pour la densité du flux magnétique, **1 Tesla = 1 Vs/m ou 10.000 Gauss**.

**Weber** : Unité par flux magnétique, **Weber =  $10^{-8}$  Maxwell = 1 Vs. Maxwell = 1 Vs**. Unité pratique de flux magnétique. C'est la quantité de flux magnétique qui incitera, lorsqu'il est lié à un débit uniforme d'un circuit électrique simple tour pendant un intervalle de 1 seconde, dans ce circuit une force électromotrice de 1 volt.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art</b>	
I. 1. Propriétés exploitées pour le tri des déchets	03
I.1.1. Propriétés optiques	03
I. 1.2. Propriétés mécaniques	04
I. 1.3. Propriétés liées à la taille et à la morphologie	04
I. 1.4. Propriétés électriques, magnétiques et électromagnétiques	04
I. 1.5. Propriétés de surface	05
I. 2. Techniques de tri automatique :	05
I. 3. Etat des lieux du tri automatique	05
I. 4. Détection de métaux ferreux ou non ferreux	07
I. 4.1. Métaux ferreux	08
I. 4.2. Métaux non-ferreux	09
I. 5. Séparateur magnétique	10
I. 5.1. Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)	11
I. 5.2. Séparation magnétique à haute intensité (SMHI)	12
I. 5.3. Séparation magnétique à haut gradient de champ (SMHG) et /ou à haut champ	14
I. 6. Séparateur des métaux non ferreux par Courants de Foucault	16
I. 6.1. Principe de la séparation par courants induits.	16
I. 6.2. Classification des séparateurs à courant de Foucault.	17
I.7. Application des Courants de Foucault	22
I.8. Théorème et lois fondamentaux de magnétisme	22
I.8.1. Champ et induction magnétiques	22
I.8.2. Loi de Faraday-Lenz	22
I.8.3. Les Courants de Foucault	22
I.9 Propriétés et comportement électromagnétique des matériaux	24
I.9.1. Propriétés magnétiques	24
I.9.2. Les différentes familles des aimants	26
I.10. Conclusion	28

## **Chapitre II :**

### **Simulation numérique du séparateur à courant de Foucault**

<i>II.1.Équations de Maxwell</i>	<i>29</i>
<i>II.1.1 Considération du mouvement</i>	<i>30</i>
<i>II.1.2 Équation générale en termes de potentiel vecteur</i>	<i>30</i>
<i>II.1.3 Conditions aux limites</i>	<i>33</i>
<i>II.2.Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles</i>	<i>33</i>
<i>II.2.1 Méthode des différences finis (MDF)</i>	<i>34</i>
<i>II.2.2 Méthode des volumes finis (MVF)</i>	<i>34</i>
<i>II.2.3 Méthode des éléments finis (MEF)</i>	<i>35</i>
<i>II.3.Simulation numérique du séparateur a courant de Foucault</i>	<i>37</i>
<i>II.4. Introduction à COMSOL MULTIPHYSIQUES</i>	<i>37</i>
<i>II.4.1 Prise en main du logiciel</i>	<i>38</i>
<i>II.4.2 Les potentialités et les performances de COMSOL MULTIPHYSICS</i>	<i>40</i>
<i>II.4.3 Création et vérification des données</i>	<i>42</i>
<i>II.4.4 Erreur et précision de calcul</i>	<i>42</i>
<i>II.5 Modèle numérique</i>	<i>43</i>
<i>II.5.1 Définition du système</i>	<i>43</i>
<i>II.5.2 La géométrie</i>	<i>43</i>
<i>II.5.3 Création des matériaux</i>	<i>45</i>
<i>II.5.4 Définition physique des régions</i>	<i>45</i>
<i>II.5.5 Le maillage</i>	<i>46</i>
<i>II.5.6 Résultats de simulation</i>	<i>47</i>
<i>II.6 Paramètres de conception</i>	<i>48</i>
<i>II.6.1 Influence du choix de type d'aimantation (radial /parallèle)</i>	<i>49</i>
<i>II.6.2 Influence du choix de la disposition d'aimant permanent</i>	<i>51</i>
<i>II.6.3 Influence du choix du nombre de pole</i>	<i>53</i>
<i>II.6.4 Influence de l'entrefer</i>	<i>55</i>
<i>II.7 Paramètres influençant la séparation</i>	<i>55</i>
<i>II.7.1 Influence de l'intensité de l'induction rémanente des aimants permanents</i>	<i>56</i>
<i>II.7.2 Influence de la vitesse de rotation</i>	<i>57</i>
<i>II.7.3 Influence de la taille de la particule</i>	<i>58</i>
<i>II.7.4 Influence de la forme de la particule</i>	<i>59</i>
<i>II.7.5 Influence de la conductivité</i>	<i>59</i>
<i>II.8 Conclusion</i>	<i>60</i>



## **Chapitre III :**

### **Développement et Conception d'un procédé de séparation À Courant de Foucault**

<i>III.1. Mécanisme de séparation à courant de Foucault</i>	62
<i>III.2. Développement du procédé de séparation par courant de Foucault</i>	63
<i>III.2.1. Premier prototype (banc d'essai à l'échelle laboratoire)</i>	63
<i>III.2.2. Second prototype</i>	65
<i>III.2.3. Réalisation d'un séparateur semi-industriel à courant de Foucault</i>	68
<i>III.3. Conclusion.</i>	76

## **Chapitre IV :**

### **Modélisation et optimisation d'un séparateur à courant de Foucault**

<i>IV.1 Méthodologie des plans d'expériences</i>	77
<i>IV.2 Installation d'un procédé de séparation à courant de Foucault des métaux non ferreux</i>	78
<i>IV.3 Essais préliminaires pour l'étude de l'influence des variables de contrôle</i>	79
<i>IV.3.1 Influence de la vitesse de rotation du tambour</i>	79
<i>IV.3.2 Influence de la taille des pièces conductrices</i>	80
<i>IV.3.3 Influence de vitesse du tapis roulant</i>	80
<i>IV.4 Modélisation du processus de séparation à courant de Foucault</i>	81
<i>IV.4.1 Intervalle d'étude de la vitesse de rotation du tambour</i>	81
<i>IV.4.2 Intervalle d'étude de la vitesse du tapis roulant</i>	81
<i>IV.4.3 Intervalle d'étude de la taille des pièces conductrices</i>	82
<i>IV.5 Application de la méthode du plan d'expérience composite</i>	82
<i>IV.5.1 Calcul des coefficients</i>	83
<i>IV.5.2 Analyse statistique des modèles</i>	84
<i>IV.5.3 Qualité descriptive du modèle</i>	88
<i>IV.6. Influence des facteurs choisis sur les réponses</i>	88
<i>IV-7 Détermination du point de fonctionnement optimal</i>	89
<i>IV-8. Vérification du point de fonctionnement optimal</i>	90
<i>IV.9. Conclusion</i>	93
<b>Conclusion générale</b>	94
<i>Annexes</i>	96
<i>Références bibliographiques</i>	98



# *Introduction générale*



# Introduction générale

Le recyclage de matière provenant des déchets est devenu un enjeu national stratégique et une priorité dans la gestion de l'environnement. Le contexte réglementaire et le contexte de raréfaction des ressources donnent des perspectives de croissance forte du recyclage de la matière des déchets. Les déchets ainsi récupérés pourront être utilisés en matières premières secondaires (diminution de la consommation de matière première) ou valorisés en utilisant leurs propriétés améliorées (pouvoir calorifique ou fraction fermentescible plus élevés par exemple).

Le tri est l'étape préalable indispensable au recyclage des matériaux. Il rend possible la transformation d'un flux de déchets mélangés et non directement valorisables en plusieurs fractions dont certaines se prêteront mieux au recyclage de la matière. Certaines filières de recyclage de « matière » devront se développer. Le développement ou l'optimisation de ces filières nécessitera non seulement des sauts technologiques pour le tri (automatisation des procédés existants et amélioration des filières...) mais aussi des avancées en matière de captation du gisement. Cependant le marché du recyclage qui se situe en aval du tri est encore insuffisamment développé. Les difficultés de mobilisation du gisement, de capacité de valorisations insuffisantes, de volatilité des marchés des produits de récupération et de variabilité de la demande extérieure sont autant de freins à ce développement.

Recycler le métal non-ferreux et l'aluminium en particulier offre plusieurs avantages. D'une démarche civique et écologique, ce recyclage est aussi un moyen économique. Sur le plan écologique, 95 % de l'énergie nécessaire pour produire le métal primaire est économisé. Si la plupart des produits en aluminium sont recyclés, c'est aujourd'hui sur les emballages aluminium qu'il faut optimiser le travail.

Compte tenu de la volatilité des prix des matières premières qui le plus souvent ne cessent d'augmenter, il est dans bien des cas indispensable de détecter la présence de métaux ferreux ou non et en réaliser l'extraction, que ce soit à des fins d'épuration ou de valorisation de déchets, métaux, minéraux ou matières plastiques.

La production de déchets solides en Algérie a connu une augmentation durant ces dernières années, dont le ratio par habitant dans une zone urbaine est de 0,7 kg/j/h, soit près de 9 millions de tonnes par an. La plupart de ces déchets sont acheminés vers des décharges ou des centres d'enfouissement. Plus de 10% de déchets éliminés sont de plastique. À cette situation, le recyclage de matières utilisées ou des emballages est le mode préconisé dans les pays développés. En Algérie, cette option reste très peu développée et le secteur informel est l'acteur important en matière de récupération. Parmi ces actions, la promotion des activités de recyclage et de valorisation des déchets doit être fortement encouragée. Cependant, le recyclage a d'autres objectifs : il économise l'espace dans les centres d'enfouissement des

déchets; il baisse les dépenses de traitement des déchets solides municipaux ; il améliore la qualité de l'environnement en réduisant les quantités des déchets [1].

C'est dans ce contexte que la séparation à courant de Foucault peut jouer un rôle important dans la récupération et l'extraction des matières métalliques ainsi que la minimisation de l'utilisation de ressources.

Cette technique permet de séparer des mélanges comprenant des objets isolants, ferreux et non ferreux de tailles différentes, par le biais d'une distribution de champ magnétique intense qui agit de façon sélective sur les objets qui présentent une aimantation différentielle par rapport au milieu d'existence. Le résultat de l'opération est de collecter les objets non ferreux d'un type de matériau (Al, Cu, Zn.....) dans un compartiment, isolants (plastique, verres, bois ..... ) et ferreux dans un autre compartiment. En outre, la particularité de ce procédé est l'utilisation d'un champ magnétique élevé produit par des aimants permanents de forte intensité [1].

L'objectif principal du travail effectué dans le cadre de cette thèse est l'étude et la réalisation d'un dispositif de séparation à courant de Foucault, utilisant un cylindre tournant pour la génération du champ magnétique variable, causant des courants induits dans les métaux non ferreux. De ce fait, une étude numérique approfondie des phénomènes physiques régissant le système ainsi que des paramètres contribuant à l'optimisation de la conception du séparateur à courant de Foucault, a été effectuée. Ensuite, une étude paramétrique détaillée a été réalisée en considérant tous les facteurs possibles et en utilisant par la suite la méthode des plans d'expérience pour la modélisation et l'optimisation de ce procédé.

La thèse est répartie en 4 chapitres. **Le premier chapitre** décrit l'état de l'art sur les techniques de tris des déchets domestiques et industriels, ainsi que les différents types de séparation magnétique existants.

**Le deuxième chapitre** présente une simulation numérique des paramètres intervenants dans la séparation par courant de Foucault, en utilisant le logiciel COMSOL MULTIPHYSQUES à base d'éléments finis, et ce dans le but d'aboutir à la conception du dispositif magnétique avec des paramètres de fonctionnement optimal.

**Le troisième chapitre** fait l'objet de la conception et du développement d'un procédé de séparation à courant de Foucault pour matériaux non ferreux, suivis par des expériences préliminaires pour l'analyse paramétrique et la validation des résultats numériques.

**Le quatrième chapitre** est dédié à la modélisation expérimentale et la recherche du point de fonctionnement optimal du séparateur, en utilisant la méthode des plans d'expérience.



# *Chapitre I :* *Etat de l'art*

# Chapitre I : Etat de l'art

Depuis quelques années la qualité de l'air et de la terre se détériore en raison de certains paramètres, dont notamment la pollution et l'accroissement du nombre de déchets. C'est pour cela qu'actuellement, de nombreux pays cherchent des alternatives pour pallier à ce problème. C'est ainsi, qu'apparaît la notion de développement durable, avec par exemple sur le plan énergétique, l'apparition des éoliennes ou de la géothermie. Cependant l'aspect du développement durable que nous avons choisi d'étudier est le recyclage, la valorisation des déchets et leur réutilisation [6].

Le dossier des déchets est arrivé à maturité. Les directives mondiale ont fixé des résultats à atteindre, les lois ont défini des obligations, les techniques ont évolué, les connaissances se sont améliorées, les industriels sont préparés, les " citoyens consommateurs " sont disposés à adopter de nouvelles règles de comportement, les collectivités locales sont prêtes. Tout contribue au changement. C'est aujourd'hui l'heure des choix. Pendant longtemps, l'alternative était simple. Le gestionnaire de déchets n'avait d'autre choix que celui de les mettre en décharge ou de les incinérer, de les éloigner ou de les brûler, avec ou sans récupération d'énergie, mais surtout s'en débarrasser, sans trop s'occuper des conséquences qui, à terme, pouvaient survenir. La " valorisation matière ", qui consiste au " réemploi, au recyclage ou à toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ", était certes une voie toujours citée, mais en réalité bien peu suivie. Faute de collecte appropriée, faute de traitement adapté dans des conditions économiques satisfaisantes, faute peut-être aussi, de volonté claire. L'Office Mondiale a donc jugé utile de présenter à l'opinion les nouvelles possibilités de traitement des déchets [6].

Cependant, le recyclage a d'autres objectifs : il économise l'espace dans les centres d'enfouissement des déchets ; il baisse les dépenses de traitement des déchets 5 solides municipaux; il améliore la qualité de l'environnement en réduisant les quantités des déchets.

## I.1. Propriétés exploitées pour le tri des déchets [7]

Les procédés de tri, des déchets ou d'autres types d'objets, reposent sur la possibilité de différencier ces objets en fonction de certaines de leurs propriétés. Dans le cas des déchets, les propriétés exploitées pour le tri automatique sont nombreuses. Elles sont présentées ci-dessous.

### I.1.1. Propriétés optiques

Ces propriétés varient en fonction de la nature des matériaux. Ainsi, les matières plastiques absorbent différemment les infrarouges, et peuvent être identifiées en fonction de leur spectre infrarouge caractéristique. Les propriétés optiques des

matériaux peuvent également être exploitées dans le domaine du visible: un tri par couleur est alors possible.

### **I.1.2. Propriétés mécaniques**

Plusieurs des propriétés mécaniques des matériaux sont utilisés dans les procédés de tri. Ces propriétés sont par ailleurs le plus souvent associées aux propriétés liées à la forme et à la taille des déchets à séparer. C'est le cas par exemple pour le crible à disque, qui permet d'opérer une séparation en fonction de la forme, de la taille, de la rigidité et/ou de l'élasticité des objets.

Certaines propriétés sont plus spécifiquement exploitées sur des déchets présentés sous forme de broyats. La résistance aux contraintes (dureté, tenue aux chocs,...) permet de différencier les matériaux lors d'une étape de broyage ; chaque matériau résiste différemment à un ensemble d'opérations : compression, cisaillement, impact, torsion, flexion, délaminage,...).

D'autre part, les broyats peuvent être différenciés par la densité des matériaux qui les composent. Ils peuvent notamment être séparés en fonction de leur comportement particulier dans un fluide tel qu'un gaz (séparateur aéraulique) ou un liquide (mécanisme de flottaison).

### **I.1.3. Propriétés liées à la taille et à la morphologie**

De nombreux procédés de séparation utilisent les différences de forme et de taille des objets pour leur séparation ; c'est le cas notamment des procédés utilisant des cribles.

La séparation par la forme est utilisée essentiellement pour le tri des objets plats (papiers, journaux, films plastiques,...) et des objets creux (bouteilles, briques d'emballage,...). La séparation par taille est effectuée sur des objets entiers ou sur des broyats. On met alors à profit les différences de granulométrie entre objets.

Les propriétés liées à la forme et à la taille sont souvent associées aux propriétés mécaniques des déchets.

### **I.1.4. Propriétés électriques, magnétiques et électromagnétiques**

Les propriétés électriques des matériaux sont utilisées pour les séparer grâce aux phénomènes d'attraction ou de répulsion avec l'équipement de tri. Ainsi, certains matériaux sont projetés, alors que d'autres « adhèrent » à l'équipement avant de tomber par gravité.

Pour exploiter les propriétés électriques des matériaux, il faut opérer leur mise en charge. Celles-ci est effectuée soit par bombardement ionique ou charge Corona, soit en utilisant le phénomène de triboélectricité, qui repose sur la capacité de générer des charges électriques superficielles par frottement.

Les propriétés magnétiques (des métaux ferreux) sont mises à profit pour leur séparation ; l'équipement de tri comporte alors un aimant permanent ou une bobine électromagnétique.

On peut également utiliser la propriété de certains matériaux (métaux non-ferreux) à devenir magnétique sous l'effet d'un courant électrique; ce magnétisme est dû à la formation de courants à l'intérieur du matériau.

### **I.1.5. Propriétés de surface**

Les propriétés de surface des matériaux peuvent également être mises à profit pour les séparer. Dans un liquide, certaines substances peuvent ainsi se « fixer » à des bulles d'air ; elles acquièrent ainsi une densité artificiellement réduite. Le mécanisme de fixation à l'air peut être facilité par l'ajout de réactifs ayant des propriétés de diminution des tensions de surface. Le procédé de flottation utilise ce principe.

### **I.2. Techniques de tri automatique :**

Au cœur de la chaîne de gestion globale des déchets, l'activité de tri intervient juste après la phase de collecte et de récupération, et juste avant les étapes de valorisation, de traitement et de stockage des résidus.

Suivant la nature du flux de déchets et le devenir des matériaux à trier, on peut définir deux types de tri [7] :

**tri négatif** qui consiste à extraire d'un flux de déchets une ou plusieurs fractions indésirables pour ne conserver en fin de tri qu'une fraction résiduelle valorisable. Cela nécessite que le flux entrant soit suffisamment pur et fourni en matériau valorisable. Dans le cas contraire, il faut prévoir la possibilité de passer facilement à l'autre type de tri ;

**tri positif** qui consiste à prélever d'un flux de déchets une fraction valorisable. C'est le procédé le plus couramment utilisé car il s'applique à tout type de flux.

### **I.3. Etat des lieux du tri automatique**

Sous le terme de « tri automatique des déchets », beaucoup de techniques très différentes dans leur nature peuvent être regroupées. Cette étude se limite aux procédés mis en œuvre dans les centres de tri et/ou chez les transformateurs de matière [7].

Les techniques retenues sont celles qui concernent le tri :

- *aéraulique* ;
- *électrostatique* ;
- *hydraulique* ;
- *magnétique* ;
- *mécanique* ;
- *optique* ;
- *thermique*.



Dans le tableau I.1 suivant sont présents les principaux procédés développés pour le tri automatique des déchets et les domaines d'application dans lesquels ils sont pertinents. Un procédé y est retenu comme pertinent s'il est effectivement utilisé de manière courante dans cette application ou si il pourrait techniquement l'être.

Tableau I.1: Pertinence des procédés appliqués aux grandes filières de déchets considérés [8-13].

N	Procédé / Application	Emballages et plastiques	DEEE	VHU	DIB
1	Crible plan	**	**	**	**
2	Crible à disques ou à étoiles	***	**	**	***
3	Crible à godets	*	-	-	**
4	Crible cylindrique (trommel)	***	**	**	***
5	Trommel aéraulique	**	-	-	**
6	Séparateur balistique	***	-	*	**
7	Table inclinée	*	-	-	*
8	Séparateur aéraulique	***	*	***	***
9	Classificateur hydraulique, flottaison	*	***	***	**
10	Classificateur hydraulique, flottation	*	***	***	*
11	Classificateur hydraulique, cyclone	*	***	***	*
12	Extracteur magnétique des métaux ferreux	***	***	***	***
13	Extraction des métaux non ferreux par Courants de Foucault	**	***	***	***
14	Détection des métaux non ferreux par Courants de Foucault	***	***	***	**
15	Séparateur électrostatique	**	***	***	**
16	Séparateur triboélectrique	**	***	***	**
17	Spectrométrie proche infrarouge sur emballages plastiques	***	-	-	
18	Spectrométrie proche infrarouge sur copeaux plastiques	***	***	***	***
19	Spectrométrie en infrarouge moyen	*	***	***	*
20	Spectrométrie en fluorescence X	**	**	**	**
21	Spectrométrie dans le domaine visible (colorimétrie)	***	*	***	**
22	Séparation thermique des plastiques	*	*	*	*
23	Broyage différentiel	***	***	***	***

Tableau I.2: Croisement des fiches « procédé » et des performances (note : celles-ci dépendent très fortement du contexte et des applications).

N	Procédé / performance	Capacité	Pureté et rendement	maintenances	Coût	Adaptabilité	Développement
1	Crible plan	*	*	*	*	*	**
2	Crible à disques ou à étoiles	***	**		*	**	**
3	Crible à godets	**	*	*_	*		
4	Crible cylindrique (trommel)	***	*	**	*	**	***
5	Trommel aéraulique	**	*	**	**		
6	Séparateur balistique	**	**	*	*	**	**
7	Table inclinée	*	*	***	**		
8	Séparateur aéraulique	*	**	**	**	**	
9	Classificateur hydraulique, flottaison	**	***	**	*	***	***
10	Classificateur hydraulique, flottation	**	**	*	*	**	**
11	Classificateur hydraulique, cyclone	**	***	*	*	**	**
12	Extracteur magnétique des métaux ferreux	***	***	***	***	**	***
13	Extraction des métaux non ferreux par Courants de Foucault	**	*	*	*	**	**
14	Détection des métaux non ferreux par Courants de Foucault	**	**	*	*	**	*
15	Séparateur électrostatique	**	**	**	*	**	**
16	Séparateur triboélectrique	**	**	**	*	**	*
17	Spectrométrie proche infrarouge sur emballages plastiques	**	***	**	*	**	***
18	Spectrométrie proche infrarouge sur copeaux plastiques	**	***	**	*	**	**
19	Spectrométrie en infrarouge moyen	*	**	**	*	**	*
20	Spectrométrie en fluorescence X	**	***	**	*	*	**
21	Spectrométrie dans le domaine visible (colorimétrie)	**	**	**	*	**	***
22	Séparation thermique des plastiques	*	**	*	*		
23	Broyage différentiel	***	**	*	**	***	***

#### I. 4. Détection de métaux ferreux ou non ferreux [15,16]

Avant de procéder à l'épuration ou au filtrage d'un matériau par séparation magnétique, il faut d'abord détecter les impuretés métalliques contenues. Cette

détection non seulement confirme la nécessité de séparation magnétique mais permet aussi de choisir la technique de séparation à utiliser. En pratique, les séparateurs magnétiques sont équipés des détecteurs de métaux fonctionnant sur la base de bobines de détection.

A titre d'exemples, on trouve les détecteurs de métaux ferreux ou non ferreux montrés ci- dessous.



Détecteur magnétique EZ Tec



Détecteur magnétique Handy Tec

Figure I.1 : Détecteurs de métaux ferreux et non ferreux

#### I. 4.1. Métaux ferreux [9]

Les métaux ferreux et plus particulièrement l'acier sont liés à l'ère industrielle.

Ils ont des caractéristiques particulières :

- Une propriété fondamentale, le magnétisme, utilisé pour leur séparation d'un stock de déchets, permet de les récupérer même s'ils ne sont pas triés à la source et quel que soit le mode de traitement de ces déchets, hormis la mise en décharge sauvage.
- La grande quantité produite
- Un traitement de recyclage qui requiert des installations moins importantes que les hauts fourneaux utilisés pour le minerai. L'acier peut, en effet, être fabriqué indifféremment par les aciéries qui traitent le minerai par production de fonte ou par des aciéries électriques, qui traitent les ferrailles à recycler. Cette dernière est plus économique : elle consomme trois fois moins d'énergie que la filière dite de « conversion ». Exclusivement réservée aux ferrailles, elle n'utilise pas de minerai et consomme beaucoup moins d'eau.

L'acier est recyclable à l'infini, d'ailleurs en France, 40% de la production d'acier s'effectue à partir des ferrailles récupérées. Ces dernières sont fondues dans un four électrique cuve garnie de réfractaires dans laquelle sont plongées des électrodes. La chaleur dégagée par les arcs électriques (1600 °!) fait fondre la ferraille. L'acier liquide est récupéré à la sortie du four, et utilisé dans les mêmes conditions que l'acier produit à partir de minerai.

L'acier recyclé représente des avantages et des économies substantielles : chaque tonne d'acier recyclé représente une économie de 1,5 tonne de minerai de fer, 0,5 tonnes de coke, et utilise 40% d'eau (pour le lavage des fumées) par rapport à l'acier issu du minerai.

La filière acier a atteint sa maturité. Les perspectives de développement sont liées à la mise en place de filières spécifiques telles que celle de l'automobile et à l'amélioration de la collecte en vue d'augmenter les ressources : en effet, la plupart des sidérurgistes ont opté pour le développement de la filière électrique au détriment du traitement du minerai.

L'acier est dominant dans le domaine des emballages alimentaires, malgré la poussée du plastique, et en représente à lui seul les trois quarts.

#### **I. 4.2. Métaux non-ferreux**

Le recyclage des métaux non ferreux est une activité industrielle déjà ancienne, justifiée principalement par le fait qu'il n'existe aucune différence notable entre le métal primaire extrait du minerai (métal raffiné) et le métal secondaire issu des déchets (métal affiné).

En plus d'être beaucoup moins cher que le raffinage, le recyclage permet en outre une économie des réserves mondiales de ces métaux, relativement peu abondantes et pour la plupart épuisées dans moins d'un siècle.

En règle générale, ces métaux n'ont pas d'âge, et leur qualité ne s'altère pas avec le temps, hormis quelques phénomènes mineurs d'oxydation : ils peuvent être récupérés à partir d'un produit en fin de vie, même plusieurs décennies après sa mise sur le marché [6].

C'est un métal qui dispose de propriétés physiques intéressantes dans de nombreuses applications et qui ont fait son succès : les plus connues sont sa légèreté et son inoxydabilité, sa résistance, conducteur électrique et facile à façonner.

Le déchet en aluminium présente certaines particularités :

- il est recyclable en fonderie avec pour résultat la production d'une matière première identique à celle d'origine, mais avec un coût de production moins élevé que celui correspondant à l'extraction du minerai : l'économie d'énergie est supérieure à 90 % et les investissements moins importants !
- L'aluminium ayant une forte valeur ajoutée, les coûts de transports du déchet ne sont pas un handicap et son traitement peut se faire aisément, d'une manière industrielle rentable.
- Ses qualités physiques lui confèrent tant d'applications qu'il concurrence le bois (menuiseries alu), le plastique (emballage alimentaire) ou l'acier (industrie auto) C'est l'aluminium issu des entreprises et de l'industrie qui est surtout recyclé car celui provenant des déchets ménagers est souvent mélangé avec le

reste des ordures, pour finir incinéré ou composté : il ne représente que 16% de l'aluminium recyclé.

L'aluminium présente des qualités de recyclage exceptionnelles puisqu'il peut être recyclé à l'infini sans perdre aucune de ses qualités par rapport à la fabrication d'aluminium primaire. La ration de recyclage (% par rapport à la consommation totale) est de l'ordre de 35%.

A l'issue de la collecte, intervient une phase de tri et de préparation (cassage, broyage, compression) qui permet d'obtenir des matières aptes à la fusion dans un four à haute température. Le métal est alors affiné à l'aide d'un traitement métallurgique approprié, c'est à dire purifié, pour éliminer les impuretés et le soumettre aux normes de son utilisateur final. Il est livré en lingots ou en fusion. Le métal peut être aussi transformé pour fabriquer des sous-produits. Compte tenu des caractéristiques de l'aluminium récupéré, l'alu recyclé est surtout utilisé en filage ou fonderies (roues, pièces de moteurs), plus qu'en étirage et laminage, mais si le gisement était plus important, rien n'empêcherait de refabriquer des boîtes par exemple. La quasi-totalité de l'aluminium utilisé par les ménages va pour sa part en incinération. L'aluminium dispose d'un pouvoir calorifique élevé qui peut être utilisé. En le chauffant, il s'oxyde et dégage de l'énergie. A 850°C et avec apport d'air, l'oxydation d'un kilo d'alu dégage autant d'énergie que la combustion d'un kilo de charbon, de 0,8 litres de fuel, près de deux fois et demi plus que le papier.

Les perspectives de développement sont liées surtout à l'amélioration de la collecte, où des marges de progression existent encore et à l'exploitation de gisement plus ou moins négligés (par ex récupération de cannettes de boisson avec poubelle spécialisée, comme en Allemagne). Concernant les réserves mondiales de minerai de bauxite, nécessaires à la production d'aluminium primaire, elles sont estimées à 200 ans d'exploitation.

### **I.5. Séparateur magnétique**

Malgré le fait que les premières tentations d'utilisation des techniques de la séparation magnétique datent de 1792, les premiers séparateurs électromagnétiques n'apparaissent qu'en 1882. Au début du 20<sup>e</sup> siècle, les premières séparatrices hautes intensités (Krupp) sont mises en exploitation industrielle pour la valorisation des sables de plage, du wolframite et de minerais de fer faiblement magnétiques. Alors que la séparation magnétique en voie sèche progresse rapidement, il faut attendre les années 60 pour qu'il y ait véritablement une application industrielle des séparatrices hautes intensités en voie humide [1].

En 1970, la commercialisation par *Humboldt*, du séparateur haute intensité en voie humide Jones à carrousel va permettre à la séparation magnétique de s'imposer dans le domaine de la valorisation industrielle des minerais et d'entrer en concurrence

avec la valorisation par *Froth Flotation*, pour les minerais à faible susceptibilité magnétique.

En dix ans, la séparation magnétique haute intensité va évoluer rapidement mais des limites techniques interviennent pour les minerais de faible granulométrie (inférieure à 10 microns) et/ou de faible susceptibilité magnétique (inférieure à  $0.5 \times 10^{-6}$  SI).

L'apparition dans les années 80 de séparateurs haut champ-haut gradient supraconducteur a permis de repousser ces limites et d'exploiter des gisements que l'on n'aurait pas jugé économiquement valorisables dix ans plus tôt. La capacité de ces séparateurs supraconducteurs à traiter des solides très faiblement magnétiques et de granulométrie très faible leur a fourni un débouché d'application en valorisation des minerais et plus spécifiquement en épuration (blanchiment) de minéraux industriels.

Actuellement, plusieurs firmes conçoivent, développent et commercialisent les séparateurs magnétiques pour utilisation en voie sèche ou

Les séparateurs magnétiques sont classés en fonction de la qualité de champ magnétique fourni comme ce suit [52-61]:

- Séparateur magnétique à basse intensité (**SMBI**)
- Séparation magnétique à haute intensité (**SMHI**)
- Séparation magnétique à haut gradient de champ (**SMHG**) et /ou à haut champ (séparation à champ à gradient ouvert et à matrices d'extraction)

Les séparateurs magnétiques sont classés en fonction de la qualité de champ magnétique fourni comme se suit :

### I. 5.1 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)

La source de champ magnétique est un aimant permanent qui développe une densité de force magnétique allant de  $2 \times 10^4$  à  $10^6$  N/m<sup>3</sup>. Les aimants permanents sont des ferrites, terres rares ou terres rares à taux d'attractivité élevée ou céramique.

Pour éliminer les particules fines ou grossières fortement magnétique sur des produits secs ou humides, des tubes aimant permanents sont utilisés pour des traitements en continu et à sec des particules para et ferromagnétiques, des séparateurs à tambours magnétiques à aimant permanent sont utilisés.

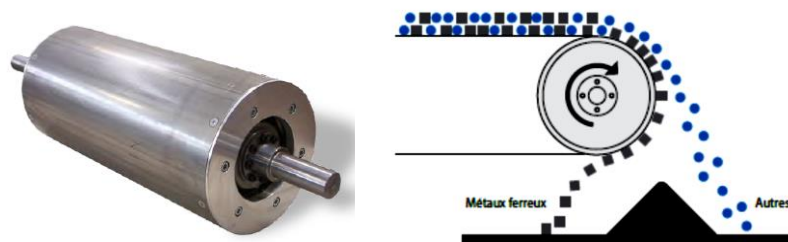


Figure I.2 : Tube magnétique à aimant permanent (ferrites, terres rares)

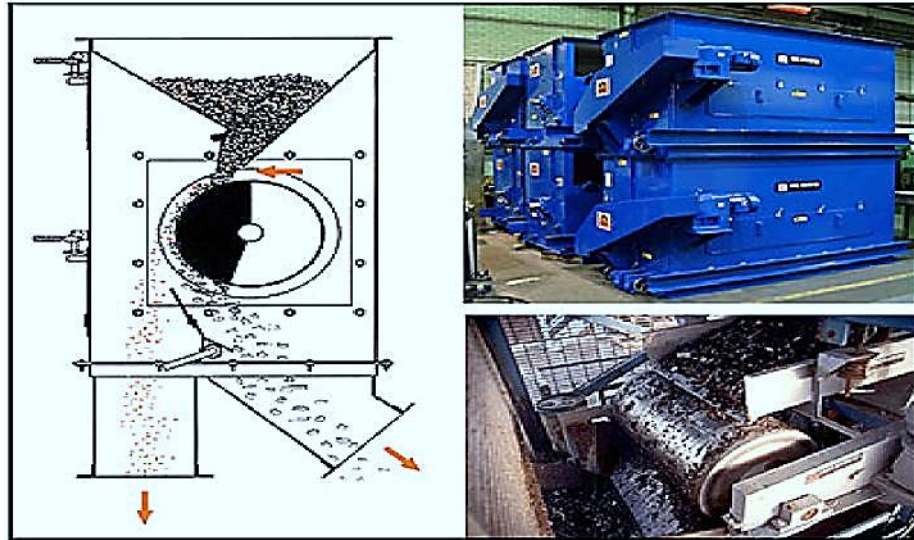


Figure I.3 : Séparateur à tambours magnétiques

Dans le séparateur à tambour, et sous l'effet conjugué de la force centrifuge et de pesanteur, les fractions non magnétiques sont éjectées de la surface du rotor. Les fractions magnétiques qui adhèrent au rotor sont évacuées vers l'arrière.

Dans certains cas, le traitement de matériaux à granulométrie trop fine, la séparation à sec n'est permis à cause de le gêne crée par l'attraction électrostatique s'exerçant entre les particules. Afin de dépasser ce handicap, un traitement en voie humide par des séparateurs à tambour magnétique est utilisé.

### I.5.2. Séparation magnétique à haute intensité (SMHI)

La source de champ est un électroaimant ou un aimant permanent. Ils développent une densité de force magnétique de  $2 \times 10^7$  à  $4 \times 10^9$  N/m<sup>3</sup>. Ils sont utilisés pour la purification ou la concentration de matériaux non magnétiques, faiblement ou fortement magnétiques en voie sèche ou humide.

Pour le traitement en voie sèche, des séparateurs à tambours à électroaimant sont utilisés. L'électroaimant rotatif crée un champ magnétique intense (16000-18000 Gauss) dans l'entrefer. Le principe de séparation des particules paramagnétique et diamagnétique est illustré dans la figure 1.3 [1].

Les particules diamagnétiques sont évacuées sous l'effet de la force centrifuge et de répulsion tandis que les paramagnétiques restent collées au rotor et en sont détachées à l'aide de ballais. Pour la séparation des particules non ferreuses préalablement débarrassés de ses composants ferreux, des séparateurs à tambours à aimants permanents fonctionnant sur la base des courants de Foucault sont utilisés.

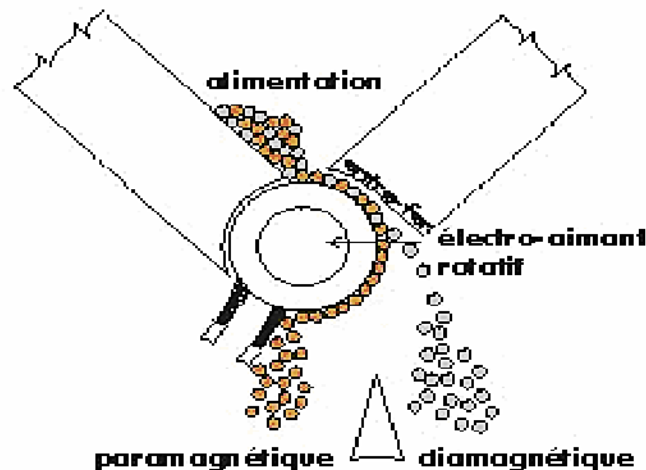


Figure I.4 : Principe de la séparation magnétique **SMHI** des particules diamagnétiques des particules paramagnétiques

En voie humide, les séparateurs SMHI sont utilisés pour séparer les particules diamagnétiques et paramagnétiques contenues dans des pulpes de concentration allant de 25 à 35%.

Le premier des séparateurs utilisés en voie humide est le type Jones à carrousel construit par Humboldt. Actuellement, des séparateurs en voie humide sont mis en exploitation par plusieurs fabricants (ex. Eriez, Raoul lenoir,...).

Un séparateur SMHI utilisé pour la séparation des particules paramagnétiques des particules diamagnétiques en voie humide est montré dans la figure 1.4 [5].

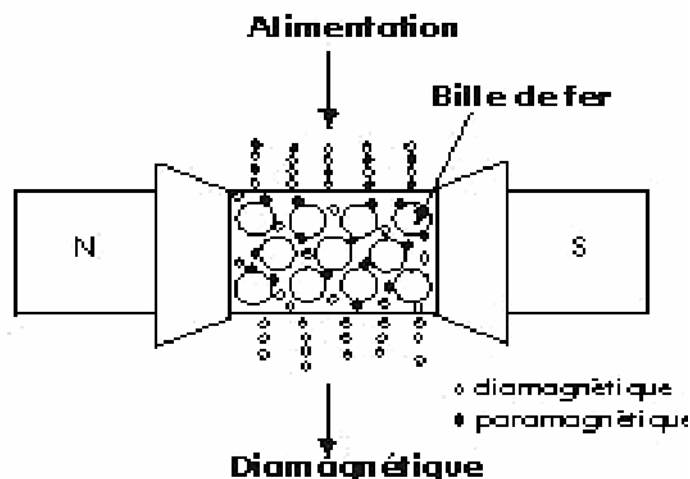


Figure I.5 : Principe de séparation SMHI en voie humide en utilisant des billes ferromagnétiques

Ce séparateur est constitué de 2 pôles (N-S) créant un champ magnétique intense dans la cellule de séparation contenant des billes ferromagnétiques. L'utilisation de billes de diamètres variables mène à l'obtention d'un gradient de champ magnétique d'autant plus important que les billes sont petites. Ce gradient de champ magnétique constitue le potentiel de séparation. La pulpe est alimentée dans



la cellule de séparation. Les particules paramagnétiques sont retenues sur les billes de fer tandis que les particules diamagnétiques sont emportées par le flux d'eau puis récoltées. Les particules paramagnétiques sont ensuite récoltées grâce à un lavage à l'eau après disparition du champ magnétique [1].

### **I. 5.3. Séparation magnétique à haut gradient de champ (SMHG) et /ou à haut champ**

La source de champ est un solénoïde en cuivre résistif ou en alliage supraconducteur qui permet d'atteindre une densité de force magnétique de  $6 \times 10^{10}$  à  $10^{12}$  N/m<sup>3</sup>.

Le séparateur magnétique haut gradient (SMHG) à bobinage de cuivre fonctionne à température ambiante et nécessite un système de réfrigération par eau d'ionisée.

Le séparateur à bobinage supraconducteur utilise quant à lui, un système cryostatique pour le refroidissement de la bobine à la température de l'hélium liquide. Quelque soit la configuration de champ retenue, la séparation supraconductrice nécessite toujours un réservoir cryostatique rempli d'hélium liquide, destiné à refroidir le bobinage en alliage supraconducteur.

Ces séparateurs permettent le traitement des matériaux paramagnétiques faibles et de très petites granulométries (ex. les ultrafines dispersées dans un fluide).

Pour les séparateurs à haut gradient du champ, on trouve principalement :

#### **a) Séparateur à haut champ à gradient ouvert**

Développés en 1975 par Oxford Instruments et Cryogenic Consultants, la séparation se fait à l'extérieur du système, en continu, par déviation des particules en voie sèche ou humide. C'est un ensemble cylindrique de 4 solénoïdes supraconducteurs qui génèrent des gradients de champ et donc des forces d'attraction élevées extérieures et orientées radialement.

Les essais sur des minéraux industriels (Quartz, Feldspaths), ont montré que l'efficacité diminue fortement pour des granulométries inférieures à 50 microns [6].

Pour le séparateur à tambour, il s'agit de tambours magnétiques, où la couronne d'aimants permanents est remplacée par une série de bobines supraconductrices à bobinage trapézoïdal, qui adhèrent au tambour sur une section circulaire de 120°. L'alternance des pôles se fait le long de l'axe du tambour et non le long de sa circonférence. Ainsi, les particules restent dans des conditions constantes tout au tour du tambour.

La firme Humboldt Wedag a construit le DESCOS qui produit 3200 kA/m à la surface du tambour, et fonctionne en voie sèche et humide. Les bobinages supraconducteurs se trouvent dans un réservoir cylindrique fait de matériaux isolants, qui contient l'hélium liquide et est maintenu sous vide. Le tambour en fibre de carbone renforcé a un diamètre de 1.2 m pour une longueur de 1.5 m. Le DESCOS fonctionne

en voie sèche ou humide avec une capacité de 100 t/h et peut traiter des granulométries montant jusqu'à 100 mm.

La première démonstration effectuée est un pilote d'épuration de syénites néphéliniques en Turquie [7]. Pour le séparateur suspendu, il s'agit d'un électroaimant suspendu sur un convoyeur à bande où le matériau passe en continu.

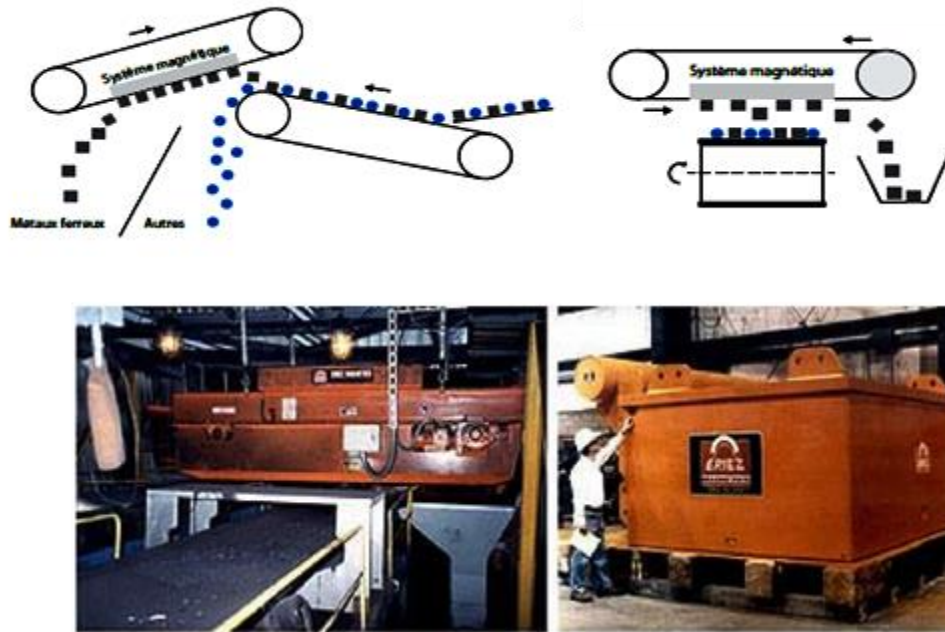
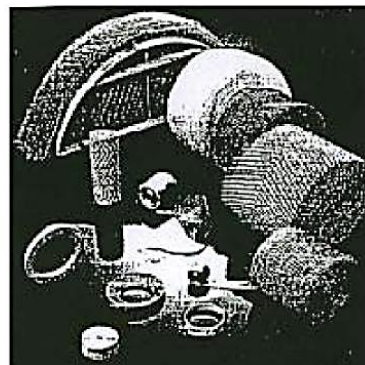
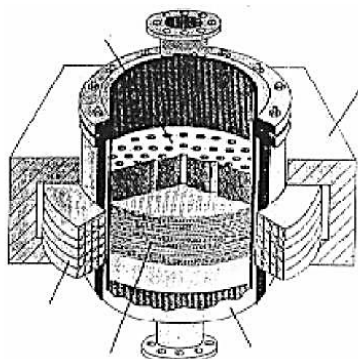


Figure I.6 : Séparateur à électroaimants suspendus sur convoyeur à bande

### b) Séparateur haut champ à matrice d'extraction

La séparation se fait à l'intérieur de la bobine d'induction (solénoïde supraconducteur en niobium-titane), selon le même principe de fonctionnement cyclique qu'un séparateur haut gradient à bobinage cuivre. Dans la bobine se trouve une matrice d'extraction en laine de fer ou en métal [1]. Le champ magnétique extérieur, à l'origine homogène, devient fortement convergent à cause des éléments ferromagnétiques de la matrice. Il se crée, dans la matrice, des centres de force de faible portée, sur lesquels les particules paramagnétiques sont piégées. L'intensité de champ développée varie selon les séparateurs de 1600 à 4000 kA/m [7].



- a) Vue générale du séparateur                      b) Quelques matrices d'extraction
- Figure I.7 : Séparateur magnétique à haut gradient cyclique (SALA) à bobinage

## I. 6. Séparateur des métaux non ferreux par Courants de Foucault

### I. 6.1 Principe de la séparation par courant induit :

Le principe des courants de Foucault est de générer des champs magnétiques répulsifs pour les métaux non ferreux à l'aide de courants électriques eux-mêmes induits par un champ magnétique variable. Ces champs répulsifs provoquent l'éjection des métaux non ferreux.

Les dispositifs utilisés comportent un convoyeur qui entoure le système de génération des courants de Foucault : une roue polaire, tambour abritant un rotor garni d'aimants permanents à haut champ et à pôles magnétiques alternés. L'éjection des objets contenant des métaux non ferreux est réalisée au niveau de cette roue [10].

La fraction « éjectée » des métaux non ferreux (aluminium souvent, mais aussi cuivre, plomb et laiton) et la fraction des autres matériaux qui chute en bout de convoyeur (métaux ferreux, papiers, cartons, plastiques, verres, ...), sont dirigées vers deux dispositifs de récupération distincts ; cette séparation peut être favorisée par l'utilisation d'une plaque de division qui évite le mélange des deux fractions.

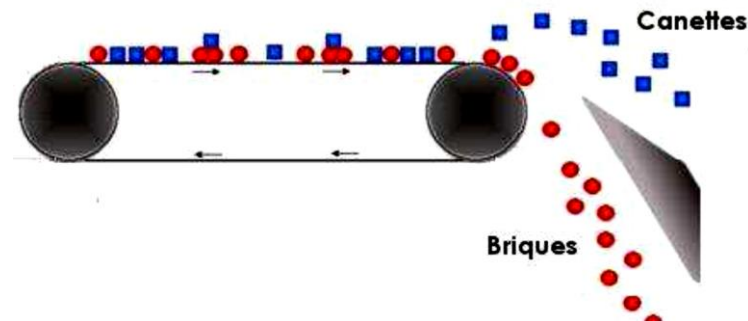


Figure I.8 : Principe de séparation à courant de Foucault.

La séparation par Courants de Foucault peut être effectuée sur des objets « entiers » (cigarettes aluminium), déchiquetés ou sur des produits broyés.

En théorie, un système utilisant les Courants de Foucault peut distinguer simultanément un flux de métaux ferreux, un flux de métaux non ferreux et un flux de matériaux sans propriétés magnétiques. En pratique, de nombreux séparateurs à Courant de Foucault sont utilisés sur des mélanges dont les métaux ferreux ont déjà été retirés par tri magnétique

La nature des fractions sortantes dépend fortement du type de matériel utilisé et de la nature des flux entrants.

Un matériel basique permet de recueillir deux fractions :

- l'un, issu du tri positif, est la fraction riche en métaux non ferreux (aluminium)
- l'autre est constitué de l'ensemble des autres matériaux.

Un certain nombre de matériels disponibles sur le marché propose la séparation de trois fractions, qui sont :

- soit une fraction de métaux ferreux, une fraction de métaux non ferreux et une fraction de matériaux non métalliques ;
- soit une fraction d'aluminium, une fraction de cuivre et plomb, et une fraction de matériaux non métalliques ;
- soit une fraction d'emballages composites et aluminium souple, une fraction d'aluminium rigide et un flux de matériaux non métalliques.

## **I. 6.2 Classification des séparateurs à courant de Foucault**

### **I. 6.2.1.Séparateur à rampe magnétique [8]**

Le séparateur à rampe magnétique est principalement constitué d'une rampe magnétique inclinée dont on peut faire varier l'inclinaison. Le système magnétique est constitué d'un empilement d'aimants permanents alternés de haute énergie (Figure I.9) Le système magnétique est couvert d'une couche amagnétique pour empêcher la détérioration de l'équipement magnétique.

Les produits à trier (1) sont distribués sur la surface de la rampe sous la forme d'une couche faible. Le matériau se déplace longitudinalement. Sous l'influence du mouvement des particules conductrices (3) au travers d'un système magnétique, il apparaît une force qui fait dévier la trajectoire du matériau. Le principe de la séparation est donné schématiquement sur la figure I.9.

Il existe aussi le séparateur à rampe magnétique de haute capacité. Dans ce cas la surface de la rampe ressemble à la surface d'une tôle ondulée dont les crêtes sont parallèles à la ligne de pente de la rampe. Le matériau préalablement débarrassé de particules ferromagnétiques est mis sur la surface de la rampe à sa partie supérieure sur toute sa largeur. Sous l'action de la force répulsive les particules de métaux non-ferreux sont repoussées dans le sens des crêtes de la surface ondulée. Ce type d'appareil est destiné au tri de déchets communaux

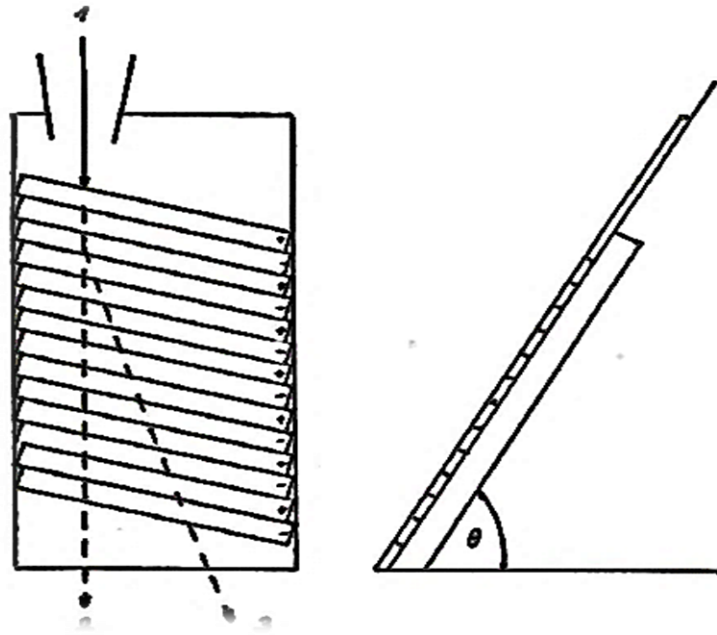


Figure I.9 : Principe fonctionnement du Séparateur à rampe magnétique.

### I. 6.2.2.Séparateur vertical

Le séparateur vertical a été mis au point en Hollande. Le principe de cet appareil est présenté à la figure I.10. Il s'agit d'un système de deux parois verticales et parallèles qui portent des aimants permanents alternés. Les bandes magnétiques sont orientées 45 degrés de la verticale.

Le mélange des particules (1) est déversé dans l'espace intérieur du séparateur, dans lequel existe un champ magnétique fermé. Pendant le mouvement d'un matériau au travers du champ magnétique, les particules conductrices (3) sont repoussées latéralement et différenciées par rapport aux particules non conductrices (2).

Cet appareil présente en principe une combinaison de deux séparateurs à rampe magnétique avec un avantage important, la répartition symétrique de la distribution du champ magnétique selon l'axe vertical central du canal de l'appareil.

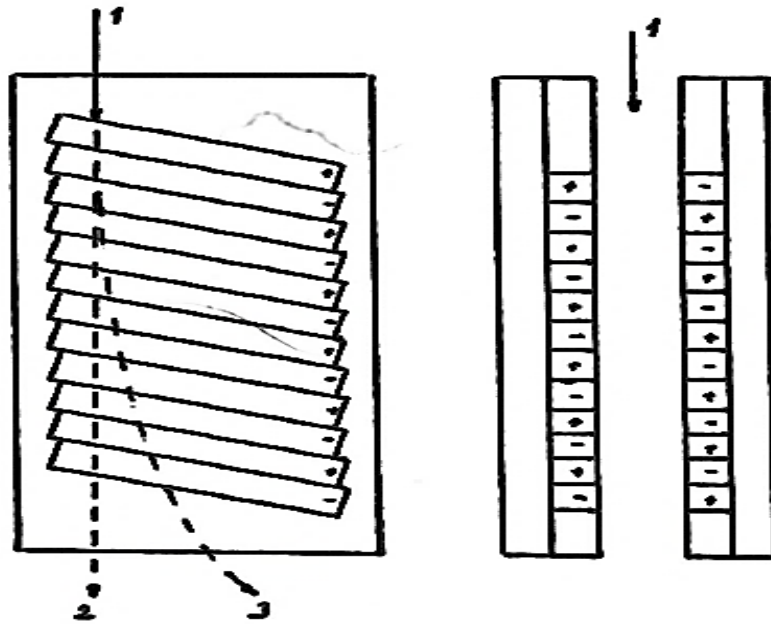


Figure I.10 : Principe fonctionnement du Séparateur vertical.

### I. 6.2.3. Séparateur à disques rotatifs [8]

Le dispositif de séparateur à disques rotatifs (RDS) est réalisé par deux disques non-magnétiques en rotation, équipés de segments magnétiques alternés (figure I.11). Des courants de Foucault sont induits par une combinaison du champ magnétique variable et du mouvement vertical des particules.

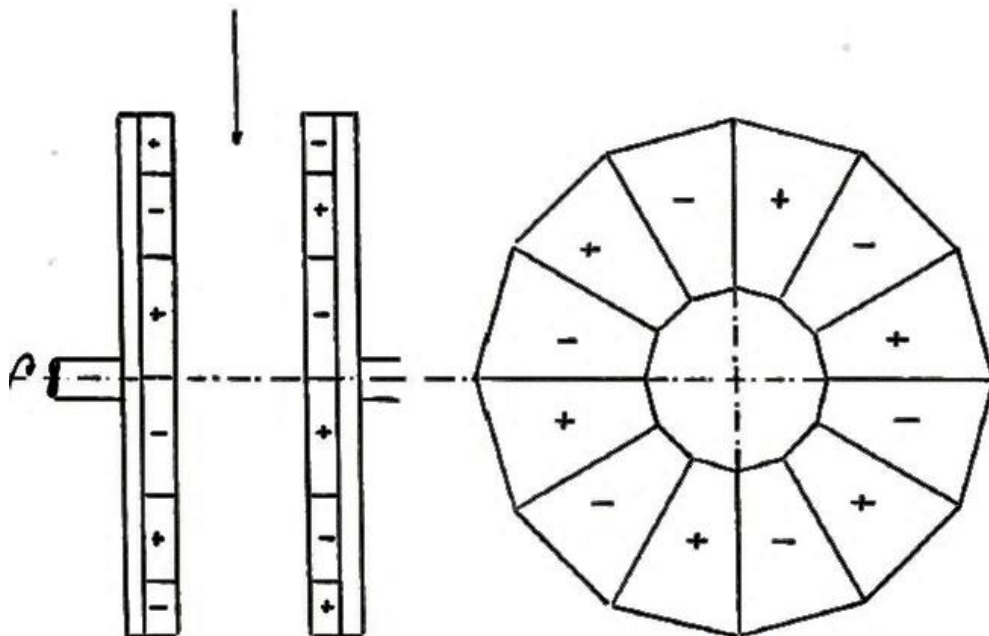


Figure I.11 : Principe fonctionnement du Séparateur à disques rotatifs.

### I. 6.2.4. Séparateur à cylindre magnétique

Le principe de fonctionnement d'un appareil est montré à la figure I.12.

Le séparateur est constitué d'un cylindre rotatif équipé d'un ensemble d'aimants permanents alternés. Le système magnétique d'un séparateur à cylindre magnétique est très semblable à celui d'un séparateur à rampe magnétique.

Il permet d'obtenir trois produits. La fraction magnétique influencée par la force magnétique d'attraction est fixée sur la surface du tambour amagnétique et transportée vers la partie supérieure du séparateur. Les particules métalliques non-magnétiques sont déviées par la force répulsive des courants de Foucault et rejetées aussi vers la partie supérieure de l'appareil. Les matériaux non-métalliques quittent l'espace du cylindre sans être influencés par le champ magnétique.

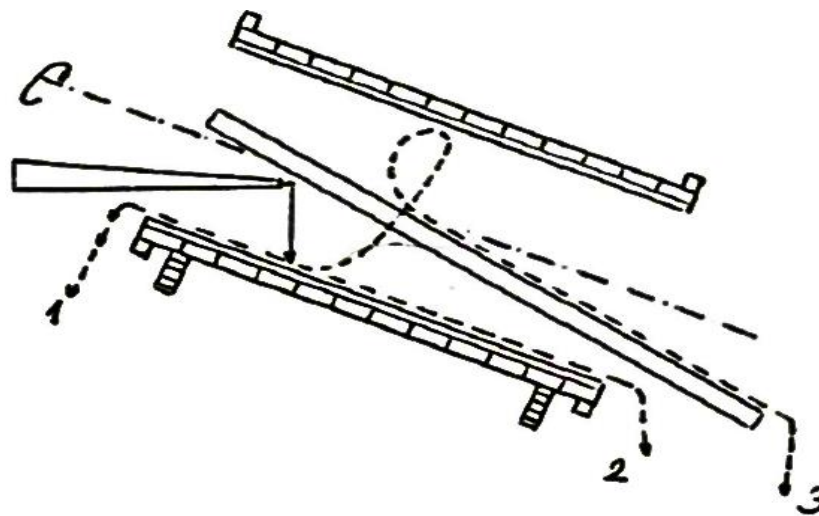


Figure I.12 : Principe fonctionnement du Séparateur à cylindre magnétique.

### I. 6.2.5. Séparateur à tambour [8]

L'appareil se compose d'un transporteur à bande et de deux tambours dont l'un est moteur. Dans le tambour situé à la sortie de l'appareil, est monté sur un arbre excentré un système magnétique à rotation élevée. Une bande transporteuse peut être remplacée par un transporteur à secousses. Le système polaire est constitué d'aimants permanents à haute rémanence. Le rotor magnétique est réglable de manière à optimiser l'accélération radiale des métaux non-ferreux dont la trajectoire est différente de celle des matériaux non conducteurs. Le principe de fonctionnement est donné à la figure I.13.

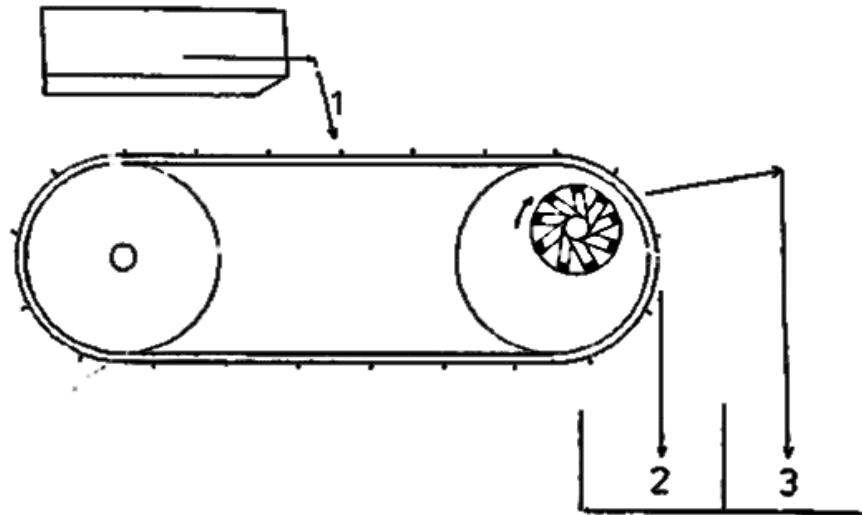


Figure I.13 : Principe fonctionnement du Séparateur à tambour.

### I.7. Application des Courants de Foucault

On appelle courant de Foucault le courant créé par le déplacement ou le changement du champ magnétique (courant d'induction) dans une masse métallique.

Lorsqu'un conducteur (cuivre, fer, etc.) subit des variations de flux magnétique soit parce que ce conducteur est en mouvement relatif par rapport au champ, soit parce que le champ est variable avec le temps il apparaît une f.é.m. d'induction au sein du conducteur. Cette f.é.m. met en mouvement les électrons mobiles du conducteur créant ainsi un courant électrique que l'on désigne par «courant de Foucault». L'intensité du courant est proportionnelle à la variation du flux magnétique en fonction du temps. Les courants de Foucault ont des parcours compliqués au sein de la matière où aucun fil ne les guide. On sait toutefois qu'ils forment des lacets et des boucles, d'où leur autre nom de «courants tourbillonnaires».

Les courants de Foucault se manifestent chaque fois qu'un matériau conducteur est en mouvement relatif au sein d'un champ magnétique : ils sont induits par le déplacement. Nombre de dispositifs industriels utilisent cette induction pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, puis éventuellement en chaleur.

Tous exploitent le principe que Léon Foucault mit en œuvre dans une expérience de 1855 lorsqu'il fit tourner un disque de cuivre dans l'entrefer d'un aimant. Puisqu'il y a mouvement relatif conducteur champ, il y a variation de flux magnétique. Par conséquent un tel disque est parcouru de courants de Foucault. Ces courants induits échauffent la matière qu'ils traversent par effet



Joule, car les électrons qui les composent choquent sans cesse les autres charges électriques présentes dans le matériau et leur transfèrent une partie de leur énergie, qui est ainsi transformée en chaleur. Cette énergie provient de la seule source d'énergie présente : l'opérateur actionnant le disque. C'est pourquoi Foucault peinait à actionner la manivelle ! Si le mouvement de rotation n'est pas entretenu, toute l'énergie mécanique initiale du disque se transforme en chaleur, et le disque arrête de tourner.

## I.8. Théorème et lois fondamentales du magnétisme [17].

### I.8.1. Champ et induction magnétiques :

Si une charge électrique  $q$  est en mouvement avec une vitesse  $\mathbf{v}_D$ , elle va créer un **champ magnétique**  $H$ , auquel correspond une **induction magnétique** :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (H \text{ en } A.m^{-1}, B \text{ en Tesla}) \quad (\text{I.1})$$

$\mu$ : est une autre caractéristique du milieu : sa **perméabilité magnétique**.

Pour le vide, et, en pratique, pour l'air :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H.m^{-1}$

Si la charge  $q$  arrive dans ce champ magnétique avec une vitesse  $\mathbf{v}_D$ , elle se trouve soumise à une force dirigée perpendiculairement à  $\mathbf{v}_D$  et à  $\mathbf{B}$  suivant la règle dite des trois doigts ou du bonhomme d'Ampère :

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v}_D \times \mathbf{B} \quad (\text{I.2})$$

Cette loi porte le nom de force de Lorentz

### I.8.2. Loi de Faraday-Lenz :

Tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître une force électromotrice (tension)  $e$  telle que :

$$e = - d\Phi / dt \quad (\text{I.3})$$

Où  $\Phi$ : est le flux total du champ magnétique à travers le circuit.

Le sens du courant induit est tel que le champ magnétique qu'il crée tend à s'opposer à la variation du flux qui lui a donné naissance.

### I.8.3. Les Courants de Foucault :

Si nous avons un courant alternatif  $I(t)$  parcourant un solénoïde de longueur  $l$  comportant  $N$  spires, ce courant donne naissance à une induction magnétique en son centre:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{l} I(t) \quad (\text{I.4})$$

Si on place un cylindre métallique de perméabilité magnétique  $\mu_r$  et de résistance  $R$  suivant l'axe du solénoïde, on a :

$$B_0 = \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} I(t) \quad (\text{I.5})$$

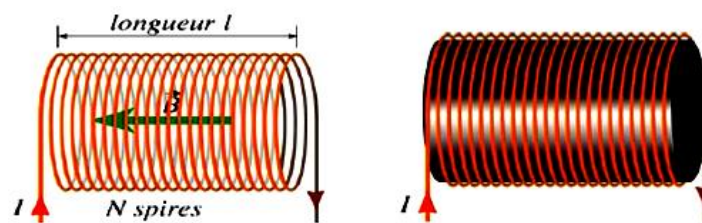


Figure I.14 : Champ magnétique créé par un courant

Cette magnétique variable provoque une variation du flux :

$$\Phi = N B S \quad (\text{I.6})$$

La loi de Lenz dit qu'une fem apparaît où  $e = - d\Phi / dt$  qui entraîne le passage de courants induits  $I(t)$  d'intensité :

$$I(t) = \frac{e}{R} \quad (\text{I.7})$$

Ces courants sont appelés courants de Foucault. Ils créent un champ magnétique qui s'oppose au champ magnétique inducteur. D'où à un instant donné :



Ces courants sont concentrés sur la surface et provoquent un chauffage superficiel de la pièce : c'est le principe de chauffage par induction.

## I.9. Propriétés et comportement électromagnétique des matériaux [23].

### I.9.1. Propriétés magnétiques

Les propriétés magnétiques d'un matériau sont attribuables au spin des électrons et au moment orbital autour du noyau. Une charge électrique en mouvement engendre un champ magnétique autour d'elle même, les électrons qui tournent sur eux-mêmes (spin) et autour du noyau (orbite) forment de petits dipôles magnétiques. Ces dipôles peuvent réagir à l'application d'un champ magnétique extérieur (Figure II.1).

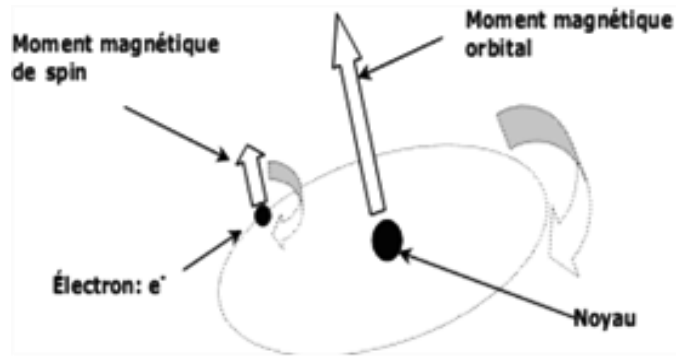


Figure I.15: Moments magnétiques atomiques orbital et de spin.

La réponse d'un matériau à l'application d'un champ magnétique extérieur  $H$  est caractérisée par l'induction magnétique  $B$ , laquelle représente l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du matériau.

Dans le vide, le champ d'induction  $B$  et  $H$  sont colinéaires et liés par la relation :

$$B = \mu H \quad (\text{I.8})$$

Avec  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide.

Au sein d'un matériau aimanté, le champ d'excitation  $H$  est toujours donnée par le théorème d'Ampère. Sous le champ d'excitation, il va se produire une influence du milieu qui va se superposer au champ d'excitation pour produire le champ d'induction.

On définit cette réaction à l'aide du vecteur d'aimantation  $M$  :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (\text{I.9})$$

Cette aimantation  $M$  est proportionnelle au champ d'excitation et peut se mettre sous la forme

$$M = \chi H \quad (\text{I.10})$$

Où  $\chi$  est la susceptibilité magnétique du matériau. Ainsi, le champ d'induction résultant peut s'écrire sous la forme,

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (\text{I.11})$$

Avec  $\mu_r$  la perméabilité relative du matériau et  $\mu_r = (1 + \chi)$ .

### a) Matériaux diamagnétiques

Le milieu diamagnétique est caractérisé par une susceptibilité magnétique relative  $\chi$  faible de valeur négative (de l'ordre de  $-10^{-9}$  à  $-10^{-5}$ ). Le champ d'aimantation  $\mathbf{M}$  est donc pratiquement nul.  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{M}$  sont de sens contraire. Ce type de matériau ne présente pas d'intérêt du point de vue magnétique.

<i><b>Matière</b></i>	<i><b>Susceptibilité <math>\chi</math></b></i>
Hydrogène (1 atm.)	$-2.1 \cdot 10^{-9}$
Azote (1 atm)	$-5.0 \cdot 10^{-9}$
Sodium	$-2.4 \cdot 10^{-6}$
Silicium (Si)	$-1.2 \cdot 10^{-6}$
Cuivre (Cu)	$-1.08 \cdot 10^{-6}$
Plomb (Pb)	$-1.4 \cdot 10^{-6}$
Bismuth	$-1.7 \cdot 10^{-5}$
Diamant	$-2.2 \cdot 10^{-5}$

Tableau I.3: Susceptibilité des matériaux diamagnétique.

### b) Matériaux paramagnétiques

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative  $\chi$  positive de faible valeur (de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$ ).  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{M}$  sont de sens identique. La polarisation qui résulte d'un champ magnétique est négligeable.

<i><b>Matière</b></i>	<i><b>Susceptibilité <math>\chi</math></b></i>
Oxygène (1 atm.)	$2.1 \cdot 10^{-6}$
Magnésium	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Aluminium (Al)	$3 \cdot 10^{-5}$
Tungstène (W)	$6.8 \cdot 10^{-6}$
Titane	$7.1 \cdot 10^{-5}$
Platine (Pt)	$3.0 \cdot 10^{-4}$

Tableau I.4 : Susceptibilité des matériaux paramagnétique.

### c) Matériaux ferromagnétiques

Les substances ferromagnétiques possèdent un fort moment magnétique. Les moments magnétiques de leurs atomes sont ordonnés en petites zones uniformément magnétisées, appelées domaines de Weiss. En l'absence d'un champ magnétique extérieur, chaque domaine présente une orientation aléatoire. En revanche il suffit d'appliquer un champ magnétique faible pour réorganiser ces moments et les orienter tous dans le sens de l'induction créée par le champ. Si l'on supprime le champ extérieur, le matériau reste aimanté dans la direction et le sens du champ précédemment appliqué.

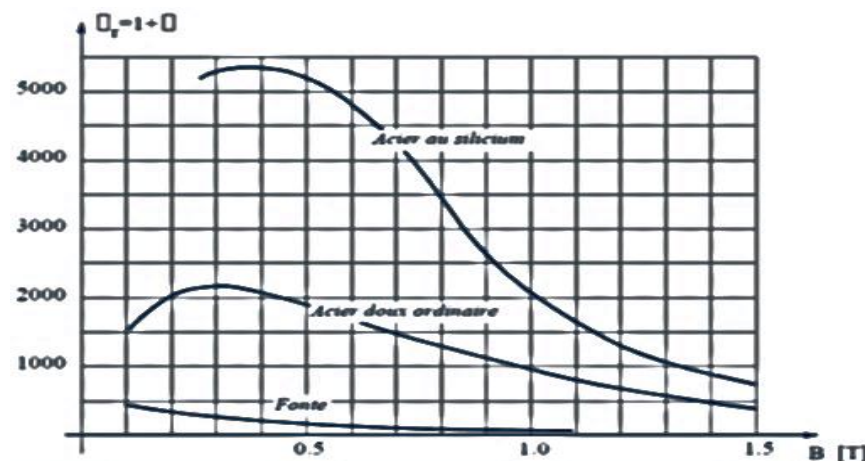


Figure I.16: Perméabilité relative  $\mu_r$  en fonction de B pour trois matériaux courants

Il est à noter que la valeur de la susceptibilité  $\chi$  dépend à la fois de la température mais surtout de la valeur du champ d'excitation qui est appliquée au matériau. Cela implique que la relation entre B et H peut non linéaire  $B = \mu(H) \cdot H$

#### d) Matériaux ferrimagnétiques

Sa structure cristalline est composée de deux structures de réseaux ayant des moments de modules différents et avec des orientations antiparallèles (Figure II. 3). Aussi, ce matériau présente une aimantation globale non nulle même en l'absence d'un champ magnétique extérieur.

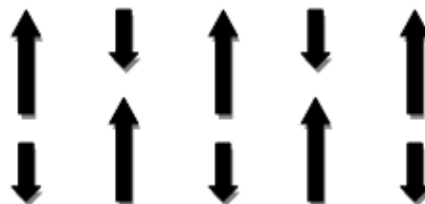


Figure I.17: Schématisation de la structure en domaines d'un matériau ferrimagnétique

#### e) Matériaux antiferromagnétiques

Dans ce genre de matériaux, les atomes ont un moment magnétique permanent. Cependant les moments atomiques ont un couplage antiparallèle, ce qui donne une aimantation globale nulle en l'absence du champ extérieur (figure II. 4). L'augmentation de la température favorise l'aimantation en fragilisant le couplage entre les moments magnétiques, mais à partir d'une certaine température dite de Néel, l'agitation thermique annule le couplage entre les moments, d'où un comportement paramagnétique de ce matériau à partir de cette température.

### I.9.2. Les différentes familles des aimants [27]

Il existe trois types d'aimants permanents utilisés dans l'excitation des machines ; actuellement ceux qu'on trouve sur le marché sont les Alnicos, les ferrites et les terres rares. La figure (1.19) illustre ces trois types.

- Les aimants ont beaucoup évolué ces cinquante dernières années ; de nouveaux matériaux sont apparus, comme par exemple les terres rares (NdFeB, Sm-Co). Ces nouveaux matériaux ont de très bonnes caractéristiques magnétiques, mais restent relativement coûteux. C'est pourquoi, de nombreuses applications industrielles sont encore réalisées avec des ferrites.

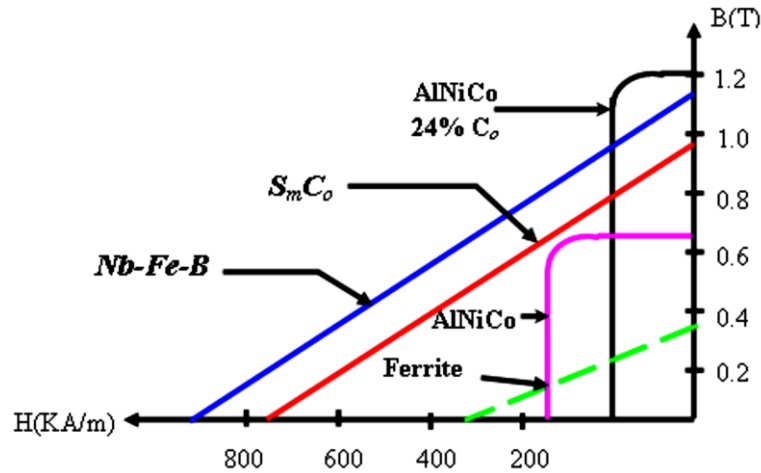


Figure II.18: Courbe B (H) des différents types des aimants permanents

- les aimants en **Alinco** ont un champ rémanent très élevé, mais un champ coercitif très faible, ce qui pose de gros problèmes de démagnétisation. Ces aimants ne peuvent être sortis de leur circuit magnétique, sous peine de les désaimanter.

- les aimants en **Ferrite** sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux. Ils résistent bien à la température.

- les aimants **Terre-Rares** (Nd-Fe-B, Sm-Co) sont très puissants et paraissent très bien appropriés pour les machines électriques. Leur coût encore élevé freine l'extension de ces nouveaux aimants. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les plasto-neodymes. C'est un mélange de néodyme fer bore avec un liant plastique. Cette matière permet de réaliser des pièces moulées, ce qui facilite l'assemblage et diminue le nombre de pièces mécaniques [27].

Paramètre	NdFeB	SmCo	Ferrites
Induction rémanente $B_r$ (à 200°C) [T]	1.02-1.47	0.9-1.12	0.2-0.41
Champ coercitif intrinsèque $H_{ci}$ (à 200°C) [A/m]	750-3250	500-1500	200-350
Densité d'énergie volumique $(BH)_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	200-415	140-250	10-40
Perméabilité magnétique relative $\mu_{rm}$	1.02-1.2	1.03-1.1	1.05-1.2
Résistivité électrique $\rho_m$ [ $\mu\Omega m$ ]	1.4-1.6	0.5-0.9	100
Température de Curie [°C]	310-370	700-800	450
Température maximale de fonctionnement [°C]	80-240	350	250
Coefficient de température pour $B_r$ [%/°C]	-0.12 ~ -0.08	-0.05 ~ -0.03	-0.18 ~ -0.2
Coefficient de température pour $H_{ci}$ [%/°C]	-0.8 ~ -0.4	-0.25 ~ -0.15	+0.2 ~ +0.5
Densité volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	7200-7500	8200-8500	3500-5000

Tableau I.5 : Résumé des caractéristiques pour aimants permanents.


### **I.10.Conclusion**

Les techniques de séparation magnétique consistent à soumettre des morceaux de déchets à des forces magnétiques et mécaniques développées par un séparateur magnétique. Suivant les propriétés magnétiques des déchets, il y a lieu d'employer soit la force attractive soit la force répulsive.



La séparation magnétique s'applique industriellement depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Cette séparation est utilisée aussi bien dans la préparation des matières fortement magnétiques que pour celles qui sont faiblement magnétiques. C'est au cours des dernières décennies que les méthodes d'enrichissement des matières faiblement magnétiques ont été développées. Il est possible de constater que les techniques de la séparation magnétique jouent un rôle très important également dans le domaine du recyclage des déchets de métaux non ferreux.

Les possibilités d'application sont les suivantes :

- 1- Séparation magnétique des espèces ferromagnétiques
- 2- Séparation magnétique des fractions métalliques (les métaux non ferreux) des fractions non métalliques
- 3- Séparation magnétique des certains métaux non ferreux et leurs alliages mélangés à d'autres métaux non ferreux.



*Chapitre II :*  
*Simulation numérique du*  
*séparateur à courant de*  
*Foucault*





# Chapitre II :

## Simulation numérique du séparateur à courant de Foucault

La modélisation consiste à établir une structure mathématique qui décrit les phénomènes physiques. En électromagnétisme la réunion du théorème d'Ampère et de la loi de Faraday forme le système d'équations de Maxwell qui est un modèle aux dérivées partielles locales. La résolution de ces équations associées aux lois de comportement électrique et magnétique des matériaux permet de déterminer les grandeurs locales (champs magnétique et électrique, densité de courant...) et d'en déduire des grandeurs globales (flux, intensité du courant...). Or, du fait de la complexité des systèmes électrotechniques (géométrie 3D, non linéarité, phénomènes couplés), les équations de Maxwell ne présentent généralement pas de solution analytique. Il est donc nécessaire d'avoir recours aux méthodes numériques en discrétisant l'espace et les grandeurs locales. La méthode des éléments finis apparaît la plus adaptée à résoudre ce type de problème. Cependant la discrétisation de la structure mathématique engendrée par les équations aux dérivées partielles reste difficile [29,30]. En effet, les termes sources des équations à résoudre (connues analytiquement) qui sont, généralement, la densité de courant ou le champ source présentent une difficulté majeure, leur discrétisation. De plus, la qualité de la solution dépend directement de la prise en compte de ces termes sources. On notera enfin, qu'en électrotechnique, les termes sources sont généralement des inducteurs.

### II.1.Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell permettent de définir la distribution du champ électromagnétique dans un dispositif électromagnétique. Dans un référentiel lié au domaine d'étude et en se plaçant dans le cadre de l'approximation des états quasi-stationnaires (les charges et les courants de déplacement sont négligés), les équations de Maxwell sont [35] :

$$\text{Loi de Faraday} \qquad \overrightarrow{\text{Rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{(II.1)}$$

$$\text{Loi d'Ampère} \qquad \overrightarrow{\text{Rot}}(\vec{H}) = \vec{J} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad \text{(II.2)}$$

$$\text{Induction à divergence nulle} \qquad \text{Div}(\vec{B}) = 0 \qquad \text{(II.3)}$$

$$\text{Loi de Gauss} \qquad \text{Div}(\vec{J}) = 0 \qquad \text{(II.4)}$$

Avec

$t$	: Le temps
$\vec{H}$	: Champ magnétique (A/m)
$\vec{D}$	: Induction électrique ou déplacement électrique (C/m <sup>2</sup> )
$\vec{B}$	: Induction magnétique (T)
$\rho$	: Densité de charge électrique volumique (C/m <sup>3</sup> )
$\vec{J}$	: Densité de courant électrique (A/m <sup>2</sup> )

Ces équations générales sont complétées par les relations qui caractérisent le milieu considéré (aimants, fer, air,...) dont le matériau est supposé linéaire et isotrope

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{M} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{E}_{ext}) = \sigma \vec{E} + \vec{J}_{ext} \quad (\text{II.6})$$

où  $\sigma$  et  $\mu$  représentent respectivement la conductivité et la perméabilité du matériau du milieu considéré (par exemple :  $\mu = \mu_0 \mu_{rm}$  pour les aimants et  $\mu = \mu_0$  pour l'air).  $\vec{J}_{ext}$ ,  $\vec{E}_{ext}$  et  $\vec{M}$  sont respectivement la densité de courant imposé de l'extérieur du domaine d'étude, le champ électrique correspondant et l'induction rémanente (ou aimantation) des aimants permanents.

### II.1.1 Considération du mouvement

Le choix du référentiel est très important pour exprimer les équations de Maxwell. Ces dernières changent selon la présence des pièces conductrices en mouvement par rapport au référentiel d'étude choisi en introduisant le principe de la relativité. Si par exemple, une partie conductrice est en mouvement avec une vitesse mécanique  $\vec{v}$  par rapport au référentiel choisi lié à une autre partie, il faut alors ajouter un autre terme à l'équation (II.6). Ce terme caractérise l'induction des courants de Foucault par le mouvement de la pièce conductrice par rapport au référentiel d'étude où les sources de champ sont exprimées [33,34] :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_{ext} + \sigma (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{II.7})$$

### II.1.2 Équation générale en termes de potentiel vecteur

L'utilisation du potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  dans la formulation des équations du champ est très avantageuse. Elle permet de réduire le nombre des variables et de faciliter la résolution en 2D. À partir de l'équation (II.3) de la divergence de l'induction, on définit le potentiel vecteur comme suit :

$$\vec{B} = \text{Rot}(\vec{A}) \quad (\text{II.8})$$

En remplaçant cette équation dans l'expression de la loi de Faraday (II.1), on obtient :

$$\overrightarrow{Rot}(\vec{E}) = -\overrightarrow{Rot}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad}(\zeta) \quad (\text{II.10})$$

Où  $\zeta$  est le potentiel scalaire électrique.

À partir des équations (II.2), (II.4), (II.5), (II.7) et (II.10), et en éliminant les grandeurs  $\text{Het J}$ , on trouve les équations du champ suivantes :

$$\overrightarrow{Rot}\left(\frac{\overrightarrow{Rot}(\vec{A}) - \vec{M}}{\mu}\right) = -\sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{V} \times \overrightarrow{Rot}(\vec{A})\right) + \overrightarrow{Jext} - \overrightarrow{grad}(\zeta) \quad (\text{II.11})$$

$$\text{div}\left(\sigma \overrightarrow{grad}(\zeta)\right) = \text{div}\left(\sigma \vec{V} \times \overrightarrow{Rot}(\vec{A}) - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{Jext}\right) \quad (\text{II.12})$$

La résolution de ces deux équations permet de calculer le champ électromagnétique. Cependant, cette résolution n'assure pas l'unicité de la solution ( $\vec{A}$  couple et  $\zeta$ ). Pour obtenir une solution unique, il faut imposer une valeur à la divergence de  $\vec{A}$ . Généralement, on impose une divergence nulle. Dans ce cas, cette condition constitue ce qu'on appelle la «Jauge de Coulomb» qui est exprimée comme suit [33,34]

$$\text{Div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.13})$$

Si le modèle est considéré bidimensionnel (2D), le potentiel vecteur  $\vec{A}$  aura une seule composante et sa divergence devient automatiquement nulle. Le potentiel scalaire électrique n'intervient que dans les régions conductrices où son gradient est nul. Il est invariant suivant la troisième dimension et peut être choisi comme étant nul ( $\zeta=0$ ). Cela signifie que les régions conductrices sont connexes et court-circuitées à l'infini [33].

Si la saturation des matériaux magnétiques est négligée, la simplification de l'équation (2.11) nous permet d'écrire l'expression suivante en remplaçant la densité du courant externe  $\overrightarrow{Jext}$  par la densité des courants dans le conducteur  $\overrightarrow{Js}$  :

$$\overrightarrow{Rot}(\overrightarrow{Rot}(\vec{A})) = \mu \overrightarrow{Js} - \sigma \mu \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{V} \times \overrightarrow{Rot}(\vec{A})\right) + \overrightarrow{Rot}(\vec{M}) \quad (\text{II.14})$$

Puisque la divergence du potentiel vecteur  $\vec{A}$  est nulle, l'équation (2.14) nous permet de trouver la forme générale de l'équation du champ électromagnétique qui tient compte de la réaction des courants induits :

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J}_s + \sigma \mu \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times \text{Rot}(\vec{A}) \right) - \text{Rot}(\vec{M}) \quad (\text{II.15})$$

En utilisant l'hypothèse de 2D et en se plaçant dans un système de coordonnées cylindriques, le potentiel vecteur  $\vec{A}$  a une seule composante suivant la direction axiale ( $\vec{z}$ ) :

$$\vec{A}(r, \theta) = A(r, \theta) \vec{z} \quad (\text{II.16})$$

Cependant, l'induction et le vecteur d'aimantation des aimants permanents sont contenus dans le plan 2D perpendiculaire à la direction axiale avec des composantes radiales et tangentielles. Ils sont définis par les relations suivantes :

$$\vec{B}(r, \theta) = B_r(r, \theta) \vec{r} + B_\theta(r, \theta) \vec{\theta} \quad (\text{II.17})$$

$$\vec{M}(r, \theta) = M_r(r, \theta) \vec{r} + M_\theta(r, \theta) \vec{\theta} \quad (\text{II.18})$$

À partir de ces définitions, l'équation générale du champ (2.15) est simplifiée sous la forme suivante en considérant un mouvement de rotation :

$$\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial \theta^2} = -\mu \vec{J}_s + \sigma \mu \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \Omega_r \frac{\partial \vec{A}}{\partial \theta} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial M_r}{\partial \theta} - \frac{M_\theta}{\partial r} - \frac{\partial M_\theta}{\partial r} \quad (\text{II.19})$$

où  $\Omega r$  est la vitesse de rotation de la pièce conductrice considérée par rapport au référentiel d'étude.

### Équations du champ appliquées pour le calcul du champ à vide

L'application de l'équation générale du champ (2.19) aux 3 zones de la machine (aimants, entrefer et la particule conductrice) permet d'établir un système de 3 équations qui définissent la distribution du champ. Nous avons aussi :

- ❖  $\vec{J}_s = 0$  car il n'y a pas de courants d'alimentation dans un fonctionnement à vide
- ❖ et  $\partial A_m / \partial t = 0$  puisque la source du champ ( $\vec{M}$ ) n'est pas variable dans le temps mais plutôt dans l'espace dans le référentiel d'étude choisi.

Dans ces conditions, l'équation du champ adaptée à la structure du dispositif devient :

$$\nabla^2 A_m = \frac{\partial^2 \vec{A}_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}_m}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{A}_m}{\partial \theta^2} = -\sigma \mu \Omega \frac{\partial \vec{A}_m}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_r}{\partial \theta} - \frac{M_\theta}{\partial r} - \frac{\partial M_\theta}{\partial r} \quad (\text{II.20})$$

Nous avons, à présent, développé l'équation générale du champ qui est utilisée pour calculer le champ électromagnétique dans les structures des machines. Pour résoudre cette équation, l'introduction des conditions aux limites est nécessaire.

### II.1.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites permettent de calculer les constantes des expressions des potentiels vecteurs établies dans chaque zone constitutive de la machine. Deux types de conditions aux limites peuvent être distingués :

- ✚ Conditions aux frontières du domaine d'étude de type «Dirichlet»  $A(r, \theta) = 0$  :  
ou de type «Newman»  $\partial A(r, \theta) / \partial r = 0$
- ✚ Conditions aux limites de séparation des milieux.

Dans un référentiel d'étude fixe, on distingue deux types de conditions aux limites de séparation entre deux milieux ( $i$ ) et ( $i+1$ ) [33] :

#### ❖ Condition de continuité du flux magnétique

Il s'agit de la conservation du flux ou de la composante normale de l'induction magnétique lors du passage du milieu ( $i$ ) au milieu ( $i+1$ ). Si la limite de séparation est repérée par le rayon  $r_0$  et si le vecteur unitaire normal à cette limite est orienté du milieu ( $i$ ) vers le milieu ( $i+1$ ), cette condition s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{n} \times \left( \vec{B}^{(i+1)} - \vec{B}^{(i)} \right) = 0 \quad (\text{II.21})$$

#### ❖ Condition de continuité d'Ampère

Cette condition représente la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique  $\vec{H}$  entre les deux milieux en l'absence d'une densité surfacique de courant  $J(\theta)$  localisée à la surface de séparation :

$$\vec{n} \times \left( \vec{H}^{(i+1)} - \vec{H}^{(i)} \right) = \vec{J}(\theta) \quad (\text{II.22})$$

## II.2.Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

Les principales méthodes de résolution des EDP dans les milieux non linéaires les plus généralement utilisées sont la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MEF), la méthode des volumes finis (MVF), la méthode analytique (MA) et la méthode intégrale au frontière (MI) dans les régions linéaires (inducteur,...).

C'est la MEF qui est la plus généralement utilisée car elle s'adapte bien à la représentation des géométries complexes et au traitement du comportement non linéaire des matériaux.

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont les solutions conduisent à la détermination des champs électromagnétiques et de température [28, 30,32].

### **II.2.1 Méthode des différences finis (MDF)**

La méthode des différences finies (MDF), est basée sur la discrétisation du domaine d'étude et sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences, en utilisant un développement en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds.

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

Cette méthode donne une formulation directe et relativement simple à mettre en œuvre, 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 symétrie, de passage d'un milieu physique à un autre, et des non linéarités (saturation...), nécessite un traitement spécifique, aussi, cette méthode ne permet pas de percevoir la signification physique des différents termes. Cette difficulté peut être surmontée par l'utilisation de la méthode des volumes finis [28, 30,32].

### **II.2.2 Méthode des volumes finis (MVF)**

La méthode des volumes finis se déduit de la méthode des différences finies pour le fait que le domaine d'étude ou de calcul est subdivisé en nombre d'éléments finis. Chaque élément contient quatre nœuds.

L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection bien déterminée et ensuite intégrée dans chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans le volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle,...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

L'équation discrétisée de cette façon exprime le principe de conservation pour l'inconnu dans l'élément de volume et la solution obtenue est constituée uniquement par les valeurs nodales.

Cette méthode est utilisée, en particulier en mécanique des fluides (l'équation d'écoulement.), où elle est apparue depuis une trentaine d'années; sa procédure donne une solution plus précise que celle fournie par la méthode des différences finies [28, 30,32].

### II.2.3 Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre des problèmes de physiques en résolvant numériquement des équations aux dérivées partielles (EDP). Ces équations peuvent donc représenter le comportement dynamique de certains systèmes physiques même très complexes qui sont continus et décrit par une équation aux dérivées partielles linéaire. Cette méthode permet donc de résoudre de manière discrète une EDP avec une solution approchée suffisamment fiable en mettant en place un algorithme mathématique. C'est cet algorithme qui recherche une solution approchée d'une EDP sur un domaine compact avec conditions aux bords (conditions limites) et/ou dans l'intérieur du compact. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction et définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

#### II.2.3.1 Modélisation et discrétisation

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus. Donc pour avoir une analyse numérique qui simulera au mieux un problème, il faut effectuer deux opérations essentielles la modélisation et la discrétisation, ces opérations se font en deux temps.

La modélisation.

La discrétisation ensuite et portent sur les deux aspects principaux du problème pratique.

- ✚ Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites.
- ✚ Choix des éléments finis et du maillage.

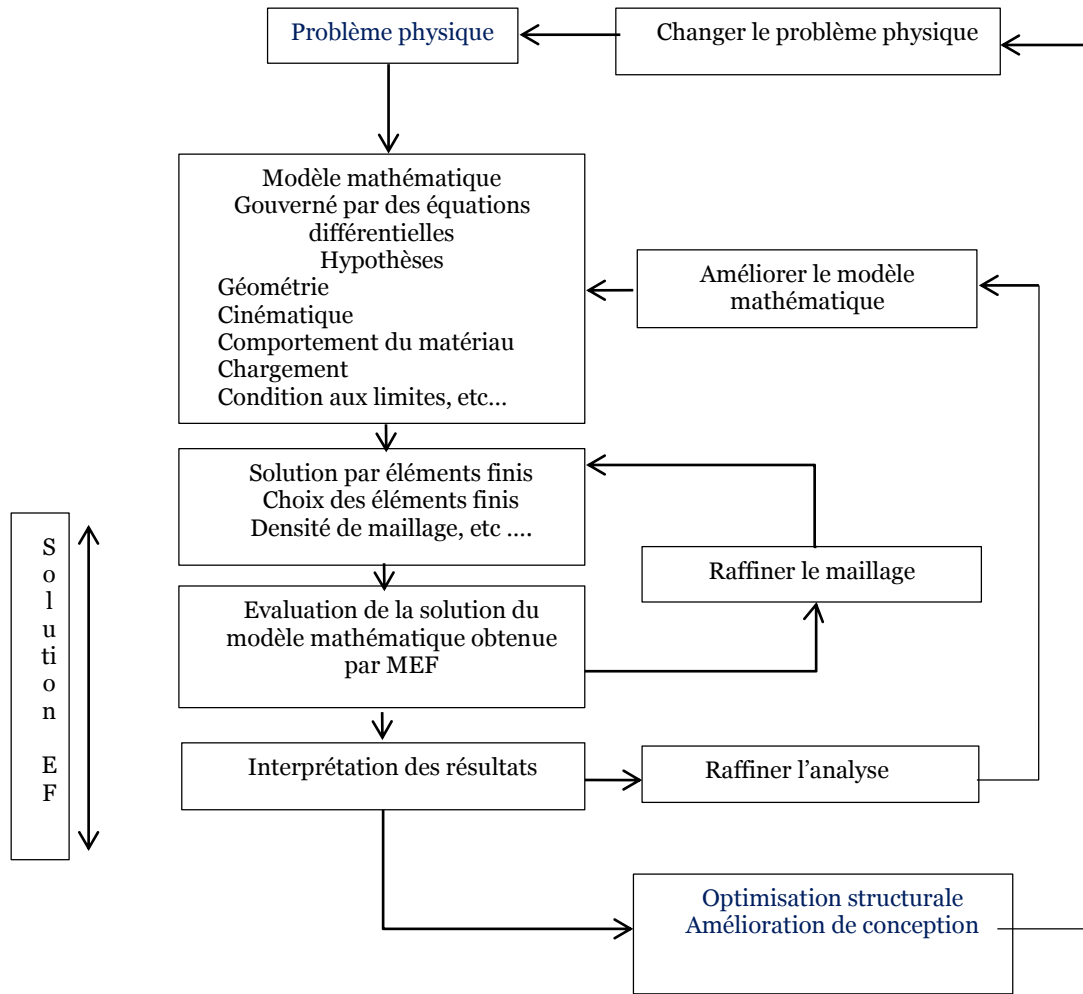


Figure II.1 : Organigramme descriptif de principe de résolution d'un problème élément finie

### II.2.3.2 Concept de la méthode des éléments finis

Le concept de base de la méthode des éléments finis est la subdivision du modèle mathématique à des composants disjoints de géométrie simple appelés (Éléments finis), le comportement de chaque élément est exprimé en terme d'un nombre fini de degrés de liberté, le comportement (réponse) du modèle mathématique est considéré, approximativement, celui du modèle discret obtenu par connexion ou assemblage des éléments

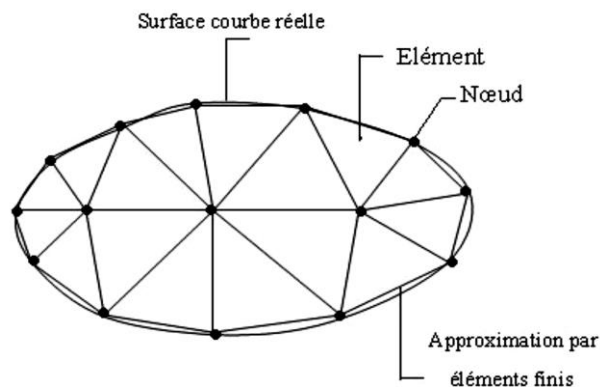




Figure II.2 : Maillage du domaine en triangles à trois nœuds

### II.2.3.3 Étapes de la méthode des éléments finis

Dans diverses applications précitées, les éléments finis perdent leur signification physique d'éléments structuraux : la méthode des éléments finis est considérée comme un outil de mathématiques appliquées destiné à résoudre les équations différentielles. Néanmoins, les étapes de l'étude d'un problème aux limites sont toujours les mêmes, on peut les résumer comme suit :

- ✚ Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage)
- ✚ Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire  $[k^e]$  reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux  $\{u^e\}$  et les forces  $\{f^e\}$  appliquées aux nœuds :

$$[k^e] \{u^e\} = \{f^e\} \quad (\text{II.23})$$

- ✚ Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global  $[K] \{U\} = \{F\}$  de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds
- ✚ Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
- ✚ Résoudre le système  $[K] \{U\} = \{F\}$  et obtenir les déplacements  $\{U\}$  aux nœuds
- ✚ Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées

## II.3. Simulation numérique du séparateur a courant de Foucault :

Le développement des méthodes numériques (différences finies, volumes finis, éléments finis, intégrales de frontière, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique.

Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur les PC d'un coût modeste. Cela a contribué à faciliter la mise au point de logiciels [23].

Nous avons présenté dans la section précédente les différentes formulations des équations de Maxwell et élaborons dans ce chapitre la présentation du logiciel utilisé dans ce travail.

## II.4 Introduction à COMSOL MULTIPHYSIQUES :

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélise ainsi qu'à en prédire son évolution.



Figure II.3 : Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUE

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie que **Comsol Multiphysics** a été développé. C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes.

Différents modules physiques existent sous Comsol, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel [38,39].

#### II.4.1 Prise en main du logiciel:

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol Multiphysiques implique plusieurs étapes :

- ✚ La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- ✚ La définition de sa géométrie.
- ✚ La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- ✚ La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- ✚ La visualisation des résultats.

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes :

- Exécuter l'Assistant Modèle ce qui implique de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).

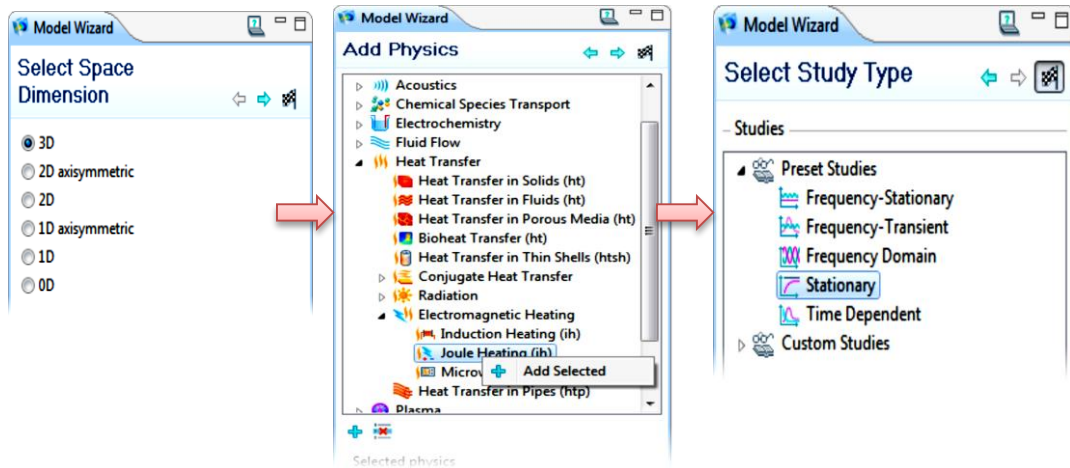


Figure II.4: Plan de décision

- Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire **Définitions Globales**).

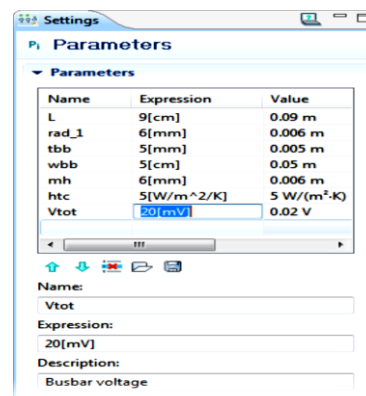


Figure II.5: Définitions Globales des paramètres

- Définir la géométrie du modèle (**Géométrie**).

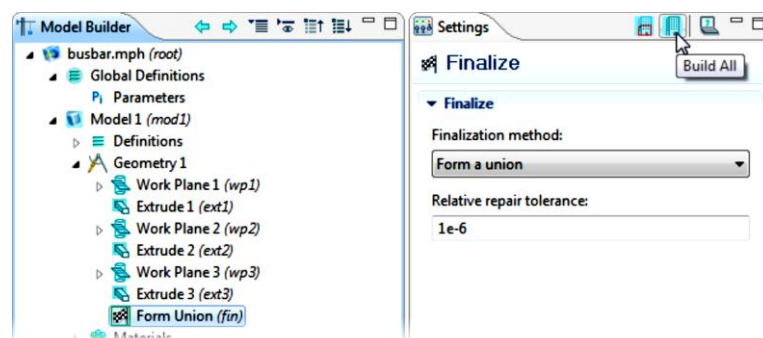


Figure II.6 : Construction géométrique

- Sélectionnez le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (**Maters**).

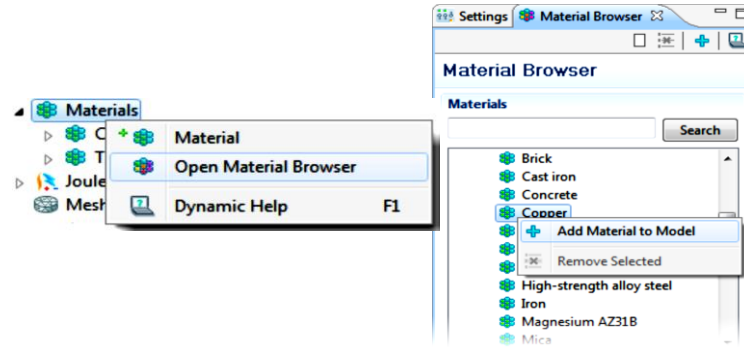


Figure II.7 : Définition des matériaux

- Choisir les conditions initiales et aux limites du modèle pour chaque physique utilisée.

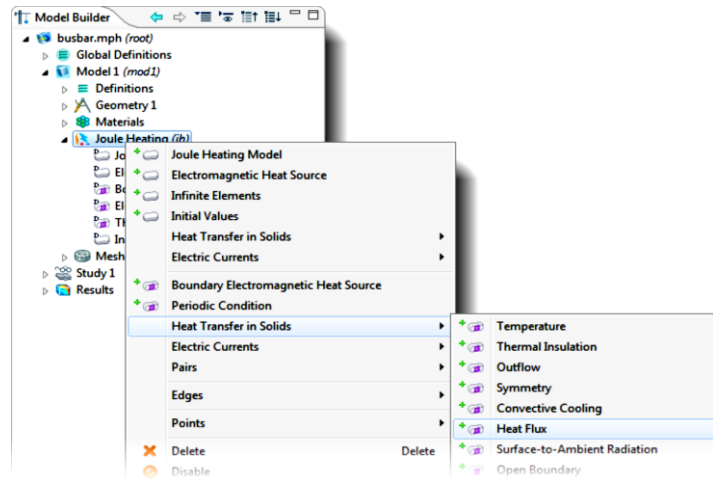


Figure II.8 : Définition des conditions initiales et aux limites

- Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.

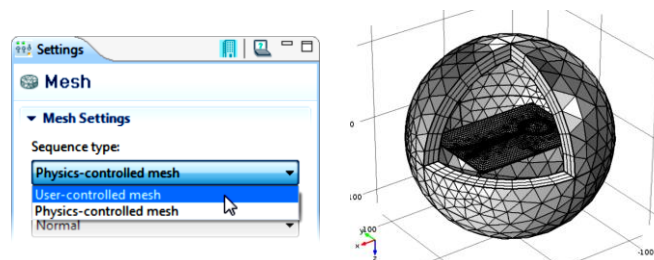


Figure II.9 : Génération du maillage du modèle

- Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (**Study**).
- Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (**Result**).

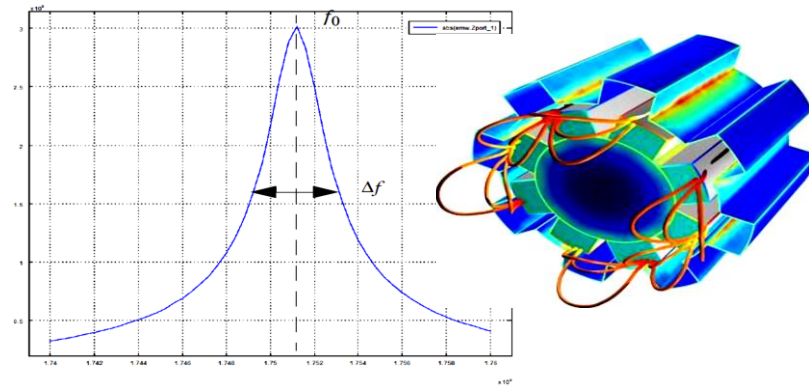


Figure II.10 : Affichage des résultats de simulations numérique 2D et 3D

#### II.4.2 Potentialités et performances de COMSOL Multiphysics:

Les potentialités de **Comsol Multiphysics** sont nombreuses et cela dépend du nombre d'application qui permet de résoudre grâce à son environnement complet pour le calcul scientifique. Il est capable de coupler et de résoudre des équations dans différents domaines tels que la mécanique des fluides et le transfert thermique, l'électromagnétisme, la dynamique des fluides et la chimie, MEMS et Mécanique des Structures. Il offre également plusieurs solveurs de très haut niveau de performance capable de traiter des problèmes avec des temps de résolution optimaux. Ceci et d'autres caractéristiques font de COMSOL un environnement inégale de modélisation pour la conception industrielle, la recherche, développement et l'enseignement [38,39].

##### Quelque conseil

- En principe **Comsol** permet donc de modéliser toutes les **EDP**, c'est sa force, mais sa faiblesse est dans sa généralité : il y a souvent des méthodes plus efficaces, notamment pour les problèmes hyperboliques pour lesquels la méthode des éléments finis n'est pas bien adaptée.
- Il est absolument nécessaire d'utiliser l'aide pour comprendre ce que fait réellement une fonction particulière du logiciel.
- Dans le cas de géométries ou de modèles complexes, traiter plusieurs problèmes en introduisant progressivement les difficultés. Sauver le travail à chaque étape importante. Sauver la définition de la géométrie (Export>Geometry to File) que l'on peut retrouver pour un autre problème (Import>CAD Data to File).
- Utiliser les "modèles" pour comprendre le fonctionnement du logiciel pour un problème donné.
- Attention à certaines options par défaut d'utilisation du logiciel (le pas de la grille, la sélection automatique du nœud le plus proche...) qui peuvent être inadaptées.
- Attention aux paramètres par défaut de la définition du problème (conditions initiales ou aux limites...), du calcul (choix de la méthode de résolution, prise en

compte de propriétés spéciales de la matrice...), ou de la visualisation des résultats qui peuvent être inadaptés.

### II.4.3 Création et vérification des données

Cette étape dépend du logiciel utilisé. La syntaxe utilisée pour définir le jeu de données est définie dans le mode d'emploi du bloc fonctionnel correspondant. En sortie, un fichier est créé, qui contient toutes les informations nécessaires à l'exécution des calculs. Les vérifications relatives au jeu de données se font généralement graphiquement, grâce à un module informatique appelé **préprocesseur**.

Différents contrôles peuvent être utilisés pour valider le jeu de données :

- Vérification de la géométrie de la pièce et du maillage;
- Vérification de la prise en compte des sollicitations et des conditions cinématiques (liaisons) imposées à la structure;
- Vérification des propriétés mécaniques utilisées.

Pour des problèmes spécifiques, d'autres contrôles seront envisagés. L'objectif d'éviter de faire tourner un calcul inutilement. Ceci d'autant plus que la recherche d'une solution acceptable pour un problème donné est rarement le résultat d'un seul calcul [44].

### II.4.4 Erreur et précision de calcul

Ce bloc, le plus coûteux en temps machine est souvent exécuté en tâche de fond. Un fichier de résultats permet de vérifier que les différentes phases de calculs se sont correctement déroulées :

- ✚ Interprétation des données, vérification des paramètres manquants ;
- ✚ Construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes ;
- ✚ Singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments ;
- ✚ Convergence, nombre d'itérations, etc.

Ce fichier peut contenir aussi les résultats du calcul (déplacements, résidus, contraintes. . .) ce qui lui confère dans ce cas un volume généralement très important. Il peut arriver que le calcul échoue [44]. Les principales sources d'erreurs généralement observées à ce niveau sont listées dans le tableau II.3

Erreurs	Causes	Remèdes
singularité de K	éléments mal définis, existence de modes rigides, intégration numérique	modifier la topologie du maillage, modifier les liaisons, modifier le nombre de points d'intégration
résolution des équations	arrondi numérique, non convergence	travailler en double précision, changer d'algorithme, augmenter le nombre d'itérations

Tableaux II.3 : Principales sources d'erreurs durant le calcul [41].

## II.5 Modèle numérique

### II.5.1 Définition du système

Il est indispensable lorsque l'on cherche à obtenir une solution optimisée pour réduire les coûts et les délais de fabrication. Grâce au calcul, même simplifié, on a pu tester plusieurs configurations pour optimiser le comportement d'un modèle. Cela évite de multiplier les prototypes et les essais tests réels, les supports physiques ne servent plus à chercher une solution. L'interface graphique de **Comsol Multiphysics** nous a permis de définir avec aisance notre système.

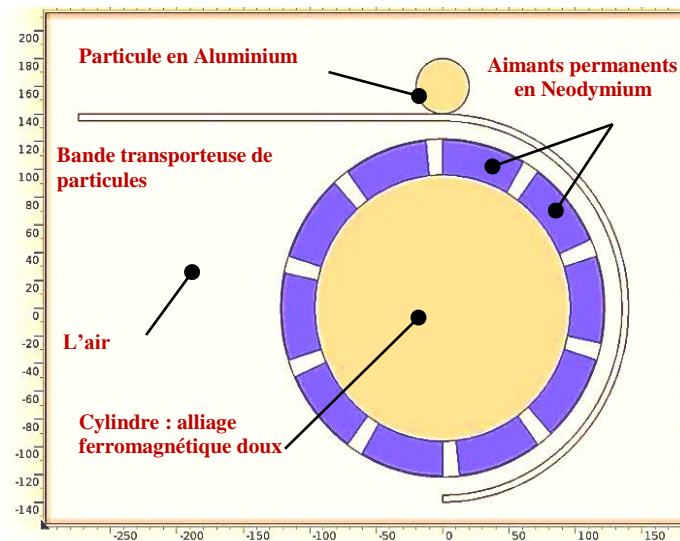


Figure II.11 : Schémas descriptifs du modèle de simulation du séparateur à courant de Foucault.

### II.5.2. La géométrie

Le modèle numérique du tambour à aimants permanents est décrit à l'aide de points, de segments de droites et d'arcs comme l'indique la figure II.12

Un enchaînement de procédures a été suivi pour réaliser cette étape :

- Création d'un système de coordonnées (définition du centre du système, type de coordonnées de système, validation du système).

- Insertion et identification des points suivant le type de coordonnées du système.
- Création et identifications des segments et arcs.
- Création et identifications des différentes faces (réelles, virtuelles). Pour pouvoir créer une face réelle, il faut connecter tous les segments et arcs qui la composent.

Après la réalisation de toutes ces étapes on obtient la configuration de la figure (II.12)

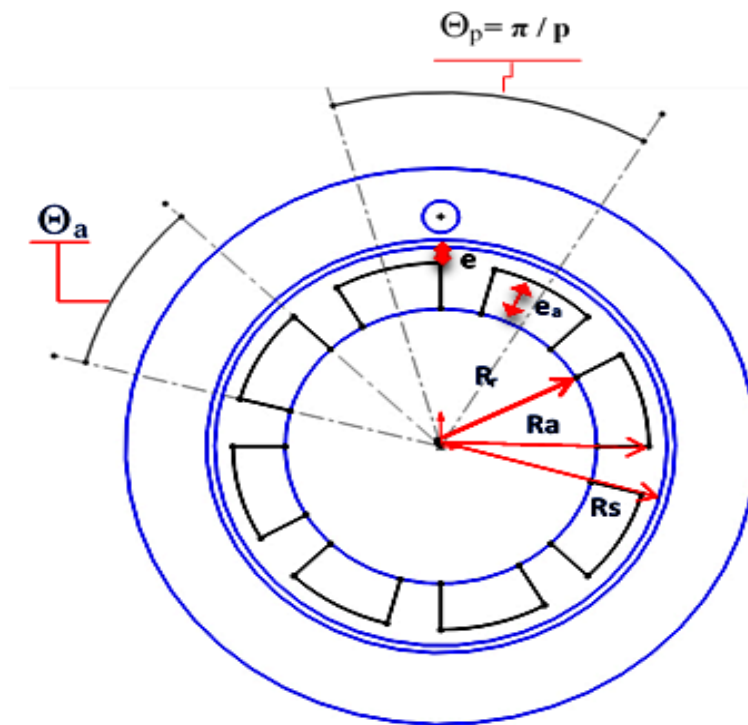


Figure II.12 : Représentation paramétrique de la géométrie.

Avec

Ra	:	Rayon de l'aimant adjacent au vide.
Rs	:	Rayon de tambour porteur de la bande transporteuse
Rr	:	Rayon de l'aimant adjacent au rotor
ea	:	Épaisseur de l'aimant
e	:	Épaisseur de l'entrefer
$\Theta_a$	:	L'angle mécanique de l'aimant permanent
$\Theta_p$	:	l'angle mécanique polaire des aimants permanents

### Le rotor :

Composé d'une culasse cylindrique en acier ferromagnétique doux, défini par sa longueur  $L_{rot}$ , son rayons  $R_r$ ,



### Les aimants permanents :

Équations décrivant les dimensions des aimants permanents sont Les  $2p$  aimants permanents,  $p$  étant le nombre de paires de pôles de la roue polaire, disposés sur la surface du rotor. Ils ont la forme de tuiles de longueur  $L_a$ , de rayons  $R_r$  et  $R_a$  (le rayon des aimants permanents adjacents à l'entrefer et le rayon adjacent au rotor), d'épaisseur  $e_a$  et d'angle mécanique  $\Theta_a$ . Nous pouvons alors écrire la relation suivante :

$$e_a = (R_a - R_r) \quad (\text{II.24})$$

Si  $\Theta_p = \pi / p$  représente l'angle mécanique polaire, alors le coefficient d'arc polaire des aimants permanents est défini par :

$$\alpha_a = \Theta_a / \Theta_p \quad (\text{II.25})$$

### L'entrefer :

C'est la distance délimitant le rayon des aimants permanent adjacent au vide par rapport au tambour rotatif utilisé pour l'entraînement du tapis roulant

L'épaisseur réelle de l'entrefer est simplement définie par :


$$e = (R_s - R_a) \quad (\text{II.26})$$

### II.5.3 Création des matériaux

En utilisant la Bibliothèque des matériaux, on peut créer de nouveaux matériaux pour construire le système. Par exemple, dans notre cas, nous avons introduit les matériaux suivants :

- Un aimant permanent **Neodymium** avec les caractéristiques suivantes :
  - Perméabilité relative  $U_r = 1$
  - Induction rémanente  $Br = 1.32 \text{ T}$
- Acier doux modélisant le tambour **Soft iron (without losses)**
  - Perméabilité relative  $u_r = 5000$
  - Supposé parfait - Non prise en compte de la saturation magnétique
- Particule en cuivre
- Espace Air caractérisé par  $u_0 = 1$

### II.5.4 Définition physique des régions

Cette partie de la description de notre modèle est très importante puisqu'elle concerne la définition de la physique ou le domaine d'étude qui est  **MACHINE TOURNANTE-MAGNETIQUE**, la caractérisation des matériaux composant la machine. Ainsi, que les conditions aux limites du système électromagnétiques.

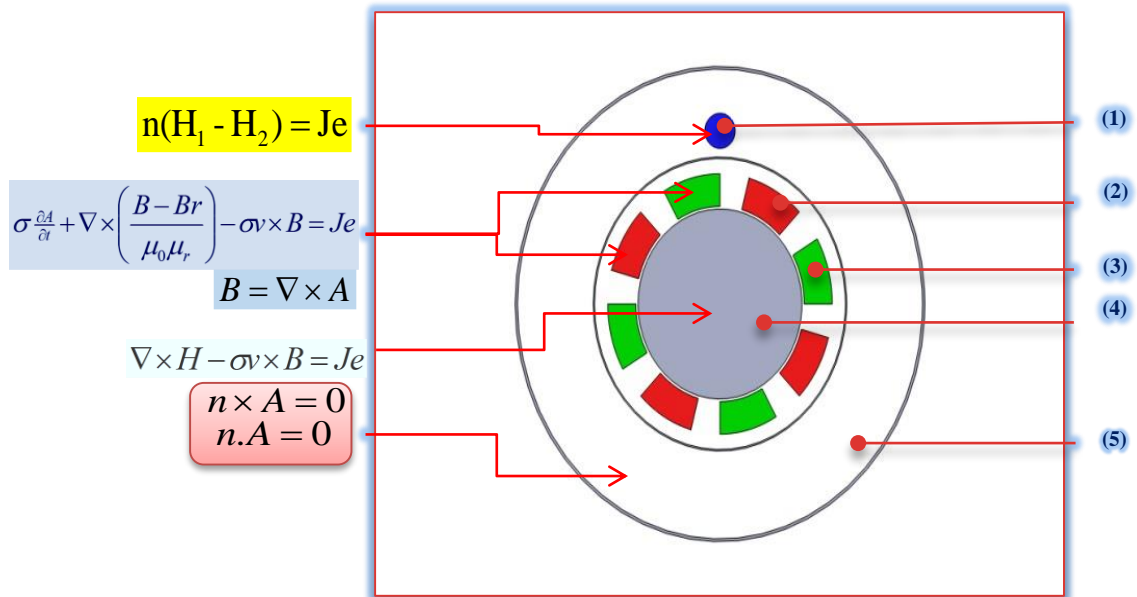


Figure II.13: Représentation des paramètres du modèle élément finis.

N	Commentaire	Matériau utilisé	L'ensemble mécanique
(1)	Particule	Cuivre	Fixe
(2)	Aimant Nord Br=1.32 T composante radial	Neodymium	Mouvement (rpm(tr/min))
(3)	Aimant Sud Br=-1.32 T composante radial	Neodymium	Mouvement (rpm(tr/min))
(4)	Culasse cylindrique (rotor)	Soft Iron Without Losses	Mouvement (rpm(tr/min))
(5)	Enceinte de simulation	Air ou vide	Fixe

Le tableau II.3 : tableaux descriptifs des caractéristiques physique de chaque région surfacique.

### II.5.5. Le maillage

Les différentes procédures suivies pour discrétiser la géométrie sont :

- création d'un système de discrétisation
- discrétisation des segments et arcs (on impose la méthode utilisée par le logiciel pour le découpage)
- maillage des différentes faces (on spécifie la forme des éléments).
- Les différentes surfaces ainsi délimitées, sont ensuite découpées en éléments finis et constituent le maillage du problème figure (II.14).

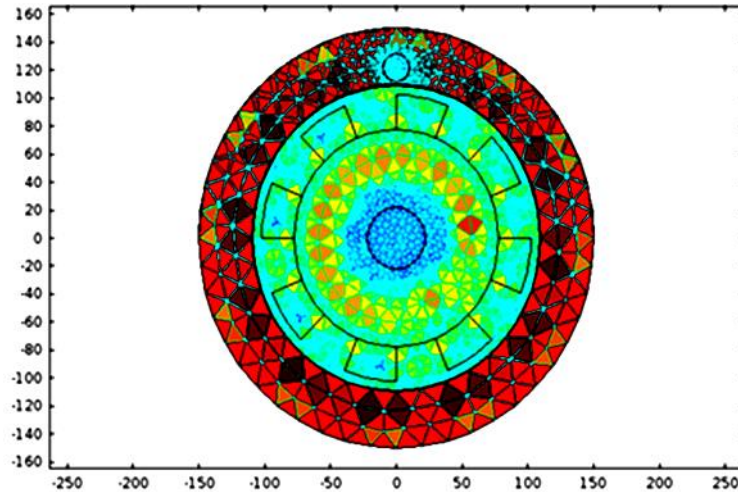


Figure II.14 ; Représentation du maillage.

Élément de maillage	Nombre
Assemblage d'objets solides	4
Domaines	14
Frontières	68
Points.	61
Nombre d'élément de domaine	2196
Nombre d'éléments de frontière.	384
Éléments d'excellente qualité	98.5242 %
Qualité moyenne des éléments	0.9275 %
Qualité minimal des éléments	0.5483 %

Le tableau II.4 : Éléments du maillage.

Pour étudier la variation des grandeurs électromagnétiques et mécaniques, il est impératif de mailler de façon très fine l'entrefer de la machine afin d'occuper tous l'espace ainsi on minimisera l'erreur dans le calcul. La figure II.14 nous montre un exemple de maillage de notre dispositif.

### II.5.6 Résultats de simulation

Nous avons simulé le fonctionnement statique du SCF en utilisant le modèle magnétostatique disponible dans le logiciel.

La figure II.15 nous montre la distribution des lignes de flux magnétique dans le système généré par les aimants permanents. On remarque, d'après cette répartition, la formation des 4 pôles de la machine ainsi que la distribution des lignes influençant la particule.

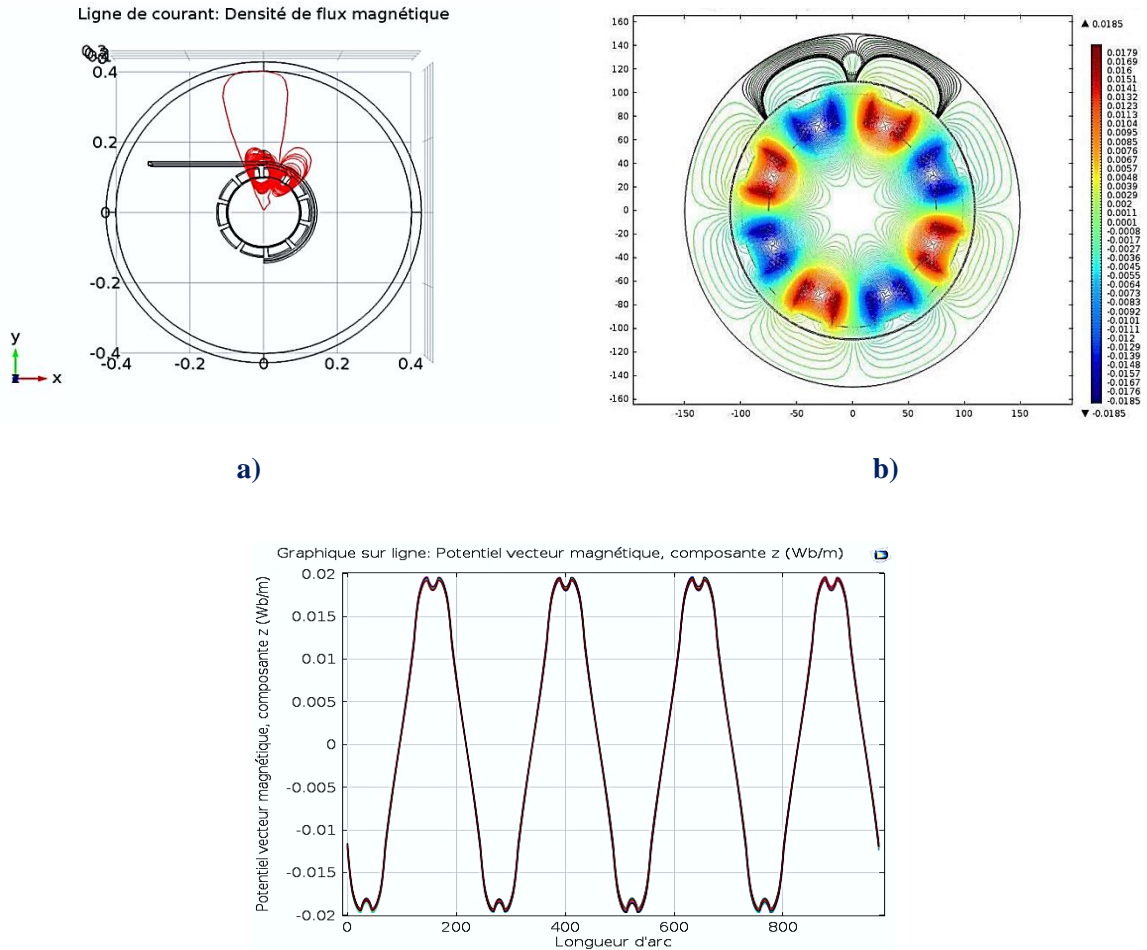


Figure 15 ; Graphique sur ligne du potentiel vecteur magnétique composante Z ( $\text{wb/m}$ )

- a) Représentation iso-valeurs 2d des lignes équi-flux magnétiques.
- b) Représentation lignes de courant 3d de la répartition du flux magnétique

## II.6 Paramètres de conception

Dans le but de concevoir un dispositif à courant de Foucault optimisé capable de séparer des particules non ferreuses, une connaissance des phénomènes physiques intervenants demeure indispensable afin de déterminer les paramètres agissant sur l'efficacité de la séparation.

Les paramètres à optimiser sont définis comme suit :

- Influence du choix de type d'aimantation (radial / parallèle).
- Influence du choix de la disposition d'aimant permanent.
- Influence du choix du nombre de pôles.
- Influence de l'entrefer

Afin de calculer la tension induite dans la particule causant la propulsion de cette dernière du tapis roulant ainsi obtenir une séparation, nous avons intégré sous

COMSOL une équation permettant l'analyse du comportement de la particule lors de la rotation du tambour à aimants permanents [43]

$$V_i = NN \sum_{windings} \frac{L}{A} \int E_Z dA \quad (II.27)$$

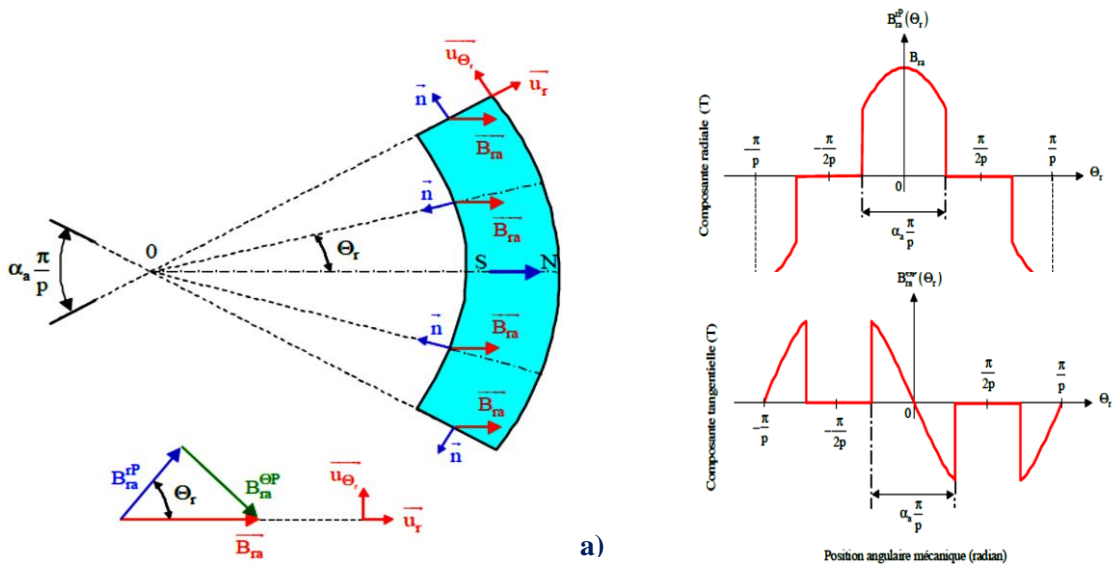
### II.6.1 Influence du choix de type d'aimantation (radial / parallèle).

Le vecteur induction rémanente de l'aimant dépend de la direction d'aimantation. La Figure II.16 met en évidence deux types d'aimantation : parallèle et radiale [46].

Pour déterminer les composantes radiale et tangentielle du vecteur d'aimantation, on utilise celles d'un bloc d'aimant élémentaire définies par les relations suivantes :

✚ Pour un bloc aimanté parallèlement [46] :

$$\begin{cases} M_r(\theta_r) = M_n \cos(\alpha_{m,n} - (\theta_r - \beta_{m,n})) \\ M_\theta(\theta_r) = M_n \sin(\alpha_{m,n} - (\theta_r - \beta_{m,n})) \end{cases} \quad (II.28)$$



✚ Pour un bloc aimanté radialement :

$$\begin{cases} M_r(\theta_r) = M_n \\ M_\theta(\theta_r) = 0 \end{cases} \quad (II.29)$$

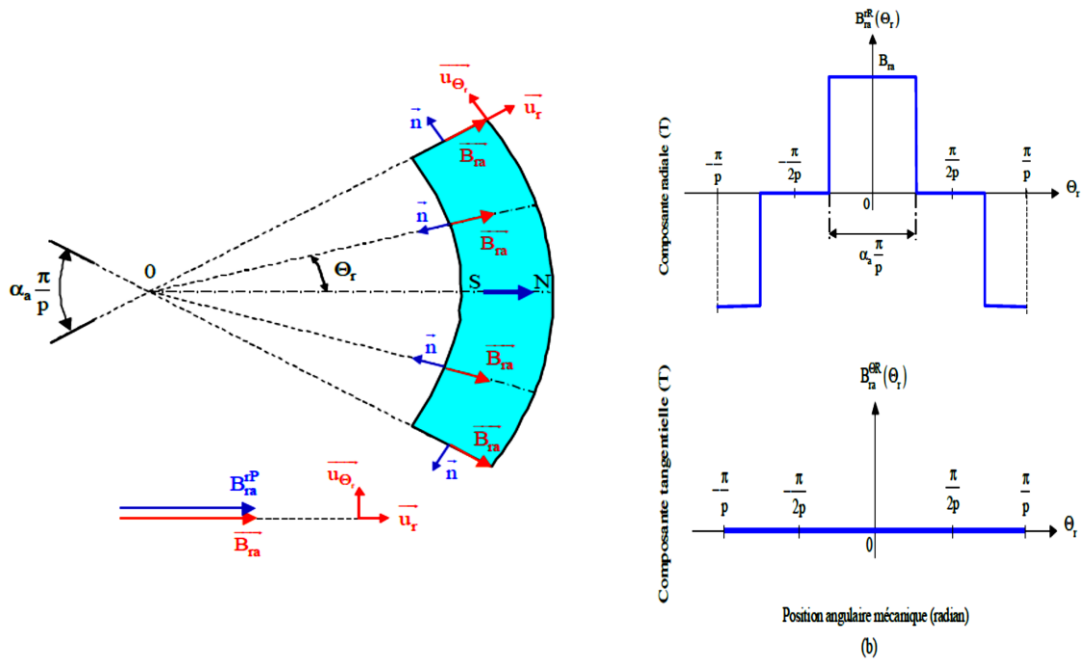


Figure II.16 : Représentation des composantes radiales et tangentielles de vecteur induction rémanent sous une paire de pôles. (a) Aimantation parallèle. (b) Aimantation radiale..

En utilisant ces deux relations, on peut modéliser les composantes  $M_r(\theta_r)$  et  $M_\theta(\theta_r)$  du vecteur d'aimantation par un développement en séries de Fourier spatiales avec un fondamental ( $k=1$ ) et des harmoniques d'espace ( $k \geq 2$ ).

- La variation de la tension induite dans la particule pour deux types d'aimantations radial (a) et parallèle (b) en fonction de temps, est représentée par les courbes de la figure II.17

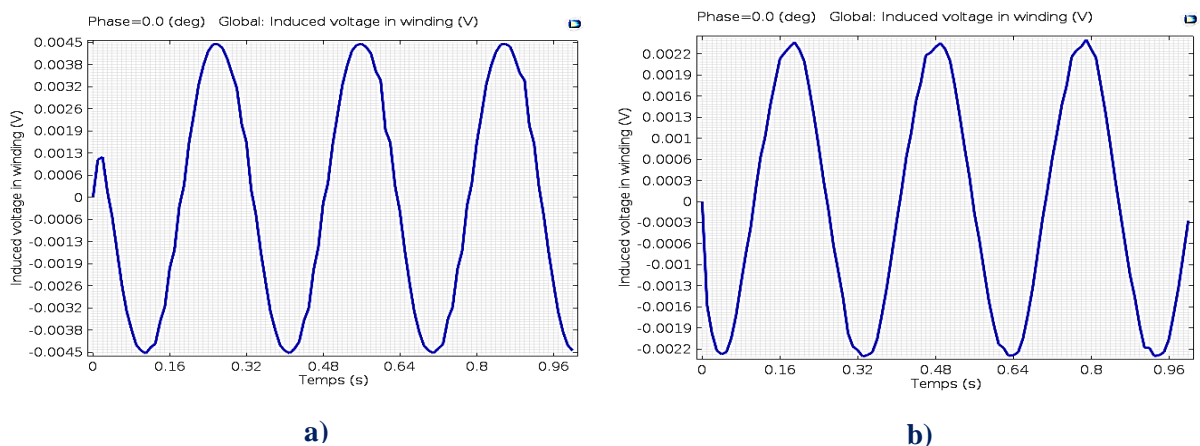


Figure II.17 : Représentation graphique de la tension induite (V) dans la particule en fonction du temps (s) pour deux types d'aimantation.

- Graphique globale de la tension induite pour une aimantation radial
- Graphique globale de la tension induite pour une aimantation parallèle

### II.6.2 Influence du choix de la disposition d'aimant permanent.

Pour avoir un bon rendement de notre système de séparation, on a fait une étude sur l'emplacement des aimants permanents sur le tambour rotatif ; on peut avoir deux modèles : aimant insérés et aimant surfacé.

#### a) Aimants insérés

Dans ce type de configuration, les aimants permanents sont montés en surface de la culasse cylindrique. Toutefois, les ouvertures entre les aimants sont partiellement remplies avec le fer. Ce qui permet d'avoir une bonne tenue mécanique. Le fer entre les aimants crée une saillance et donne un couple réluctant en plus du couple des aimants.

- La variation du courant induit dans la particule pour une configuration à aimants insérés en fonction de temps, est représentée par la courbe de la figure II.18.19 :

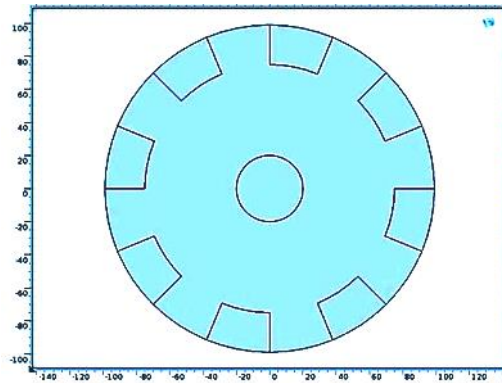


Figure II .18 : Géométrie d'un tambour à aimants insérés.

La figure (II.19) représente le courant induit dans la particule pour le modèle d'aimants insérés.

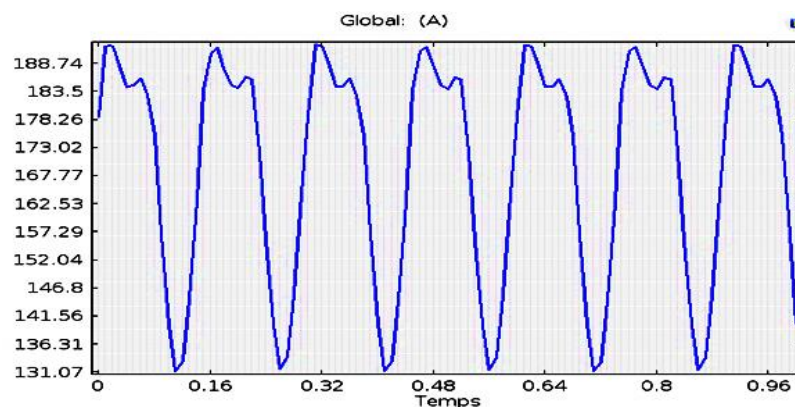


Figure II .19 : Représentation graphique du courant induit dans une particule pour une disposition d'aimants insérée.

### b) Aimants en surface

Dans ce cas les aimants permanents à aimantation radiale sont placés sur la périphérie du tambour. Ils ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique comme montré dans la figure II 20. Pour améliorer la tenue mécanique et la fixation des aimants, ils peuvent être insérés sous une frette amagnétique, généralement en fibre de verre. Comme les aimants permanents ont une perméabilité proche de celle de l'air ( $\mu_r=1.1$  à  $1.2$ ), l'entrefer magnétique équivalent vu par la particule est important et constant.

- La variation du courant induit dans la particule pour une configuration à aimants insérés en fonction de temps, est représentée par la courbe de la figure II 20.21.

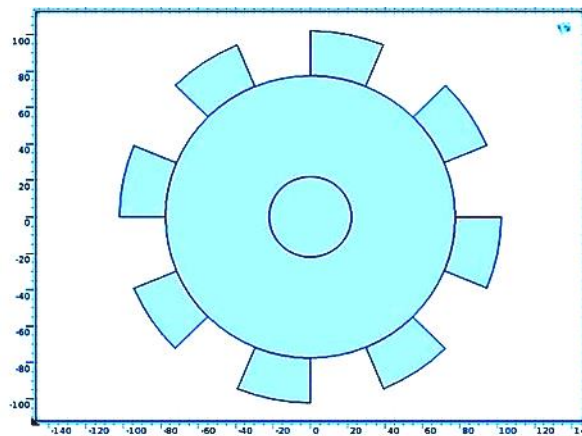


Figure II .20 : La géométrie d'un tambour à aimants en surfacé.

La figure (II.21) représente le courant induit dans la particule pour le modèle d'aimants en surface

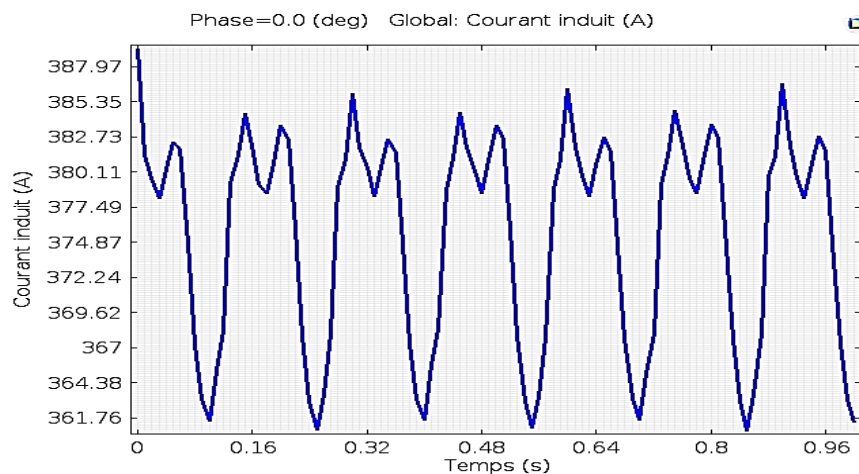


Figure II .21 : Représentation graphique du courant induit dans une particule pour une disposition d'aimants en surface.



### II.6.3 Influence du choix du nombre de pole.

On a pu mettre en évidence la variation de la densité de courant induit dans les particules à séparer avec plusieurs configurations géométriques afin de pouvoir concevoir notre séparateur à courant de Foucault.

• La variation du courant induit dans la particule pour quatre configurations géométriques en fonction de temps, sont illustrés dans les figures II 22, 23, 24 et 25 correspondantes aux quatre tambours avec 2,3,4 et 5 paires de pôles respectivement.

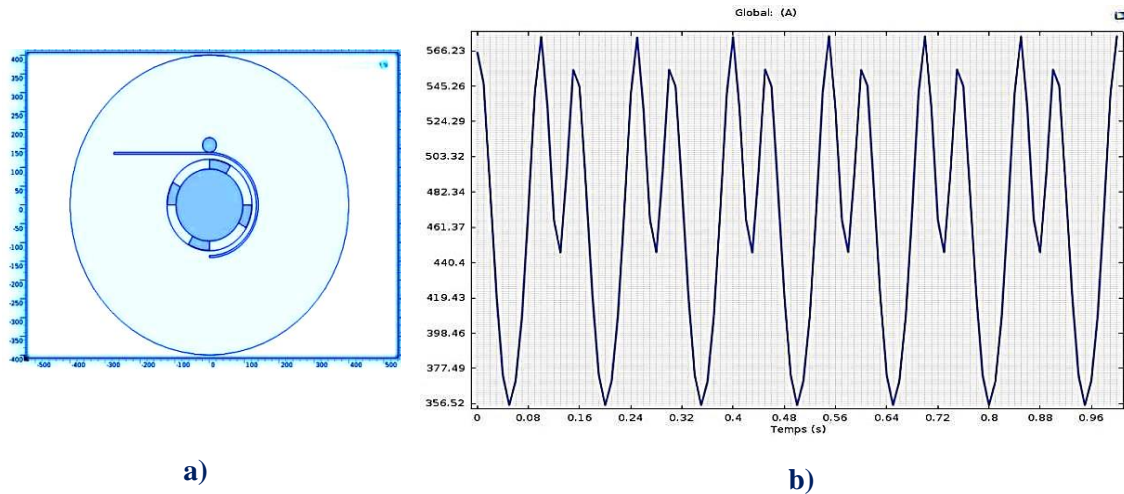


Figure II.22 : Représentation graphique du courant induit (A) dans la particule en fonction du temps (s) pour une configuration a 2paires de pôles.

- a) Schéma descriptif d'une configuration du tambour avec 2paires de pôles  
b) Graphique globale du courant induit en Ampère.

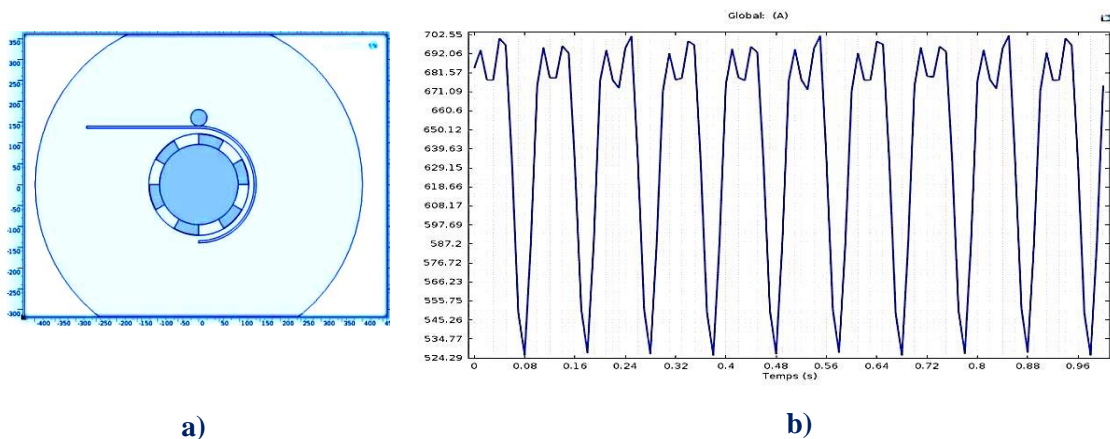


Figure II.23 : Représentation graphique du courant induit (A) dans la particule en fonction du temps (s) pour une configuration a 3paires de pôles

- a) Schéma descriptif d'une configuration du tambour avec 3paires de pôles  
b) Graphique globale du courant induit en Ampère

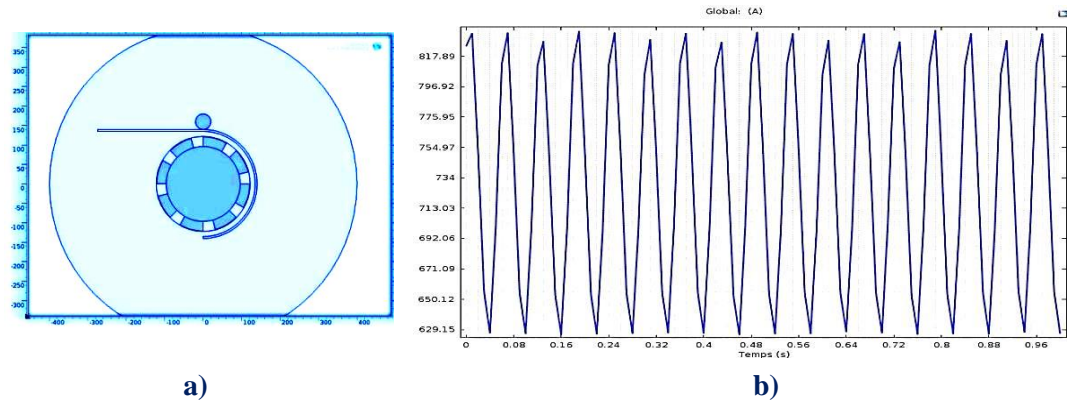


Figure II.24 : Représentation graphique du courant induit (A) dans la particule en fonction du temps (s) pour une configuration a 4paires de pôles.

- a) Schéma descriptif d'une configuration du tambour avec 4paires de pôles.  
 b) Graphique globale du courant induit en Ampère.

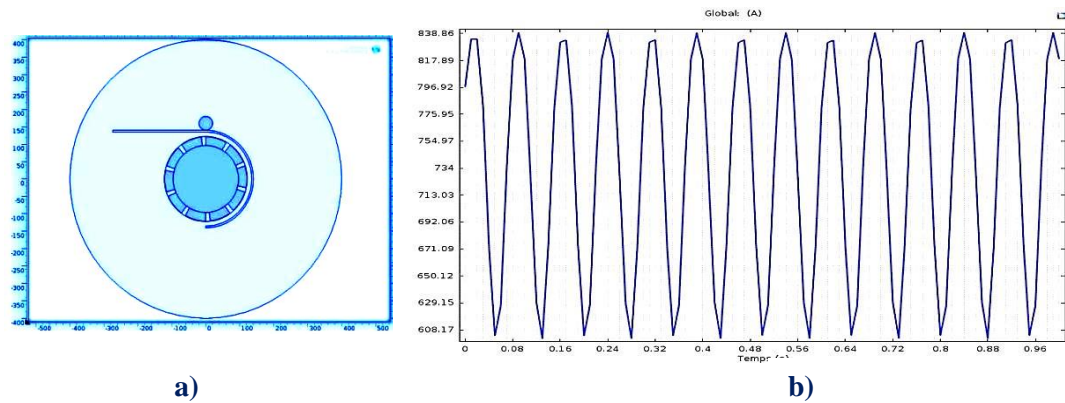


Figure II.25 : Représentation graphique du courant induit (A) dans la particule en fonction du temps (s) pour une configuration a 5paires de pôles.

- a) Schéma descriptif d'une configuration du tambour avec 5paires de pôles.  
 b) Graphique globale du courant induit en Ampère

La variation de l'intensité de courant induite dans la particule avec différentes configurations géométriques est estimée dans le but de concevoir le tambour magnétique avant la réalisation final du prototype.

Pour cela, quatre configurations sont analysé correspondant à quatre nombre de pairs de pôles magnétique définit comme suit :  $2p=4$ ,  $2p= 6$ ,  $2p=8$  et  $2p=10$ .

Concernant l'influence du nombre de pôles, il apparait clairement que l'intensité de courant induite dans la particule augmente avec l'accroissement de celle-ci. En effet le nombre de pole est directement lié à la fréquence du champ magnétique tournant généré d'après les résultats de simulations montré aux figures II (18-21).

D'un autre part, on remarque une légère différence entre les deux configurations pour  $n=4$  et  $n=5$ . De ce fait, il serait très judicieux d'opter pour une configuration à 4

pairs de pôles pour des raisons économique ainsi minimisé le coût de construction et en préservant la qualité de séparation.

#### II.6.4 Influence de l'entrefer

Afin d'analyser l'influence de l'entrefer, on fait varier la distance délimitant la périphérie du tambour à aimants permanents et la particule déposée au-dessus du tapis roulant.

Pour ce test, on a fixé la vitesse de rotation, la dimension de la particule et on a varié cette distance à trois valeurs d'entrefer ( $e=10\text{mm}$ ,  $e=20\text{mm}$ ,  $e=30\text{mm}$ ) afin d'évaluer l'influence de ce dernier sur la performance de séparation. Pour cela une estimation de la valeur de la tension induite nous a permis d'optimiser ce paramètre (figure II 26).

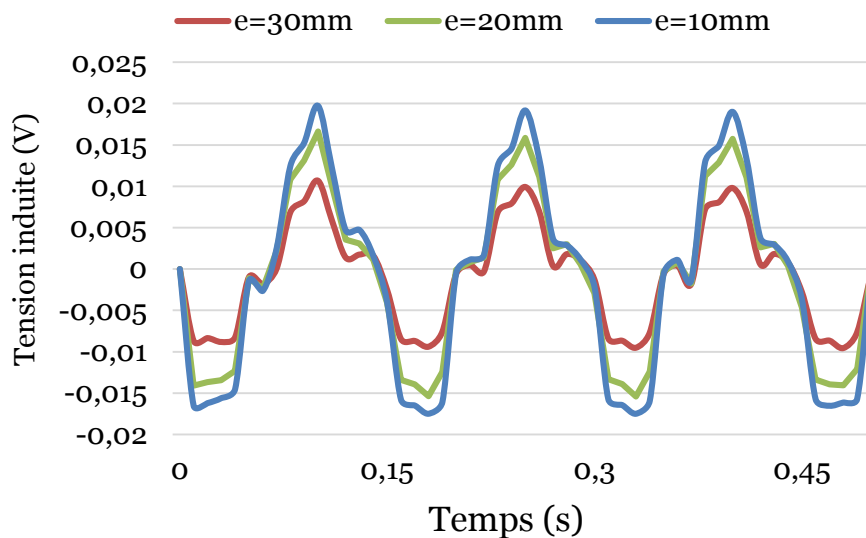


Figure II.26 : Représentation graphique de la tension induite (V) dans la particule pour trois valeurs d'entrefer ( $e=10\text{mm}$ ,  $e=20\text{mm}$ ,  $e=30\text{mm}$ ).

Il ressort de ces résultats de simulations, que l'augmentation de la distance entre la position de la particule et le tambour à aimants entraîne une diminution de la tension induite ce qui conduit à un affaiblissement de la force de projection qui agit directement sur l'angle de décollement de la particule du tapis. Par conséquent, la variation de l'épaisseur de l'entrefer est inversement proportionnelle à la valeur de la tension induite..

#### II.7. Paramètres influençant la séparation

Une simulation préliminaire par le **COMSOL MULTIPHYSICS** nous offre la possibilité de réglage et d'évaluation des paramètres, permettant ainsi l'étude de l'influence de chaque facteur sur le rendement de séparation.

La performance est estimée par la variation de courant et de la tension induite dans les particules non ferreuses par le tambour à aimants en fonction du temps

Les paramètres étudiés sont :

- Intensité de l'induction rémanente des aimants permanents
- Vitesse de rotation du tambour à aimants permanents (tr /min).
- Taille de la particule
- Forme de la particule
- Conductivité électrique de la particule

### II.7.1. Influence de l'intensité de l'induction rémanente des aimants permanents

La conception d'un séparateur à courant de Foucault de haute performance repose sur la connaissance de l'ensemble des phénomènes physiques en présence et de la maîtrise de leur évolution lors de la mise en application de la physique de séparation.

Aujourd'hui, les séparateurs de métaux non ferreux se définissent par leur haute intensité, leur haute fréquence du champ magnétique que peuvent développer. Ils se distinguent les uns des autres dans leur capacité à séparer une large gamme de matériaux de tailles différentes.

De ce fait on est amené à étudier un paramètre qui compte parmi les facteurs les plus influents sur l'efficacité de séparation. Pour cela des tests de simulations ont été effectués afin de mettre en évidence la variation de l'intensité du champ magnétique généré par le tambour à aimants permanents.

- La variation du courant induit dans la particule pour trois valeurs d'intensité du flux rémanent défini comme suit ( $Br=0.8T$ ,  $Br=1T$  et  $Br=1.32T$ ) en fonction de temps, est représentée par les courbes de la figure II 27.

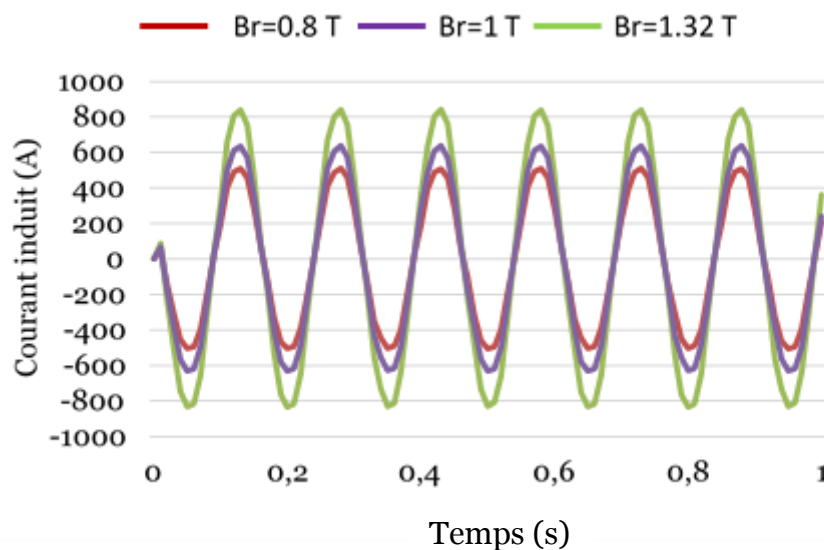


Figure II.27 : Représentation graphique du courant induit (A) dans la particule pour trois valeurs l'intensité de l'induction rémanente des aimants permanents

En effet, l'augmentation du flux magnétique généré par les aimants permanent engendre de fortes inductions de courants tourbillonnant donnant naissance à des forces de répulsion plus importante.

D'après le résultat de simulation on remarque que pour une valeur d'intensité de 1.32 T on obtient la grande amplitude du courant induit, de ce fait l'intensité des aimants permanents utilisés définit l'efficacité de la séparation

### II.7.2. Influence de la vitesse de rotation

La séparation des métaux non ferreux par courant de Foucault, repose sur la fréquence de variation du champ magnétique appliqué sur les particules à séparer (principe de la loi de Faraday). Cette fréquence est obtenue par la variation de la vitesse de rotation du tambour à aimants permanents à pôles alterné donnant ainsi naissance à un courant tourbillonnant qui a tendance à circuler dans les particules conductrices.

Afin d'évaluer ce paramètre, plusieurs tests de simulation ont été effectués pour différentes valeurs de la vitesse de rotation ( $n=50, 500$  et  $1000$  tr/min).

- La variation de la tension induite dans la particule pour différentes valeurs de la vitesse en fonction de temps, est illustrée dans la figure II 28, ( $n= 50, 500$  et  $1000$  tr/min).

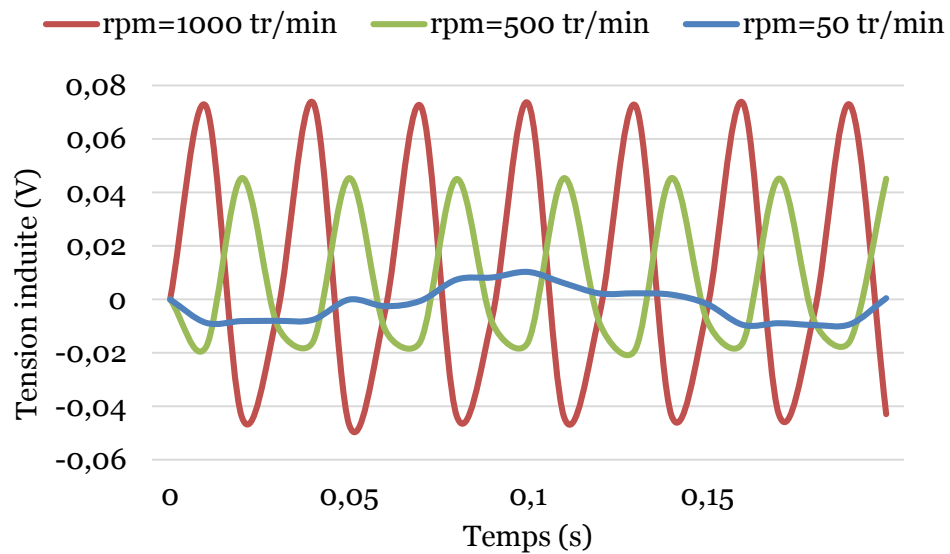


Figure II.28 : Représentation graphique de la tension induite (V) dans la particule pour différentes vitesse de rotation (**rpm= 50, 500 et 1000 tr/min**)

Nous remarquons d'après ces résultats, qu'une augmentation de la vitesse de rotation entraîne une augmentation de la tension induite dans la particule, en raison des hautes fréquences du champ magnétique tournant créé donnant naissance à des forces de répulsion plus importantes.

Il est évident que la vitesse de rotation du tambour à aimants permanents influe directement sur l'amplitude des forces d'induction, ce qui fait augmenter considérablement l'efficacité de séparation.

### II.7.3. Influence de la taille de la particule

Afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur la performance de séparation [48], on a effectué plusieurs simulations, dans lesquels on a simulé des particules en Aluminium de forme cylindrique homogène avec une longueur axial fixe mais de différents diamètres définis comme suit ;  $R=0.5\text{cm}$ ,  $R=1\text{cm}$  et  $R=1.5\text{cm}$  (figure II-29)

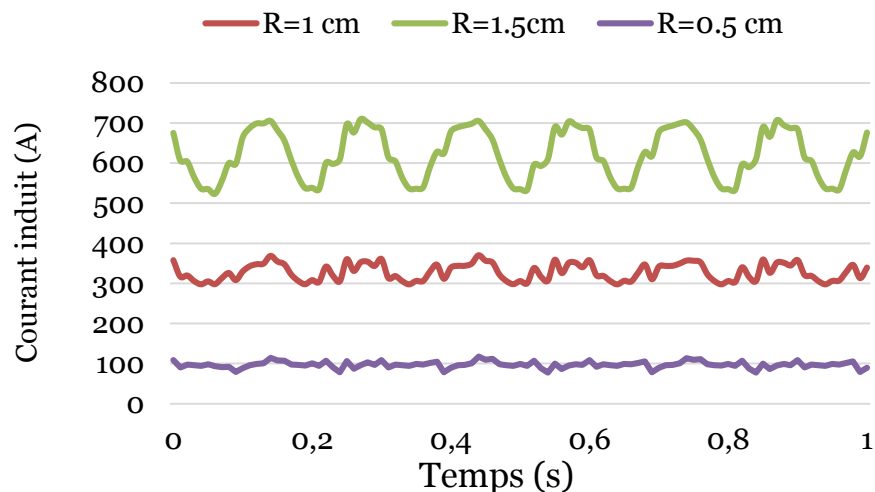


Figure II.29 : Représentation graphique du courant induit (A) pour différentes tailles de particules  $R=1\text{cm}$ ,  $R=1.5\text{cm}$  et  $R=0.5\text{cm}$

Les tailles de particules sont d'une considération critique. Dans le cas de séparateur à haute intensité, une granulométrie inférieure à 3mm n'est effectivement pas sensible au séparateur même en dépit de l'ajustement des paramètres de fonctionnement [44].

Il est à noter que les dimensions des particules à séparer compte parmi les facteurs les plus influents qui agissent directement sur le rendement de la séparation.

Il en ressort de ces résultats de simulation, que l'augmentation du courant induit dans les particules est proportionnel à la taille granulométrique du mélange à séparer.

Les techniques de séparation actuelle sont incapables de récupérer les feuilles d'aluminium. Fondamentalement, l'enlèvement des feuilles d'aluminium par un système d'aspiration et l'élimination des particules fines peut être d'une grande aide pour améliorer la récupération de l'aluminium et la qualité du produit.

### II.7.4. Influence de la forme de la particule

La forme des particules est une des variables les plus influentes. Les courants induits contrecarré en raison des formes irrégulières des particules ont tendance à minimiser la force de déviation magnétique et sont donc préjudiciables aux déviations des particules.

C'est dans ce contexte là qu'une simulation numérique a été établie pour démontré le taux d'influence de ce facteur sur la séparation. Pour cela trois formes de particules ont été considérées (forme **rectangulaire**, forme **cylindrique** et forme **triangulaire**).

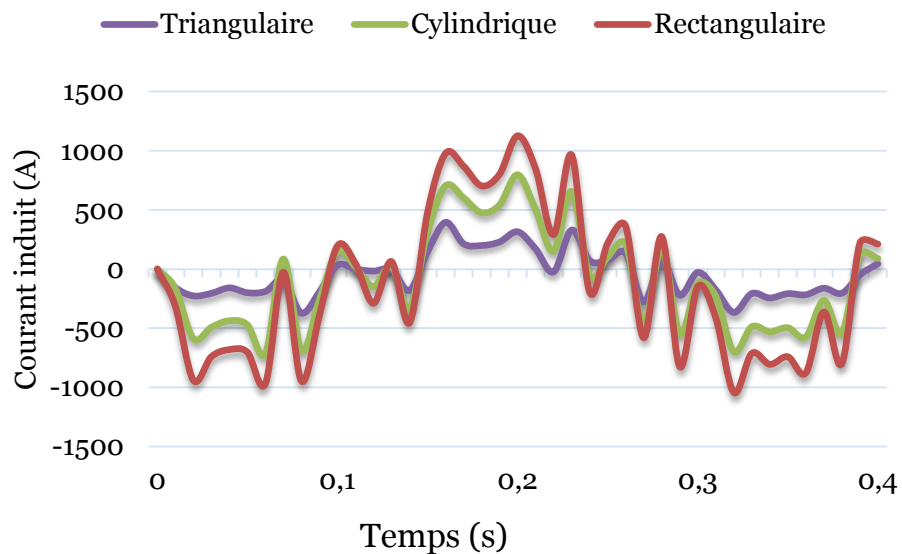


Figure II.30 : Représentation graphique du courant induit (A) pour différentes formes de particules (**rectangulaire**, **cylindrique** et **triangulaire**)

D'après ces résultats de simulation, la variation de l'induction des courants de Foucault dépend de la forme de la particule. Les trajectoires de particules en forme de feuille ou en forme de plaques sont beaucoup plus grands que celles des particules en forme cylindrique, ainsi que ceux qui ont des formes irrégulières [43].

En plus des courants de Foucault contrecarrant dus aux formes irrégulières, ces derniers influent sur la force de répulsion de manière à ce que la proximité et l'orientation des particules vont les faire dévier vers les faible zones du champ magnétique appliqué.

En conséquence, le champ magnétique efficace dans lequel une particule conductrice est immergée peut varier d'une particule à une autre en raison d'une importante variation de la forme des particules.

### II.7.5. Influence de la conductivité

La conductivité électrique a un effet sur la force de déviation agissant sur la particule en influant sur l'amplitude des courants de Foucault induits dans ces particules.

Dans le but de mettre en valeur l'influence de ce paramètre sur le rendement de la séparation, une estimation du courant induit dans les particules pour trois matériaux non ferreux de conductivité différentes (**Cuivre, Aluminium et Zinc**) a été effectuée.

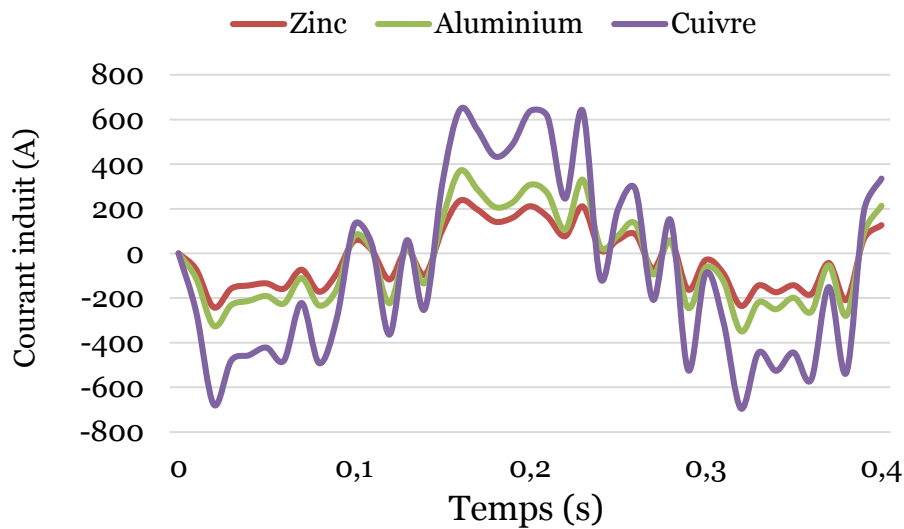


Figure II.30 : Représentation graphique du courant induit (A) dans la particule pour trois matériaux de conductivités différentes (**Cuivre, Aluminium et Zinc**)

La variation de l'intensité du courant induit dans les particules est relativement forte pour les valeurs de la conductivité électrique plus élevée.

Il est clair que les forces de déflexion des particules d'alliage d'aluminium ou du cuivre présentes dans les déchets sont plus petites que celles des particules pures, parce que les particules d'alliage ont des conductivités électriques relativement plus faibles que les particules métalliques pures correspondantes.

D'autre part, le rapport de la conductivité  $\sigma$  électrique à la densité volumique  $\rho$  du matériau détermine la grandeur de la force d'induction ainsi que l'efficacité de la séparation. En effet avec la même taille granulométrique, l'Aluminium est mieux séparé par rapport au cuivre vu que ce dernier est caractérisé par un ratio  $\sigma/\rho$  réduit par rapport au premier.



## II.8.Conclusion

Le calcul numérique nous a permis d'effectuer des simulations numériques des phénomènes physiques à l'aide d'un logiciel de simulation basé sur la méthode des éléments finis. Cette étape est indispensable lorsque l'on cherche à obtenir une solution optimisée pour réduire les coûts et les délais de fabrication. Grâce au calcul, même simplifié, on a pu mettre en évidence l'influence de plusieurs variables qui affectent considérablement l'efficacité de la séparation et l'amélioration de la performance du séparateur à courant de Foucault. Cela évite de multiplier les prototypes et les essais tests réels,

Une simulation numérique approfondie des paramètres a été effectuée dans le but de concevoir un système de séparation par courant de Foucault capable de séparer des particules non ferreuses des déchets domestiques et industriels.

L'efficacité d'une séparation par courant de Foucault dépend de l'amplitude et de la fréquence des courants induits dans les particules. Ce facteur compte parmi les paramètres les plus importants qui influent directement sur la force de répulsion [43].


Parmi les facteurs influents, il y a aussi les propriétés des matériaux à séparer : la densité, la résistivité, la conductivité ainsi que la forme et les dimensions.

Si on considère que les paramètres qui affectent la conception du séparateur sont : la vitesse du tambour, le nombre de pôles, l'intensité du champ magnétique du tambour et l'entrefer d'air entre le tambour à aimants et le matériau à séparer, le tableau suivant résume les valeurs optimales obtenues par simulation.


<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
Nombre de pôles	<b>2p=8</b>
Aimantation rémanente des aimants ( <b>NdFeB</b> )	<b>1.32 T</b>
Entrefer mécanique	<b>15 mm</b>
Disposition des aimants	<b>En surface</b>
Nombre des aimants pôles nord	<b>8</b>
Nombre des aimants pôles sud	<b>8</b>
Épaisseur des aimants	<b>25 mm</b>
Ouverture mécanique des aimants	<b>30°</b>
Pas polaire	<b>45°</b>
Rayon des aimants adjacent à l'entrefer	<b>75 mm</b>
Rayon des aimants adjacent au rotor	<b>50 mm</b>
Longueur axial des aimants	<b>100 mm</b>
Longueur axiale du rotor	<b>220 mm</b>
Diamètre du rotor	<b>150 mm</b>

Le tableau II.5 : résultats de simulation pour la conception du séparateur à courant de Foucault.

Lorsque les paramètres de conception du séparateur à courant de Foucault sont optimisés, les métaux granulaires qui ont un faible rapport  $\sigma/\rho$  peuvent être séparés facilement.



*Chapitre III :*  
*Développement et Conception*  
*d'un procédé de séparation À*  
*Courant de Foucault*



# Chapitre III :

## Développement et Conception d'un procédé de séparation À Courant de Foucault

Ce chapitre concerne la conception d'un procédé permettant le tri des constituants des mélanges de matériaux plastiques, métaux ferreux et métaux non ferreux en utilisant les forces aérodynamiques et un champ magnétique tournant de grande intensité, ainsi que la réalisation d'une installation permettant la matérialisation de ce procédé. Le domaine auquel se rapporte ce dispositif concerne la séparation et la purification des matériaux de différentes tailles allant de quelques centimètres jusqu'à 10 cm, dans plusieurs domaines tels que les déchets d'équipements électriques et électroniques, véhicules hors usage, déchets du bâtiment et travaux publics, mobilier hors d'usage...

Cette technique permet de séparer des mélanges granulaires comprenant des particules isolantes, ferreuses et non ferreuses de tailles différentes, en permettant la réalisation d'une distribution de champ magnétique qui agit de façon sélective sur les particules présentant une aimantation différentielle par rapport au milieu d'existence. Les résultats de l'opération est de collecter les particules non ferreuses d'un type de matériau (Al, Cu, Zn....) dans un compartiment, les particules isolantes (plastique, verres, bois .....) et les particules ferreuses dans un autre compartiment. En outre, la particularité de ce procédé est l'utilisation d'un champ magnétique très intense produit par 16 aimants puissants.

La conception d'un séparateur à courant de Foucault des matériaux ferreux et non ferreux repose sur la connaissance de l'ensemble des phénomènes physiques en présence et de la maîtrise de leur évolution lors de la mise en application de la physique de séparation

Dans ce chapitre, une description évolutive d'un nouveau procédé de séparation des métaux non ferreux par courant de Foucault a été établie, qui n'a vu le jour qu'après une série des bancs expérimentaux. Ceux-ci ont permis d'apporter des améliorations au niveau du tambour à aimants permanent qui demeure l'élément majeur du système.

### III.1. Mécanisme de séparation à courant de Foucault :

les séparateurs à courant de foucault (SCF) sont très utilisés pour la récupération des métaux non ferreux (Cu, Al, Pb, Zn...) des déchets solides [56-65], leurs partie de fonctionnement principale est un à cylindre rotatif, couvert d'aimants monté en surface avec des polarité alterné N-S (Figure I.1) [62-64]. Le champ de fluctuation du tambour rotatif induit des courants de Foucault dans les particules

électriquement conductrices qui se déplacent près du tambour au dessous du tapis roulant. Les particules conductives sont éjectées principalement au moyen de la force magnétique provenant d'une interaction entre le courant induit dans les particules et le champ magnétique appliqué. Par conséquent les trajectoires de ces particules sont différentes des trajectoires des non-conductrices, qui tombent vers le bas près du tambour [65-67].

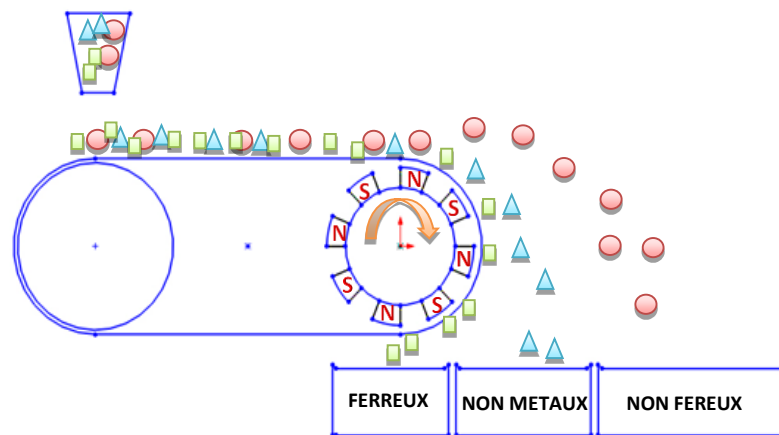


Figure.III.1: Schéma de principe de séparation par courant de Foucault

### III.2. Développement du procédé de séparation par courant de Foucault

Le calcul numérique nous a permis d'effectuer des simulations numériques de phénomènes physiques, qui est une étape indispensable lorsque l'on cherche à obtenir une solution optimisée pour réduire les coûts et les délais de fabrication. Grâce au calcul, même simplifié, on a pu tester plusieurs configurations pour optimiser le comportement d'un modèle.

Notre conception n'a vu le jour qu'après plusieurs bancs expérimentaux qui ont été réalisés au niveau de notre laboratoire IRECOM en collaboration avec le laboratoire APELEC de l'université de Sidi Bel Abbes, afin d'optimiser l'installation et d'aboutir au dimensionnement optimal des paramètres de fonctionnement du séparateur

#### III.2.1. Premier prototype (banc d'essai à l'échelle laboratoire)

Ce banc expérimental à l'échelle laboratoire (figure III.2), nous a permis de mieux maîtriser les phénomènes régissant le système afin de cerner avec plus de précision les paramètres influant la séparation.

La partie fondamentale de ce système est une source de champ magnétique variable à plusieurs encoches porteuses d'aimants de forme rectangulaire en **Alnico**, qui génèrent une intensité d'induction rémanente égale à 0.4 T. Ces derniers sont alignés de manière à former un pôle magnétique de polarité opposée aux encoches adjacentes.

Avec cette manière d'emplacement des aimants, on arrive à créer des pôles alternés, pour ensuite générer une variation du champ magnétique accompagnée d'une grande vitesse de rotation afin d'induire des courants de Foucault importants dans les particules non ferromagnétiques et ainsi mieux les attirer pour obtenir une bonne séparation.

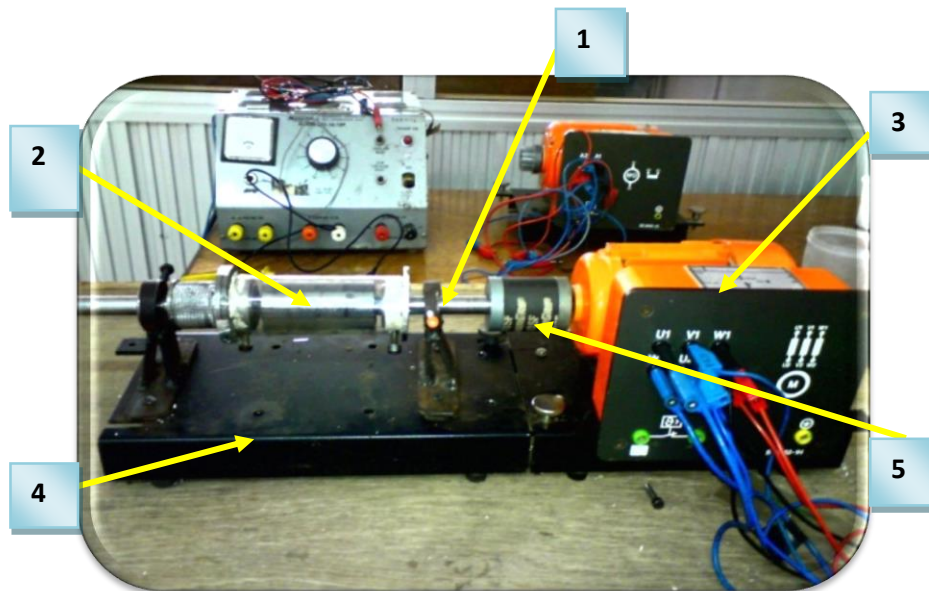


Figure III.2 : Photographie du séparateur à courant de Foucault à l'échelle laboratoire.  
Support de profil (1); tambour à aimants (2); moteur triphasé (3); support de base (4) mandrin de raccordement (4)

Les expériences effectuées sur ce banc expérimental, nous ont permis de tester et de comprendre le phénomène d'induction des courants de Foucault dans les particules conductrices, qui sont à l'origine de la propulsion de ces dernières et ainsi aboutir à une séparation du mélange.

Un échantillon provenant des déchets domestiques et industriels (figure III.3), contenant 25% d'aluminium et 75% de fer a été utilisé. La masse de l'échantillon est de 100g et la taille des particules est comprise entre 2 et 4mm.



Figure III.3 : Echantillon granulométrique de fer et d'aluminium.

La performance du dispositif expérimental est estimée en mesurant la masse du produit récupéré pour un tambour à aimants permanents à deux paires de pôles:

Les résultats expérimentaux sont illustrés par une courbe de variation de la récupération de la masse de fer et d'aluminium en fonction de la vitesse de rotation du tambour (Figure III.4).

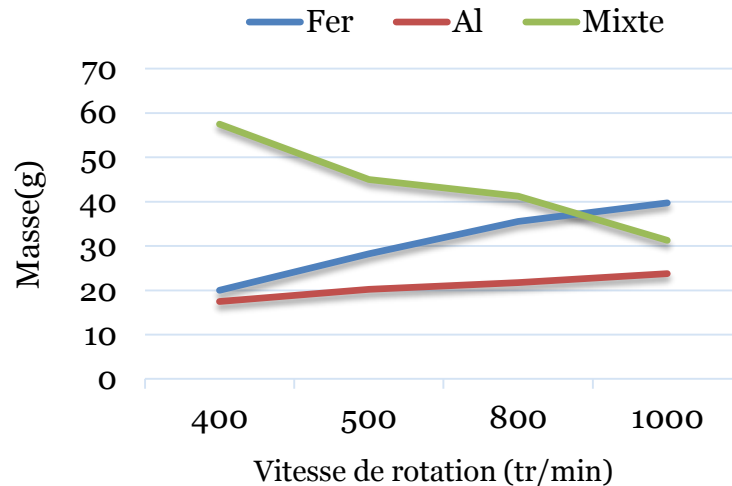


Figure III.4 : Récupération de la masse du mélange en fonction de la vitesse de rotation pour un tambour à 2 paires de pôles.

Une augmentation de la récupération de l'aluminium et la diminution de la masse du mixte est obtenue avec l'augmentation de la vitesse de rotation du tambour. Ceci est dû à l'augmentation de la fréquence du champ magnétique généré par le tambour à aimants permanents qui cause l'augmentation du courant induit.

### III.2.2.Second prototype

Suite aux résultats obtenus à partir de la simulation numérique, on a pu concevoir un autre prototype plus performant. Pour celui-ci, un autre tambour rotatif a été développé avec des dimensions plus importantes, qui comprend 4 paires de pôles magnétiques d'aimants permanents placés sur la périphérie d'une culasse cylindrique. Ces aimants ont une forme de tuile afin d'obtenir une adhésion parfaite avec le cylindre rotatif (Figure III.5). La fabrication de ce type de structure est relativement simple et plus économique.

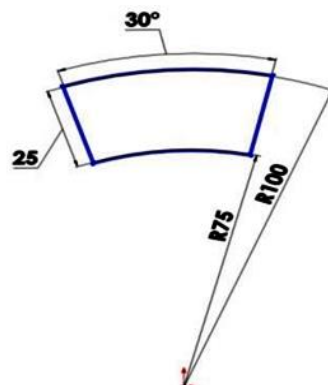


Figure III.5: Dimension de l'aimant permanent adéquat au cylindre rotatif (mm)

Des calculs nécessaires ont été effectués pour déterminer la courbure des aimants en fonction du diamètre du cylindre rotatif sur lequel les aimants sont fixés. La figure III.5 montre les dimensions exactes des aimants et leurs courbures calculées en fonction du diamètre du cylindre égal à 200 mm.

### a) Description du dispositif

Parmi les nombreux concepts de construction pour les séparateurs qui ont été développés dans l'industrie, le tambour rotatif est le type aujourd'hui le plus largement répandu parmi les séparateurs de courant de Foucault. La pièce active de cette machine est un tambour à rotation rapide (1) entraîné par un moteur asynchrone (3) allant jusqu'à 3000 tr/min, avec des rangées comprenant des aimants à polarité alternée. Les produits à séparer sont déposés sur une bande transporteuse (2) placée au-dessus du tambour, les particules conductrices sont éjectées du flux principal pour tomber dans le collecteur (4) ; le tout repose sur un châssis métallique pour assurer la stabilité du système lors de la séparation. La trajectoire de ces particules est généralement déterminée par une combinaison de la force électromotrice, de la pesanteur et des forces du frottement avec la bande transporteuse et l'air (Figure III.6).

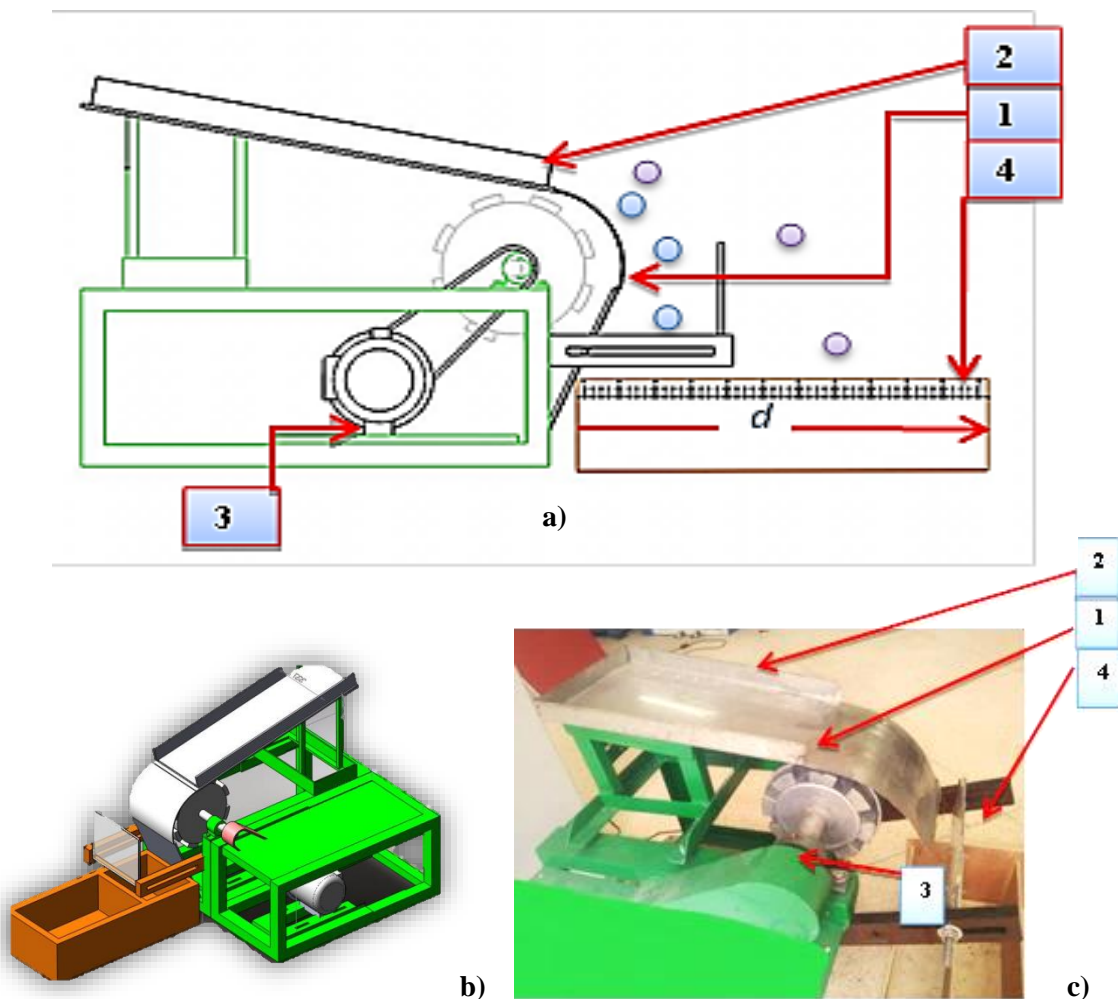


Figure III.6: Le deuxième prototype de Séparateur à courant de Foucault

- a) représentation 2D du séparateur
- b) représentation 3D du séparateur
- c) Photographie du séparateur

Tambour rotatif (1); plaque vibrante (2); moteur (3); Collecteur (4)

Ce montage expérimental a été utilisé pour tester les performances de séparation du nouveau tambour magnétique qui est la partie la plus importante du processus.

Les expériences ont été effectuées avec des objets non ferreux de forme cylindrique, d'une longueur de 10 cm, de diamètre 5 cm et de masse 53 g (un cylindre en aluminium d'une canette de soda).

La performance a été estimée en mesurant la distance de projection (en cm) de l'objet en fonction de la vitesse de rotation du tambour (en tours par minute), pour deux valeurs différentes de l'entrefer (en mm) entre les aimants et la plaque vibrante.

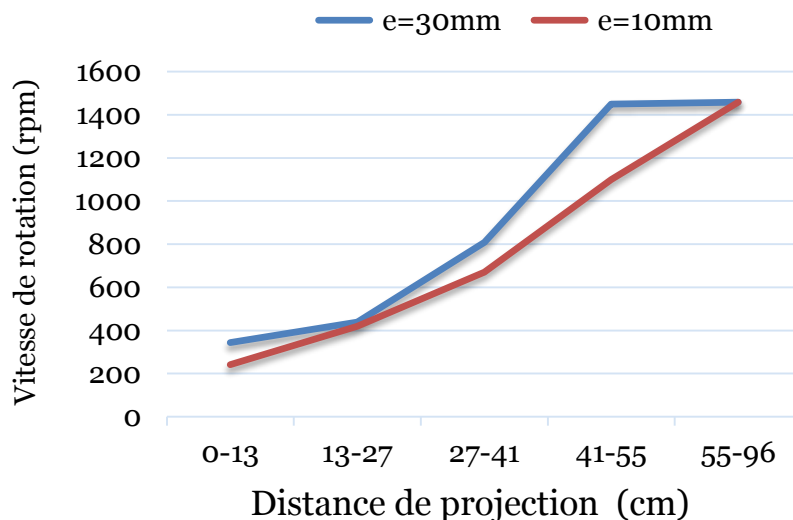


Figure III.7 : Variation de la distance de projection d en fonction de la vitesse de rotation pour deux valeur d'entrefer (e=10 mm, e=30 mm)

Les trajectoires sont principalement déterminées par une combinaison de la force magnétique, la force de gravité, en tenant compte de la force de frottement de déplacement au-dessus de la plaque d'alimentation vibrante.

D'après la figure III.7, la performance de séparation est suffisante pour séparer les objets ferreux, non ferreux et plastiques, et ce à partir d'une vitesse de rotation d'environ 420 tr/min.

Les objets non ferreux sont éjectés avec une distance de 30 cm pour une vitesse de 420 tours par minute, tandis que les objets en plastique tombent verticalement dans le compartiment de gauche du collecteur sous l'action de la gravité. D'un autre côté, les objets ferreux restent « collés » à la plaque vibrante.



### III.2.3. Réalisation d'un séparateur semi-industriel à courant de Foucault

Après la réalisation du nouveau réacteur à aimants permanents, nous avons développé un nouveau prototype, protégé par un brevet de modèle'. Ce dispositif proposé avec notre conception est un séparateur destiné au tri des constituants des mélanges de matériaux plastiques, métaux ferreux et non ferreux.

En outre, il comprend la particularité d'avoir 16 aimants permanents de forte intensité répartis avec une symétrie sur le tambour rotatif. Par ailleurs, il utilise un cylindre en plastique pour l'entraînement du tapis roulant afin d'éviter les courants électriques d'échauffement.

Le même tambour magnétique du modèle précédent (1) a été utilisé et monté dans ce grand prototype de SCF dans lequel le dispositif d'alimentation vibratoire est remplacé par une bande transporteuse (2) (figure III.8).

Ce séparateur permet l'ajustement de plusieurs paramètres afin de procéder à une étude expérimentale afin d'analyser l'influence de chacun d'entre eux sur l'efficacité de séparation (Figure III.9). Les facteurs qui peuvent être ajustés sur le banc expérimental sont:

- ✚ Position du collecteur.
- ✚ Débit du convoyeur.
- ✚ masse du produit utilisé.
- ✚ taille des particules utilisées.
- ✚ Vitesse de rotation du tambour.
- ✚ Réglage de l'entrefer du champ appliqué.

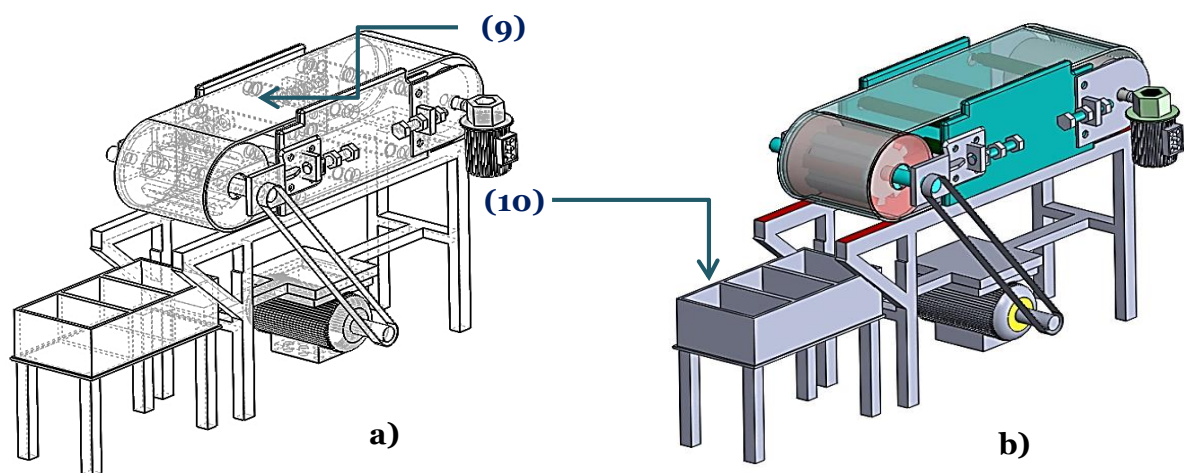


Figure III.8: Schéma descriptif global 3D avec SOLIDWORKS du séparateur à courant de Foucault ( a , b )

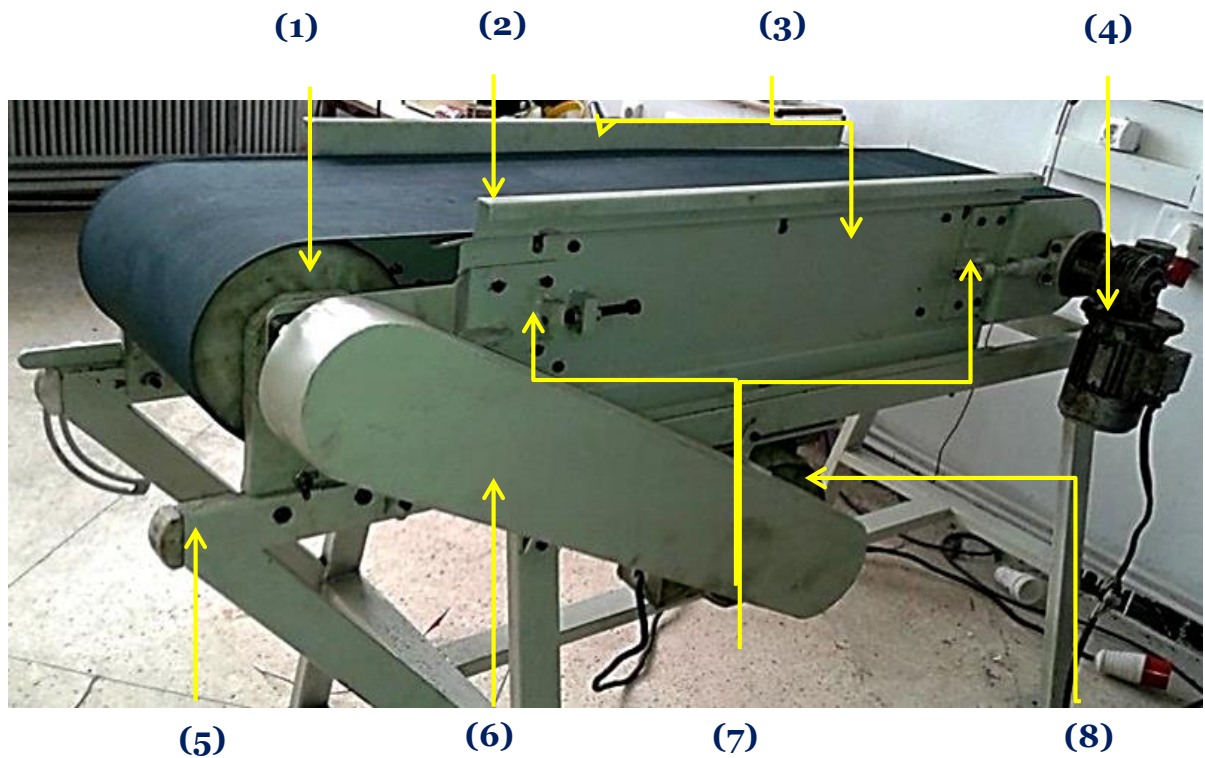


Figure III.9 : Photographie du séparateur semi-industriel à courant de Foucault

- (1) *Tambour à aimant permanent*
- (2) *Tapis roulant antistatique*
- (3) *Plaque de support de profile*
- (4) *Moteur réducteur*
- (5) *Châssis métallique*
- (6) *Courroie*
- (7) *Tendeur mécaniques avant- arrière*
- (8) *Moteur triphasé à grande vitesse*
- (9) *Rouleaux de suspension du tapis*
- (10) *Collecteur*

### III.2.3.1. Description du dispositif

Le séparateur magnétique à tambour rotatif pèse environ 350 kg et de dimensions 180cm\*50cm\*120cm. Il est constitué d'une structure à quatre pivots supportant un panneau électrique triphasé, un tambour rotatif magnétique à huit pôles entraîné par un moteur électrique triphasé à l'aide d'une courroie.

Le dispositif comprend aussi un autre moteur électrique monophasé, type motoréducteur, qui sert à entraîner le tapis convoyeur pour transporter le mélange de particules à séparer. Ces derniers sont propulsés pour être récupérés dans un collecteur situé au bord du séparateur.

Pratiquement la conception de notre système de séparation est basée sur l'optimisation de la configuration suivante :

- Alimentation variable triphasée.
- Un moteur électrique triphasé.
- Un convoyeur transporteur de particule.
- Un moteur réducteur pour l'entraînement du convoyeur.
- Un châssis en acier dur qui porte le système.
- Collecteur réservé aux différents types de particules à récupérer.
- Tambour rotatif à aimants permanents.

### a) Alimentation

La figure III.10 ci-dessous présente le panneau de commande de la source triphasée utilisée, qui est une source de tension variable servant à alimenter les deux moteurs électriques en même temps, et assurer la protection du de tous les risques.

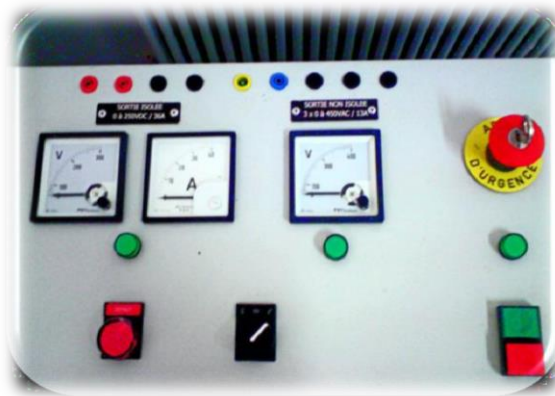


Figure III.10: Photographie d'une alimentation PSY-90K-2.

### b) Moteur d'entraînement

Un moteur triphasé d'une puissance de 5.5 kW est monté sur un châssis utilisé pour l'entraînement du tambour rotatif. La transmission du mouvement mécanique du moteur électrique au réacteur magnétique est effectuée par une courroie trapézoïdale avec deux poulies de modèles : une poulie simple est fixée sur le moteur électrique triphasé et la deuxième est une poulie à roue mobile placée sur le tambour rotatif.

Ce type de montage permet de varier la vitesse du réacteur indépendamment de la vitesse du tapis du convoyeur, celui-ci peut atteindre une vitesse de 3000 tr/min, pour obtenir une grande fréquence d'alternance des pôles magnétiques et ainsi augmenter l'induction de courant de Foucault.

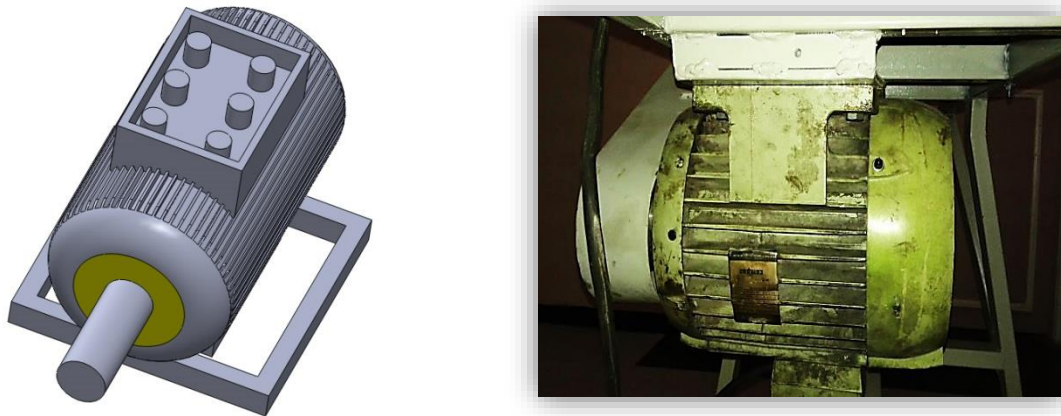


Figure III.11: Photographie d'un moteur triphasé d'entraînement.

### c) Support de base

Le système repose sur un châssis métallique à quatre pivots portant les moteurs d'entrainements et la bande transporteuse. Cette dernière est posée sur des rouleaux de renvoi logés entre les deux brins de la bande, fixés sur les deux extrémités du châssis métallique. Le bâti de la bande est muni de deux tendeurs positionnés aux deux extrémités du châssis permettant d'ajuster le tapis convoyeur lors du fonctionnement. Ce dernier est entraîné par un motoréducteur de petite vitesse placé sur la partie transversale du tapis. Une poutre traversant le châssis latéralement portant au centre un moteur asynchrone triphasé, permet ainsi d'assurer une stabilité du système.

Pour réduire les contraintes mécaniques du châssis lorsqu'il est en vibration sous l'effet de la grande vitesse de rotation du tambour à aimants, nous avons assuré l'équilibre de l'ensemble châssis-rotor-rouleau par un contrepoids.



Figure III.12 : Photographie du support de base.

### a) Convoyeur transporteur (Tapis roulant)

Le convoyeur est un dispositif de transport ou de manutention appelé également convoyeur à bande ou bande transporteuse, permettant le déplacement continu de particules à séparer.

Il est constitué d'une bande sans fin en matériau souple non magnétique d'une épaisseur très faible pour ne pas affecter de manière appréciable les performances du tambour rotatif. A cause de sa faible épaisseur, cette bande s'use et se détériore rapidement et il est nécessaire de la changer fréquemment.

La bande est entraînée et supportée par des poulies fixées sur le support du châssis, elle comporte un brin inférieur et un brin supérieur, qui supporte et entraîne les particules en vue de la séparation.

Le dispositif pour tendre la bande est constitué par deux tendeurs mécaniques fixés en parallèle sur le support de base aptes à exercer sur les deux extrémités du rouleau de renvoi des forces égales, tendant à écarter celui-ci du rotor [86].

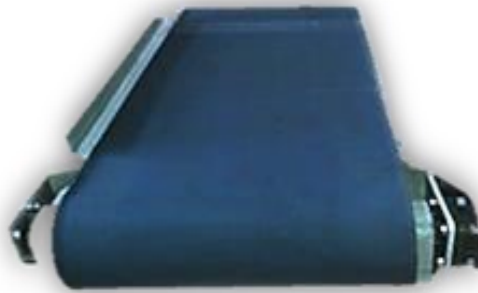


Figure III.13 : Photographie du convoyeur transporteur.

### a) Collecteur de récupération

C'est la dernière étape de la séparation, sa position est en aval du séparateur. Il se compose de compartiments identiques pour analyser les performances de séparation.

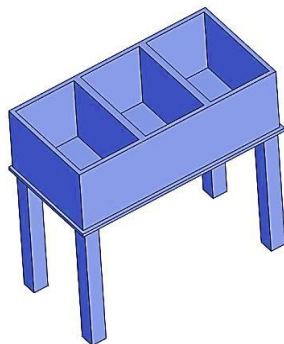


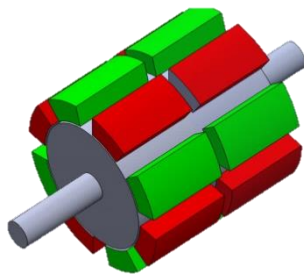
Figure III. 14 : Photographie du collecteur.

### b) Tambour rotatif

Le tambour rotatif est un rotor magnétique multipolaire en acier dur (Figure III.15), qui est entraîné à grande vitesse, de manière à générer un champ magnétique alternatif qui tourne beaucoup plus vite que le tambour de convoyeur. Le mélange est balayé par ce champ magnétique variable qui induit des courants de Foucault dans les particules conductrices du mélange.

Les particules les plus conductrices sont le siège des courants de Foucault plus intenses et font l'objet de l'éjection la plus importante, si bien que leurs trajectoires de sortie sont les plus déviées dans le sens de rotation de tapis. Les particules pas ou peu conductrices chutent de la bande convoyeuse sans s'écarter beaucoup de celle-ci [2].

Le rotor magnétique doit être le plus près de la bande convoyeuse et donc du tambour de tapis, alors qu'il tourne à une vitesse bien plus élevée que ce tambour de tapis.



a)



b)



Figure III. 15 : Photographie tambour à aimants permanents logé dans un cylindre creux.

a) représentation 3D du tambour à aimants permanent

b) photographie du tambour à aimants permanent

### III.2.3.2. Procédure expérimental

Après la réalisation du nouveau séparateur semi-industriel à courant de Foucault, nous avons effectué quelques expériences préliminaires pour évaluer les performances de la séparation.

Dans ce qui suit, la séparation a été évaluée par la variation de la distance de projection (**cm**) des objets en fonction de la vitesse de rotation (**tr/min**).

✚ Un premier échantillon a été utilisé comprenant deux objets homogènes de forme cylindrique en aluminium, provenant des déchets domestiques, décrit comme suit :

- **Objet 1**: une canette de soda de longueur 10 cm, de diamètre 5 cm et de masse 53 g.
- **Objet 2**: une canette de soda de longueur 13 cm, diamètre de 3 cm et de masse 40 g.

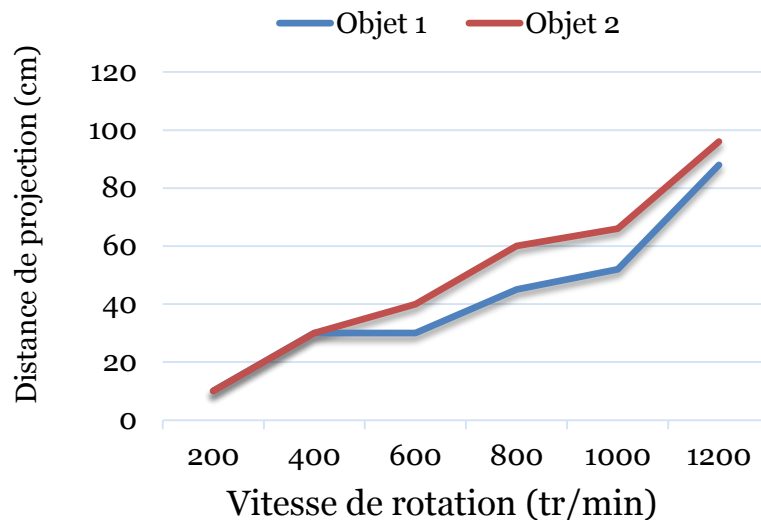


Figure III.16: Variation de la distance de projection d'en fonction de la vitesse de rotation pour cannettes de soda (objet 1 et 2)

✚ Un deuxième échantillon a été utilisé, cette fois-ci avec des morceaux de plaque d'aluminium de formes non homogènes d'épaisseur de l'ordre de 2 mm et de différentes surfaces (4, 8 et 12 cm<sup>2</sup>) comme le montre la figure III. 17 :



Figure III.17: Echantillons non homogènes.

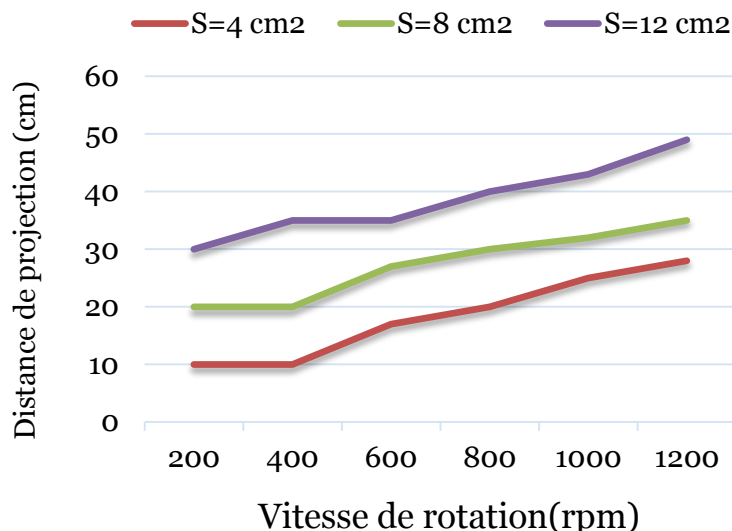


Figure III.18 : La variation de la distance de projection en fonction la vitesse du tambour.

Les résultats obtenus sont illustrés à la figure III.16 pour les boîtes (objets 1 et 2) et dans figure III.18 pour les pièces de plaques d'aluminium.

La performance de séparation pour tous les objets examinés devient élevée à partir d'une vitesse de rotation d'environ 440 tr/mn. D'après la figure III.16, bien que l'objet 1 soit plus lourd et plus grand, la distance  $d$  de projection est plus élevée par rapport à celle de l'objet 2 parce qu'un courant de Foucault plus élevé y est induit.

En outre, la distance  $d$  pour la boîte de soda (objet 1) augmente jusqu'à un mètre pour une vitesse de rotation de 1200 t/mn, ce qui assure une séparation efficace et facile par rapport aux objets en plastique et ferreux. Pour de plus petits objets tels que les pièces de plaques d'Al de dimension moyenne 2 ou 3 cm, la distance de jet atteint jusqu'à 27 cm, ce qui est suffisant pour obtenir une bonne séparation.



### **III.3. Conclusion.**

Notre travail est considéré comme une contribution pratique au design des dispositifs de séparateur à courant de Foucault, qui peut nous conduire à une machine d'usage industriel.

Les perspectives après la réalisation de ce travail sont nombreuses. D'un point de vue technique, les limites d'ordre économique et les difficultés de conception n'ont pas permis de réaliser un dispositif expérimental parfait, mais qui nous permet d'observer le phénomène de séparation avec précision sur tous les échantillons de particule à étudier.

Les expériences réalisées ont permis de vérifier les paramètres influents sur le rendement du séparateur et d'optimiser le fonctionnement du tapis convoyeur en fonction de la nature de la matière.

Du point de vue pratique, on va procéder dans le chapitre qui suit, au développement d'une technique pour améliorer et optimiser le système de séparation à courant de Foucault par la méthode des plans d'expériences.



## *Chapitre IV :*

# *Modélisation et optimisation d'un séparateur à courant de Foucault*



# Chapitre IV :

## Modélisation et optimisation d'un séparateur à courant de Foucault

Dans les procédés de séparation magnétique à courant de Foucault, les phénomènes physiques intervenant sont le phénomène magnétique lié au champ appliqué et au comportement magnétique des particules à séparer. Le phénomène d'induction lié à l'état et au comportement magnétique du matériau traité et le phénomène dynamique lié au mouvement des particules concernées par la séparation.

Le processus de séparation à courant de Foucault visé dans cette étude dépend de plusieurs paramètres, en plus, les valeurs mesurées de la qualité de séparation et des paramètres de l'installation étudiée. Donc nous envisageant une étude de l'influence des paramètres de l'installation par la méthodologie des plans d'expérience qui est tout à fait indiquée pour résoudre ce type de problème.

Afin de réaliser ce but, une stratégie basée sur les quatre étapes a été suivie [85]:

- Choix des facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la séparation,
- Identification de l'intervalle de variation des différents facteurs,
- Détermination du point de fonctionnement optimal,
- Vérification du point de fonctionnement optimal.

### IV.1 Méthodologie des plans d'expériences

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables : les réponses et les facteurs. Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs. Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (**PE**), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences, qui sont toutes : déterminées; obligatoirement réalisables ; indépendantes entre elles.

La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. C'est une méthode qui permet la modélisation ainsi que l'optimisation d'un processus. Le procédé d'un système peut être défini, exprimant les

n variables de sortie  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , comme fonctions des variables d'entrée  $u_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , qui peuvent être contrôlées (figure IV.1).

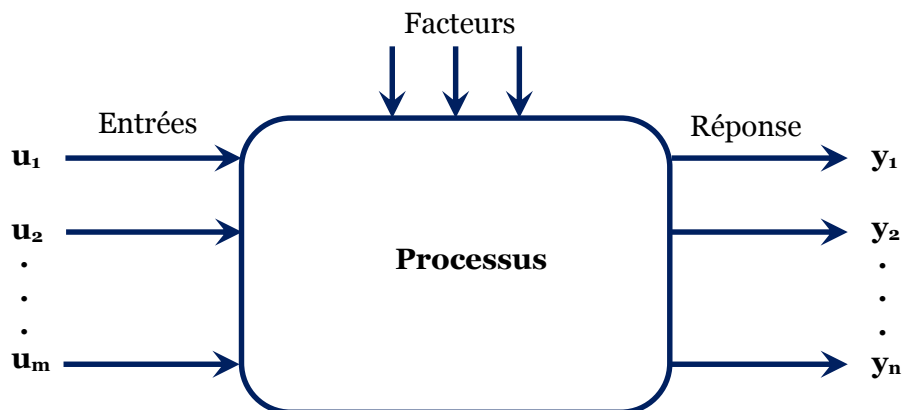


Figure IV.1 : Représentation schématique d'un processus

La fonction de réponse  $y_i$  peut s'exprimer comme suit :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (IV.1)$$

Où  $x_i$  a la valeur -1 pour le niveau inférieur  $u_{imin}$  du facteur et la valeur +1 pour le niveau supérieur du même facteur  $u_{imax}$ .

#### IV.2 Installation d'un procédé de séparation à courant de Foucault

Le principe d'application de cette technologie séparative est basé sur la réalisation d'une distribution de champ magnétique qui agit de façon sélective sur les particules présentant une aimantation différentielle par rapport au milieu d'existence.

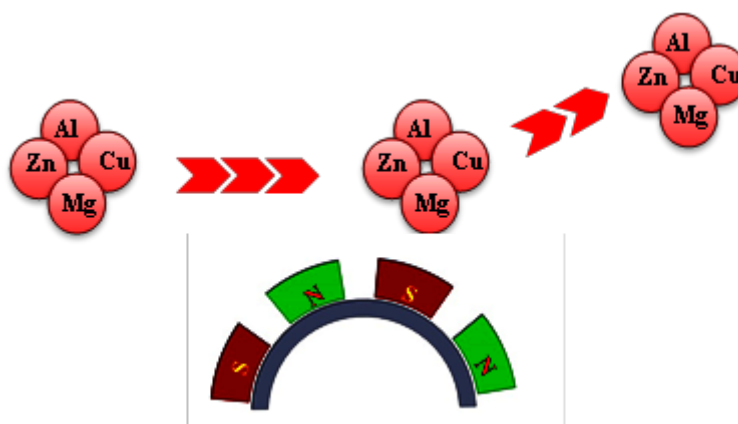


Figure IV.2 : Principe de séparation à courant de Foucault

Un rotor est garni en périphérie d'aimants permanents à haute valeur de champ (néodyme-fer-bore) et à pôles alternés. Chaque aimant développe ainsi un champ magnétique propre. Tout élément métallique situé à proximité, subit du fait de la rotation de cette roue polaire, une variation de flux magnétique. Celle-ci induit

un courant électrique alternatif dans l'élément. Ce courant génère à son tour un champ magnétique s'opposant à chaque instant au champ de la roue polaire. L'objet subit donc une répulsion. Les métaux non-ferreux, par la résultante de cette force et de leur vitesse, sont séparés des non métalliques.

La roue polaire est positionnée à l'intérieur d'un tambour de tête d'un convoyeur à bande plate. Ce tambour est constitué d'une virole en matériau composite, magnétiquement inerte, à haute résistance mécanique et chimique. La vitesse de rotation de la roue polaire est indépendante de la vitesse de tambour.

Les métaux non ferreux sont éjectés selon une trajectoire dépendant de leur nature, de leur forme et de leur taille. Les non métalliques par contre tombent par gravité

### **IV.3 Essais préliminaires pour l'étude de l'influence des variables de contrôle**

Un ensemble de 3 expériences préliminaires a été effectué. Pour chaque expérience, un facteur a été varié tandis que les autres étaient maintenus constants. Le but de ces premières expériences est de déterminer l'intervalle de variation pour chaque facteur, en préparation d'un plan factoriel composite à faces centrées, qui devrait permettre la modélisation et l'optimisation du processus de séparation.

#### **IV.3.1 Influence de la vitesse de rotation du tambour**

Nous avons étudié l'influence de la vitesse de rotation du tambour en la faisant varier de 400 tr/min à 1200 tr/min, pour une vitesse du tapis constant de 40tr/min et pour une taille de produit forme carrée de trois valeurs de côté différentes (**5cm, 8 cm et 10cm**). Les résultats obtenus (moyenne de deux expériences pour chaque essai) sont reportés dans la figure N°IV.3.

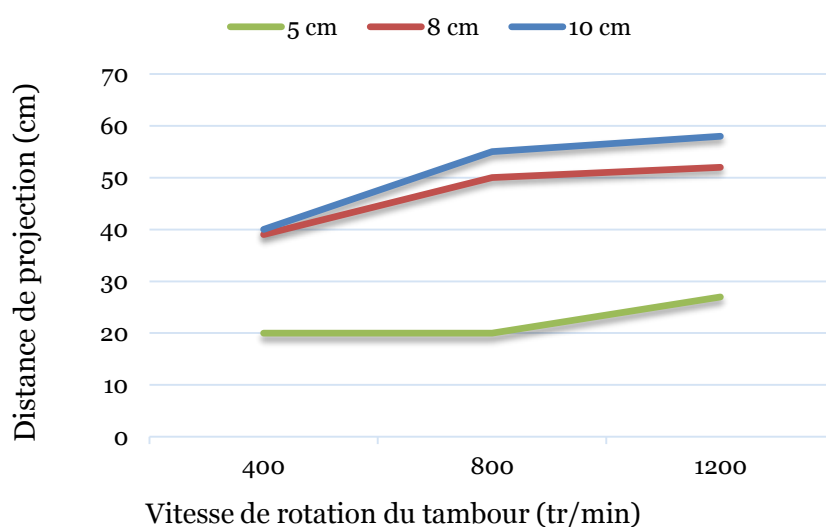


Figure IV.3 : Variation de la distance de projection **d** en fonction de la vitesse de rotation pour différentes taille de pièces conductrices

### IV.3.2 Influence de la taille des pièces conductrices

Pour mettre en évidence l'influence de ce paramètre en le faisant varier de **5cm** jusqu'à **10cm**, pour une vitesse du tapis constant de 40 tr/min et pour un intervalle de vitesse variant entre 400 et 1200 tr/min, nous reportons les résultats obtenus (moyenne de deux expériences pour chaque essai) dans la figure N°IV.4 :

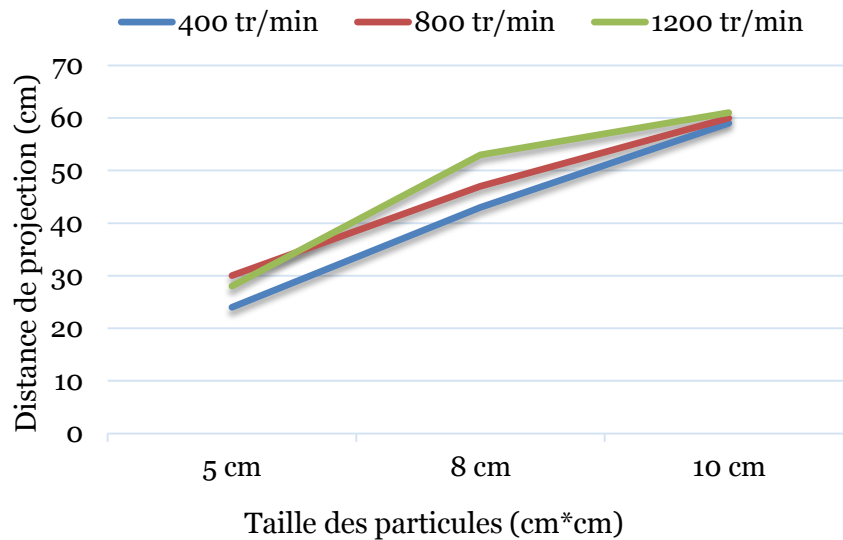


Figure IV.4 : Variation de la distance de projection **d** en fonction de la taille des pièces conductrice pour différentes vitesse de rotation de la roue polaire

### IV.3.3 Influence de vitesse du tapis roulant

Afin d'étudier l'influence de ce paramètre, nous avons pris une seule taille des pièce conductrices de côté 8 cm, avec une vitesse variant entre 400 et 1200 tr/min. En variant la vitesse du tapis roulant entre 10 à 40 tr/min nous avons pu évaluer la distance de projection dans le but de démontrer l'efficacité de séparation. Les résultats obtenus sont reportés dans la figure N°IV.5

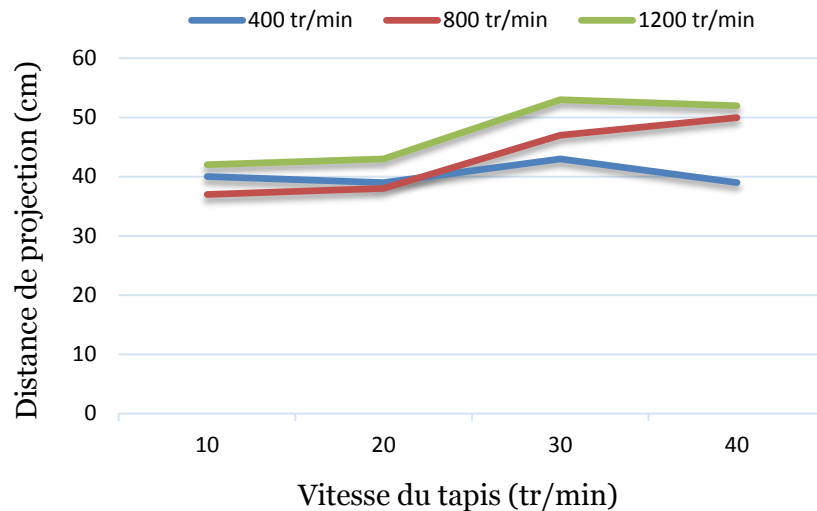


Figure IV.5 : Variation de la distance de projection en fonction de la vitesse du tapis roulant pour différentes vitesses de rotation de la roue polaire

#### IV.4 Modélisation du processus de séparation à courant de Foucault

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivant les réponses obtenues à partir des essais préliminaires (figures IV.3, IV.4 et IV.5). Nous avons fixé une certaine consigne (un choix) valable pour toutes les réponses des trois facteurs étudiés (taille-vitesse du tambour –vitesse du tapis). La distance de projection choisie pour déterminer l'intervalle d'étude serait de l'ordre de plus de 20 cm :

##### IV.4.1 Intervalle d'étude de la vitesse de rotation du tambour

D'après les résultats préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude pour la vitesse de rotation du tambour à aimant comme suit :  $400 \leq n \text{ (tr/min)} \leq 1200$ .

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la vitesse est donnée par :

$$n_c = (n_{\max} + n_{\min}) / 2 \quad (\text{IV.2})$$

D'où :  $n_c = 800 \text{ tr/min}$ .

##### IV.4.2 Intervalle d'étude de la vitesse du tapis roulant

On a choisi l'intervalle d'étude pour la vitesse de transmission du produit comme suit :

$$20 \leq v \text{ (tr/min)} \leq 40$$

La valeur centrale de l'intervalle de la tension est donnée par :

$$v_c = (v_{\max} + v_{\min}) / 2 \quad (\text{IV.3})$$

D'où :  $v_c = 30 \text{ tr/min}$ .

### IV.4.3 Intervalle d'étude de la taille des pièces conductrices

Pour ce paramètre, l'étude a été effectuée sur trois valeurs du côté à des pièces carrées définies comme suit :  $5 \leq a \text{ (cm)} \leq 10$

D'où :  $a_c = 7.5 \text{ cm}$ .

### IV.5 Application de la méthode des plans d'expérience

Le plan composite centré fait partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Leur usage est particulièrement destiné à la modélisation de la surface de réponse expérimentale, c'est-à-dire l'évolution du critère de performance sur un univers de discours des variables bornées. Ce sont les plans les plus utilisés car ils présentent l'avantage de la facilité de construction. Ces plans sont construits en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet [85].

Les plans pour l'étude d'une surface de réponse étant souvent utilisés après une étude des effets des facteurs ; il suffit alors de réaliser seulement quelques expériences supplémentaires pour estimer la surface de réponse du critère étudié.

Un plan composite centré est défini par :

- 1- Un plan factoriel complet de  $2^k$  expériences ;
- 2-  $n_0$  répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique ;
- 3-  $2k$  points en étoile positionnés sur les axes de chaque paramètre. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse.

Donc le nombre total d'essais devront être menés est :

$$N = 2^k + 2.k + n_0 \quad (\text{IV.4})$$

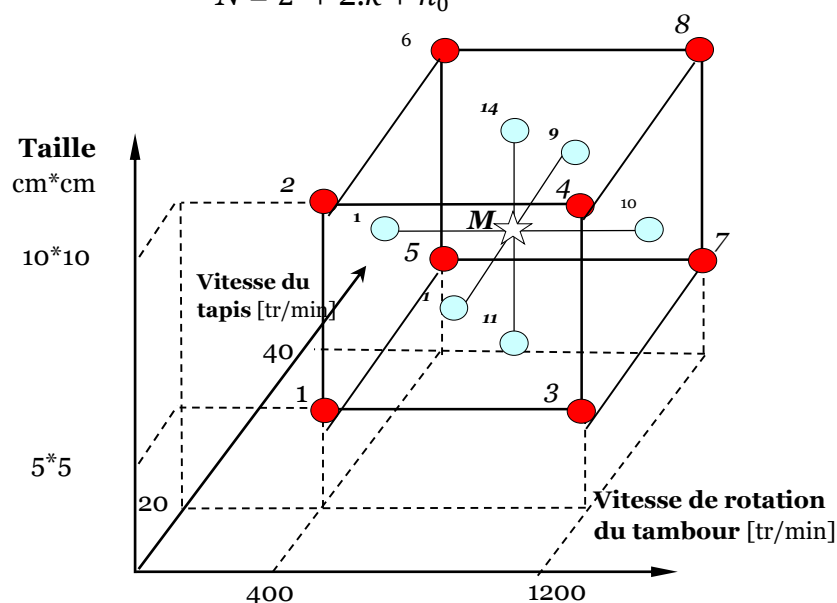


Figure. IV.6 : Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite



Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés au le tableau IV-1. :

Tableau IV-1 : Résultats du plan d'expérience composite

<b>a (cm)</b>	<b>v (tr/min)</b>	<b>n (tr/min)</b>	<b>Distance (cm)</b>
5	20	400	<b>20</b>
10	20	400	<b>55</b>
5	40	400	<b>25</b>
10	40	400	<b>59</b>
5	20	1200	<b>34</b>
10	20	1200	<b>61</b>
5	40	1200	<b>35</b>
10	40	1200	<b>59</b>
5	30	800	<b>29</b>
10	30	800	<b>59</b>
7.5	20	800	<b>51</b>
7.5	40	800	<b>55</b>
7.5	30	400	<b>48</b>
7.5	30	1200	<b>55</b>
7.5	30	800	<b>48</b>
7.5	30	800	<b>51</b>
7.5	30	800	<b>50</b>

**IV.5.1 Calcul des coefficients**

A partir de la matrice d'expériences, il est possible de définir la matrice X permettant de calculer les coefficients du modèle IV-5. Cette matrice est une extension de la matrice d'expérience. Elle regroupe dans chaque colonne les niveaux de chacun des coefficients de l'équation du modèle pour chaque essai.

Ces nouvelles colonnes sont calculées par multiplication des colonnes de la matrice d'expérience.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (\sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j) \tag{IV.5}$$

Il est commode d'écrire ce système sous forme matricielle sans tenir compte des erreurs expérimentales :

$$Y = X \cdot \hat{a} \tag{IV.6}$$

avec :  $\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t Y$

Les éléments du vecteur  $\hat{a}$  vont être estimés en utilisant la méthode du moindre carré. Les résultats de calcul sont récapitulés dans le tableau IV-2 suivant :

Tableau IV-2.: Coefficients des modèles quadratiques des réponses.

Réponse	Variables	Effets	
Distance de projection	Constante	$a_0$	50,944
	$a$	$a_T$	15,000
	$v$	$a_v$	1,200
	$n$	$a_n$	3,700
	$a^*a$	$a_{a^*a}$	-7,901
	$v^*v$	$a_{v^*v}$	1,099
	$n^*n$	$a_{n^*n}$	-0,401
	$a^*v$	$a_{a^*v}$	-0,500
	$a^*n$	$a_{a^*n}$	-2,250
	$v^*n$	$a_{v^*n}$	-1,250

### IV.5.2 Analyse statistique des modèles

L'analyse statistique, dont la mise en œuvre est parfois redoutée par les expérimentateurs, apporte des éléments d'aide à la décision. L'analyse statistique devient donc une étape importante, les tests statistiques portent naturellement sur les résultats obtenus.

#### a- Réalisation du test de signification des effets

On appelle « effets » les coefficients des facteurs et ceux des interactions dans l'écriture du modèle général sur l'équation (IV-5). Les calculs statistiques qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance ou de valider la linéarité du modèle font intervenir d'une part les résidus  $e_i$ , c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle, et d'autre part estimer sans biais de la variance commune des résidus. Cet estimateur est donné par :

$$S^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \tag{IV.7}$$

Où : n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre de coefficients du modèle.

Dans ces conditions, on peut montrer que tous les effets ont la même variance donnée par :

$$S^2_i = \frac{S^2}{n} \tag{IV.8}$$

Cela apporte une grande simplification au niveau des calculs.

Le test utilisé est le test <<  $t$  >> de *Student*. Un effet sera dit significatif (c'est-à-dire que la variable ou l'interaction qui lui est associée a une influence sur la réponse), s'il est, pour un risque donné, significativement différent de 0. On testera donc l'hypothèse:

$$H_0 = \ll a_i = 0 \gg \tag{IV.9}$$

Contre l'hypothèse:

$$H_1 = \ll a_i \neq 0 \gg \tag{IV.10}$$

Pour cela, on calcule

$$t_i = \frac{|a_i|}{s_i} \tag{IV.11}$$

On utilise alors une table dite de *Student* (voir l'annexe 1) à  $v = n - p$  degrés de liberté ( $n$  est le nombre d'expériences réalisées et le nombre d'effets  $y$  compris la constante). On choisit un risque de première espèce  $\alpha$  (le plus souvent 1% ou 5%) et on lit dans cette table la valeur  $t_{crit}(\alpha, v)$ , en utilisant la partie relative à un test bilatéral [87-91].

La règle du test est alors la suivante :

Si  $t_i > t_{crit}(\alpha, v)$  : on rejette  $H_0$  au risque toléré.

Si  $t_i < t_{crit}(\alpha, v)$  on accepte  $H_0$  au risque toléré.

Si l'hypothèse  $H_0$  est acceptée, cela veut dire que l'effet en question n'est pas, au risque  $\alpha$  significativement différent de 0 et donc que la variable qui lui est associée n'a pas d'influence sur la réponse.

La table de *Student* (voir l'annexe) donne pour  $v=7$ ,  $F(crit)=2.365$ , pour un risque de 5%.

Les résultats du test pour les six modèles sont récapitulés dans les tableaux suivant :

Réponses	Variables	Effets	$t_i$	Résultats
Distance de projection	Constante	$a_0$		
	$a$	$a_a$	$t_1=38,870 > 2,365$	<b>Significatif</b>
	$v$	$a_v$	$t_2=3,700 > 2,365$	<b>Significatif</b>
	$n$	$a_n$	$t_3=9,588 > 2,365$	<b>Significatif</b>
	$a*a$	$a_{a*a}$	$t_4=20,475 > 2,365$	<b>significatif</b>
	$v*v$	$a_{v-v}$	$t_5=2,847 > 2,365$	<b>Significatif</b>
	$n*n$	$a_{n-n}$	$t_6=1,040 < 2,365$	Non Significatif
	$a*v$	$a_{a-v}$	$t_7=1,296 < 2,365$	Non Significatif
	$a*n$	$a_{a-n}$	$t_8=5,831 > 2,365$	<b>Significatif</b>
	$v*n$	$a_{v-n}$	$t_9=3,239 > 2,365$	<b>Significatif</b>

Tableau IV-3 : Analyse de chaque effet du modèle pour la distance de projection.

**b- Analyse des variances des modèles [89]**

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test *F* la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (donc au modèle), avec la somme des carrés des résidus.

On précise ces notions en introduisant un vocabulaire spécifique à l'analyse de variance. On notera par la suite  $Y_i$  les réponses observées lors de la réalisation des expériences et  $Y_i^{est}$  la réponse estimée à l'aide du modèle linéaire. On notera, de même,  $Y_{moy}$  la moyenne des réponses. On définit alors trois types de "variations"

**- Variation due à la liaison linéaire :**

$$SCEL = \sum(Y_i^{est} - Y_{moy})^2 \tag{IV.12}$$

SCEL se lit : "somme des carrés des écarts dues à la liaison".

**- Variation résiduelle:**

$$SCER = \sum(Y_i - Y_i^{est})^2 \tag{IV.13}$$

SCER se lit : "somme des carrés des écarts des résidus".

**- Variation totale :**

$$STCE = SCEL + SCER \tag{IV.14}$$

STCE se lit : " somme totale des carrés des écarts".

On définit un "carré moyen" comme étant le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté.

SCEL aura ( $p - 1$ ) degrés de liberté ( $p$  est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle).

SCER aura ( $n - p$ ) degrés de libertés ( $n$  est le nombre d'expériences réalisées).

SCET aura ( $n - 1$ ) degrés de liberté.

En outre, on note CML le carré moyen associé à SCEL, et CMR le carré moyen associé à SCER. Le tableau de l'analyse de variance se présente alors de la façon suivante :

Tableau IV-4 : Tableau de l'analyse de régression

Variation due à	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F
Liaison	SCEL	$p-1$	$\frac{SCEL}{p-1} = CML$	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2}$
Résidus	SCER	$n-p$	$\frac{SCEE}{n-p} = s^2$	
Totale	SCET	$n-1$		

Le test  $F$  permet alors de comparer pour un risque fixé à l'avance le  $F_{obs}$  que l'on a calculé dans le tableau précédent avec un  $F$  (critique) lu dans la table de *Fisher-Snedecor* (voir l'annexe 2) avec  $(p-1)$  et  $(n - p)$  degrés de liberté. Le test est le suivant :

- Hypothèse  $H_0$ : " les deux carrés moyens sont de même grandeur" et donc la régression n'est pas significative.
- Hypothèse  $H_1$  : " le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus" donc la régression est globalement significative.

La règle du test est alors pour un risque  $\alpha$  choisi:

- Si  $F_{obs}$  est inférieur au  $F$  (critique), on accepte l'hypothèse  $H_0$ .
- Si  $F_{obs}$  est supérieur au  $F$  (critique), on accepte l'hypothèse  $H_1$  avec la confiance  $1 - \alpha$ .

Pour l'analyse de la variance des modèles on trouve :

Et pour l'analyse de la variance des modèles on trouve :

*Tableau IV-5 : Analyse de variance pour la distance de projection.*

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
<b>Distance de Projection</b>	Liaison	2693,808	9	299,312	118,231
	Résidus	17,721	7	2,532	
	Totale	2711,529	16		

La table de *Fisher- Snedecor* (voir l'annexe) donne pour  $v_1=9$  et  $v_2=7$ ,  $F(crit) = 3.68$ , pour risque de 5%.

On a dans les trois réponses :  $F_{obs} > (F_{crit} = 3.68)$  donc on accepte l'hypothèse  $H_1$  de linéarité du modèle.

On élimine les effets non significatifs, on obtient ainsi, les modèles mathématiques suivants :

Pour la distance de projection des pièces conductrices :

$$Y_{distance} = 50.94 + 15 * a + 1.2 * v + 3,7 * n - 7,90 * a * a + 1,09v * v - 2,25 * a * n - 1,25 * v * n \tag{IV-15}$$

**IV.5.3 Qualité descriptive du modèle**

Le tableau de l'analyse de régression permet d'établir immédiatement le coefficient de détermination à partir de la relation suivante [89] :

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, les coefficients de détermination appartiennent à l'intervalle suivant :

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \tag{IV-16}$$

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{STCE} \tag{IV-17}$$

Ces coefficients traduisent la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant :

$$0 \leq R^2 \leq 1 \tag{IV-18}$$

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1 \tag{IV-19}$$

Les coefficients trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IV-6 : Résultats des coefficients Q<sup>2</sup> et R<sup>2</sup>

	<b>Distance de projection</b>
<b>Q<sup>2</sup></b>	<b>97,26%</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>99,35%</b>

**IV.6. Influence des facteurs choisis sur les réponses**

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur (x<sub>i</sub>) la distance de répulsion, on représente sa variation pour les trois niveaux du facteur choisi. En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que les facteurs les plus influents sur la distance de projection de l'Aluminium sont respectivement la vitesse de rotation du tambour et taille de la pièce conductrice. (Figure IV-7.),

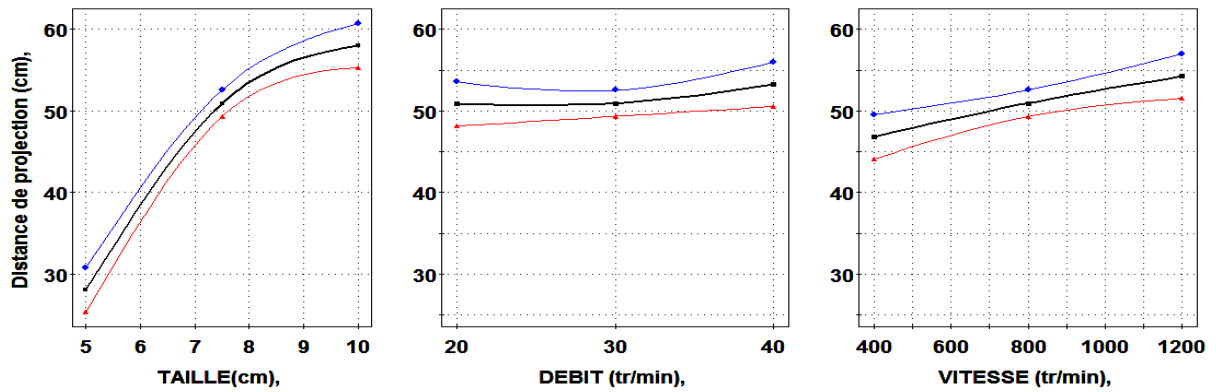


Figure IV-7 : Effets de chaque facteur sur les réponses

En analysant la figure IV .7, on constate que :

- ✓ La distance de projection croit avec l’augmentation de la dimension des pièces conductrices en raison de la grande surface dans laquelle l’intensité du courant devient importante par rapport aux petites surfaces.
- ✓ En augmentant la vitesse de rotation du tambour, la distance de projection croit avec l’accroissement de la vitesse du tapis roulant qui donne aux pièces d’aluminium une vitesse initiale permettant ainsi l’augmentation de la distance de propulsion et l’amélioration de l’efficacité de la séparation

#### IV-7 Détermination du point de fonctionnement optimal

En utilisant la fonction de réponse (IV-15), le logiciel MODDE 5.0 (*MODELing and DESIGN*) est un programme exécutable sous Windows (réalisé par *Umetrics AB, Umea, Suède*) pour la création et l’évaluation statistique des plans d’expériences. Il prédit les réponses prédites en fonction des paramètres : vitesse de rotation du tambour et la vitesse du tapis roulant, comme le montre la figure (V-8) :

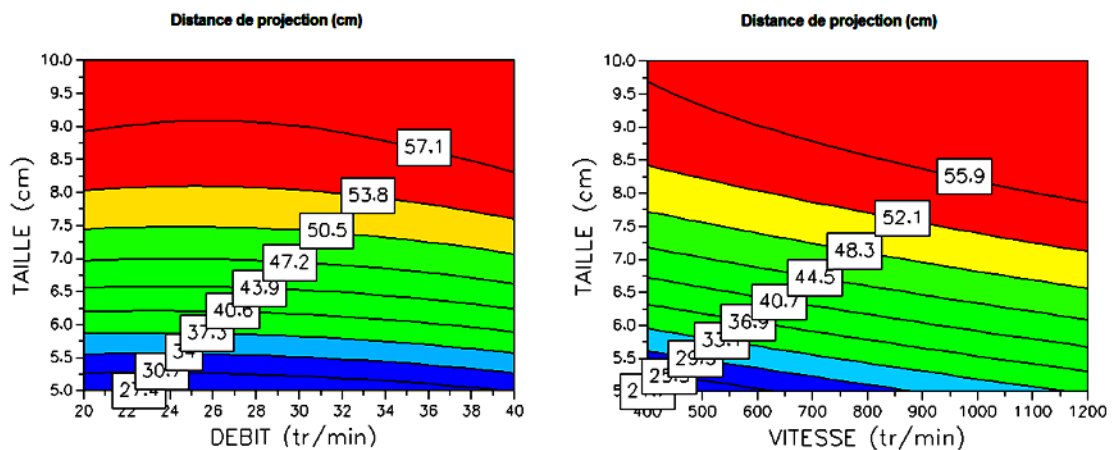


Figure. IV-8. Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des paramètres de vitesse et la vitesse du tapis roulant

Selon le logiciel MODDE 5.0, la meilleure séparation par courant de Foucault correspond à la plus la grande distance de projection qui est égale à 60.9411 cm qui correspond aux valeurs optimales suivantes : une vitesse de  $n = 1199.53 \text{ tr/min}$ , une taille de  $T = 9.63 \text{ cm}$  et vitesse du tapis égal à  $v = 20 \text{ tr/min}$  comme le montre la figure (IV-9) du logiciel MODDE 5.0.

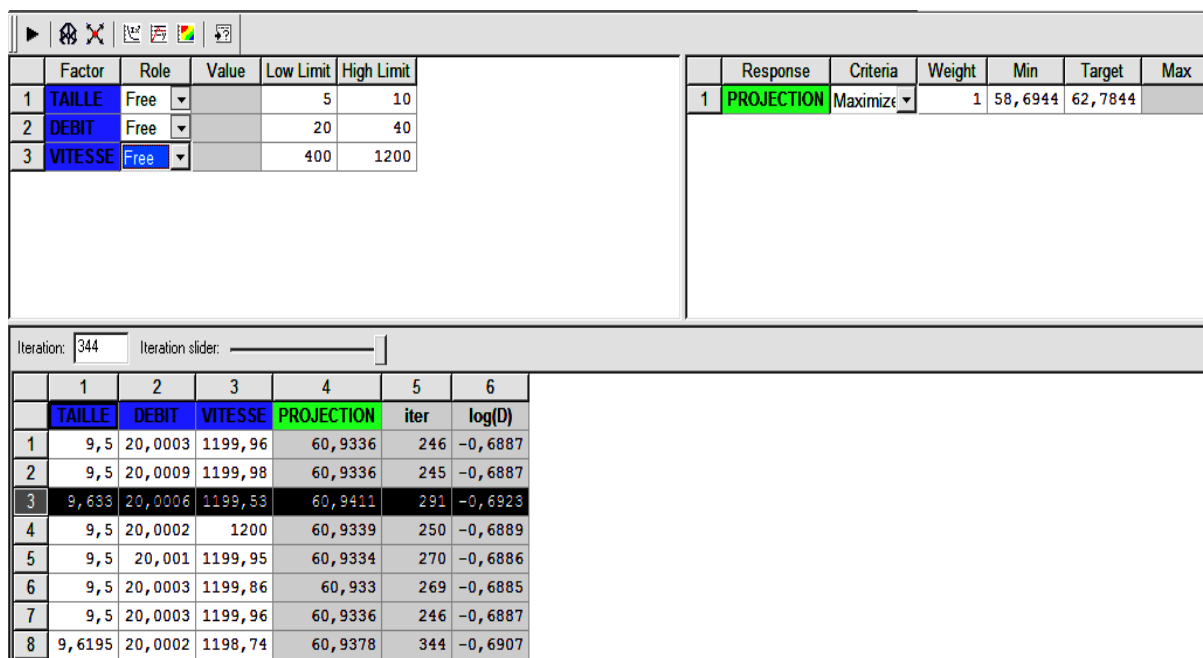


Figure. IV-9 : Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

Les résultats expérimentaux obtenus en utilisant les valeurs données par le logiciel sont comme suit :

Tableau.IV.8 : comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux

	Taille	Vitesse du tapis	Vitesse de rotation	Distance de projection (cm)
<b>Résultats du logiciel</b>	9.63	20	1199.53	<b>60.94</b>
<b>Résultats expérimentaux</b>	10	20	1200	<b>61.00</b>

#### IV-8. Vérification du point de fonctionnement optimal

Dans le but de mettre en valeur l'efficacité du séparateur à courant de Foucault, des expériences ont été effectuées sur un mélange constitué de deux types de matériaux conducteur et isolant, présentant un comportement différent en présence du champ magnétique généré par le tambour à aimants permanents. Le matériau conducteur subit un effet de répulsion vers les zones du champ magnétique faible en raison des courants induits dans le conducteur, donnant naissance à des moments magnétiques propres s'opposant au champ inducteur. D'un autre côté, le matériau isolant suit une trajectoire parabolique sous l'effet que de la gravité.



De ce fait, un collecteur de récupération du produit à séparer a été mis au point d'une longueur de 80 cm, réparti sur 10 compartiments (figureIV.10), et ce dans le but d'estimer la distance de projection du mélange afin d'évaluer l'efficacité de la séparation.

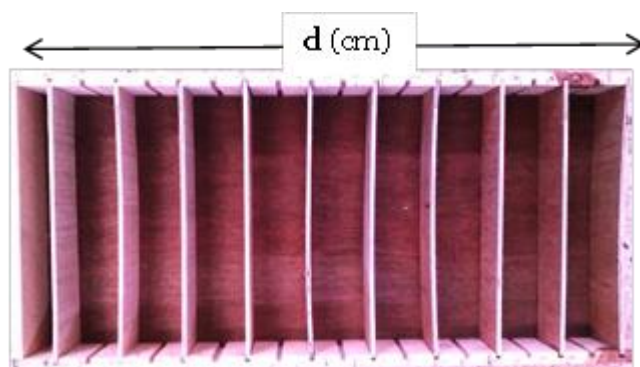


Figure.IV.10 : Photographie du collecteur dédié à la récupération.

Le produit utilisé constitue un ensemble de 12 pièces conductrices et isolantes caractérisant le pourcentage total, avec une forme carré de dimensions 8 x 8 cm et d'une épaisseur de 2mm. Ces derniers sont déposés sur un tapis roulant donnant ainsi une vitesse initiale aux objets variant entre 20 et 40 tr/min.

Le mélange une fois arrivé à la zone active subit un champ magnétique variable avec une fréquence estimée par l'équation suivante ;

$$f = n * p / 60 \quad \text{(IV-20)}$$

Avec

**n** : Vitesse de rotation du tambour à aimants permanents (tr/min)

**p** : Nombre de paires de pôles (2p=8)

**f** : Fréquence du courant de Foucault [Hz]

Le tableau suivant illustre les fréquences du champ magnétique qui ont été générées dans cette partie expérimentale.

Tableau IV-9 : Estimation de la fréquence du champ magnétique variable

Vitesse mécanique (tr/min)	Fréquence du champ tournant [Hz]
400	26.66
800	53.33
1200	80

Le produit récupéré dans chaque compartiment du collecteur a été estimé par le nombre de pièces trouvé dans chaque compartiment. Pour chaque expérience, deux essais ont été effectués dans le but de valider le résultat expérimental.

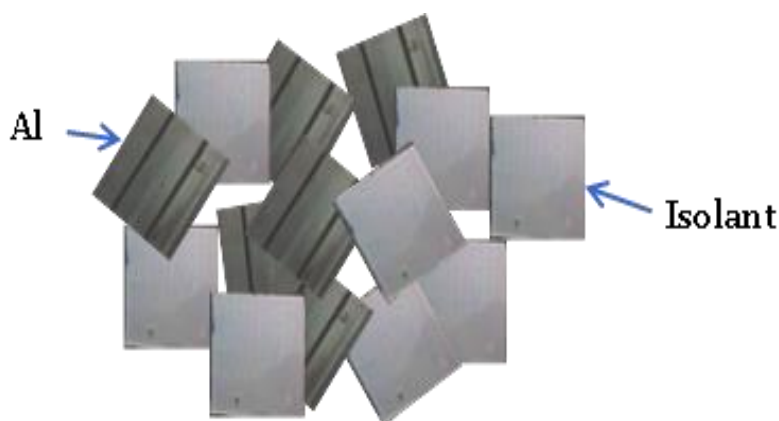


Figure. IV-11 : Aspect de pièces utilisées pour la séparation

L'étude expérimentale a été effectuée en considérant trois facteurs: le pourcentage de la quantité utilisé du mélange Q (%), la vitesse de la bande transporteuse  $v$  (tr/min) et la vitesse de rotation tambour  $n$  (tr/min). les résultats obtenus sont reportés au tableau IV.10.

Tableau IV-10 : Résultats expérimentaux pour la récupération du produit conducteur et isolant

Q %	v(tr/min)	n(tr/min)	Al	Isol	Rec isolant			Rec mixte		Rec Al					
					7	14	21	28	35	42	49	56	63	66	PLUS
75	20	400	9	3		2		1	3	2		2	1		1
75	40	400	9	3		2			1	4	1	2	1		1
75	30	800	9	3	1	1	1	2	1	3	1	1	1		
50	20	800	6	6	1	3	1	1	1	3		2			
75	20	1200	9	3	1	1	1	2	1	2		2	1	1	
75	40	1200	9	3		1	1	2	2	1	1	2		2	1
50	30	1200	6	6	1		5		1	2	2	1			

Il ressort des résultats expérimentaux, qu'on récupère du produit conducteur pur et ceci pour une distance de projection à partir de 35 cm en raison de la forme des surfaces rectangulaire qui facilite la distribution du courant induit, ce qui augmente l'efficacité de séparation. Par ailleurs, le produit isolant n'est soumis qu'à la force de gravité et tombe en chute libre.

D'une autre part, on remarque que les compartiments entre 21 et 35 cm sont occupés par le produit mixte, qui détermine un autre facteur qui influe considérablement sur le rendement de la séparation qui est celui de la distribution du produit sur le tapis roulant.

### **IV.9. Conclusion**

Un nouveau séparateur dit à courant de Foucault a été développé pour la séparation des produits ferreux, non ferreux et plastiques. Ce séparateur peut assurer le triage d'objets d'une taille variant du centimètre à une dizaine de centimètres. L'utilisation d'un grand nombre d'aimants permanents qui produisent une induction magnétique très intense permet d'assurer une séparation efficace, et d'obtenir des produits bien séparés. Le séparateur peut arriver à séparer des produits aussi gros qu'une canette de soda et même de l'ordre de grandeur d'une bouteille d'eau. Les matériaux déposés sur un tapis roulant passent au-dessous d'un réacteur magnétique qui tourne à une grande vitesse de plus de 2000 tr/min [86].

Les performances du séparateur dépendent de plusieurs facteurs : la vitesse de rotation du tambour à aimants permanents, la vitesse du tapis roulant la taille du produit à séparer. Les résultats obtenus sont prometteurs en raison de la distance de projection qui atteint les **60 cm** pour une taille de l'ordre de **10cm**, possible seulement pour une vitesse de **1200 tr/min**, ce qui améliore considérablement la qualité de la séparation.

Les travaux expérimentaux ont pour but de juger la signification de l'influence de certains facteurs sur le résultat de la séparation. Tous les essais ont été effectués h l'aide d'un séparateur à tambour.

On a suivi la distance parcourue par les particules métalliques en fonction des paramètres du champ magnétique et des caractéristiques des particules. Pour restituer l'influence des paramètres sur le critère de la séparation, les méthodes de planning statistique ont été utilisées.



# *Conclusion générale*



## Conclusion générale

La séparation à courant de Foucault est l'une des nombreuses technologies de traitement des déchets domestiques et industriels, qui est largement utilisé pour le tri des mélanges de métaux grâce à des forces de répulsions agissant sur des métaux non ferreux. La séparation par courant induit utilisant un cylindre rotatif en aimant permanents source de champ magnétique variable, est un processus multifactoriel fonctionnant avec de nombreux paramètres (vitesse de rotation du tambour, vitesse de la bande transporteuse, position du collecteur, taille du produit, distribution du mélange sur le tapis roulant ...). Le réglage de chacun d'eux influence de façon plus ou moins grande sur la performance du dispositif.

La séparation par courants de Foucault est une méthode d'enrichissement magnétique basée sur l'utilisation du champ magnétique variable pour séparer les particules des métaux non ferreux

Le champ magnétique variable retient déjà depuis longtemps une grande attention dans le domaine du traitement des matériaux

Toute pièce métallique placée dans un champ variable est le siège d'un champ électrique induit qui fait circuler des courants appelés courants de Foucault. Ces courants sont accompagnés par un champ magnétique induit dont le sens est à l'opposé du sens du champ magnétique extérieur. Une force répulsive est produite sous l'action du champ induit, force qui peut être utilisée pour la séparation. L'application de cette technique permet d'étendre la séparation magnétique non seulement à des matières ferromagnétiques ou paramagnétiques mais aussi à des matériaux qui ne montrent pas des propriétés magnétiques suffisantes pour une séparation magnétique classique.

Les courants de Foucault dans les particules de métaux peuvent être suscités de plusieurs façons.

1. le mouvement de particules dans un champ magnétique stationnaire
2. un champ magnétique en mouvement par rapport à une particule métallique
3. l'action d'un champ magnétique constitué d'impulsions de courte durée
4. la combinaison de méthodes 1) et 2) citées ci-dessus [7].

Le prototype proposé est notre propre conception qui est un séparateur destiné au tri des constituants des mélanges de matériaux plastiques, métaux ferreux et métaux non ferreux en utilisant les forces aérodynamiques et un champ magnétique tournant de grande intensité, ainsi que la réalisation d'une installation permettant la matérialisation de ce procédé. En outre, il comprend la particularité d'avoir 24 aimants permanents de forte intensité répartis avec une symétrie parfaite sur le

tambour rotatif. Par ailleurs, il utilise un cylindre en plastique pour l'entraînement du tapis roulant afin d'éviter les courants électriques d'échauffement [86].

De ce fait, une simulation numérique avec le logiciel élément finie COMSOL MULTIPHYSICS, nous a offert la possibilité d'évaluer tous les paramètres physiques et magnétiques (la vitesse de rotation du tambour, le nombre de pôles, l'intensité du champ magnétique du tambour et la distance d'espace d'air entre le tambour à aimants et le mélange à séparer) permettant ainsi une conception optimisée capable de séparer efficacement le mélange de produits constitué de non métaux, métaux ferreux et métaux non ferreux.

D'une autre part, l'efficacité d'une séparation par courant de Foucault dépend de l'amplitude et de la fréquence des courants induits dans les particules qui compte parmi les variables les plus importants qui influent directement sur la force de répulsion.

Le travail effectué dans cette thèse a été dédié à la conception d'un séparateur semi-industriel à courant de Foucault à tambour magnétique offrant la possibilité de varier tous les facteurs possibles, nous a permis de faire une étude numérique et expérimentale globale pour l'analyse du rôle et de l'influence de chaque paramètre sur l'efficacité du processus.

D'un autre côté, comme la séparation par courant de Foucault est un processus multifactoriel, on a vérifié que l'utilisation de la méthode de plans d'expérience pourrait être très bénéfique. L'étude réalisée avec l'appui du logiciel spécialisé MODDE® 5.0, a montré que cette technique reste un outil puissant et efficace qui permet d'assister l'opérateur pour l'optimisation des paramètres. Le traitement statistique de ce modèle nous a permis d'interpréter les données expérimentales du procédé étudié.

Une démarche précise a été adoptée pour la modélisation du procédé :

- Choix des facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la séparation,
- Identification de l'intervalle de variation des différents facteurs,
- Modélisation du processus de séparation par courant de Foucault des métaux non ferreux,
- Détermination du point de fonctionnement optimal,

Les perspectives de développement sont liées surtout à l'amélioration du dispositif, augmenté sa performance ceci par :

- Etude de la trajectoire des particules
- Optimisation des paramètres de fonctionnement pour atténuer une séparation des tailles millimétriques
- Amélioration de la conception pour une finalité industrielle



*Références*  
*Bibliographiques*



# Références Bibliographiques

- [1] MEHASNI Rabia *Elaboration de modèles de calcul de dispositifs à induction électromagnétique : application a un système de séparation magnétique dans les milieux particuliers*". Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2007.
- [2] G. Gillet, *Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ*, Techniques de l'ingénieur, Génie des procédés, Vol papier n° JB3, J3222, Mars 2004
- [3] R.Gerber, J.Boehm, *Open Gradient Magnetic Separation in Vacuum*", *IEEE Transactions on Magnetics*', Vol. 27, n° 6, pp 5378-5380, November 1991.
- [4] V. Bureau, *Adaptation de la séparation cryogénique aux technologies de l'environnement Application à l'épuration d'effluents liquides*", Thèse de doctorat de l'I.N.P, Lorraine, Nancy, 1993.
- [5] Site Internet : <http://www.ctp.be/html/sepomag/fsepomag.htm>. Janvier 2015
- [6] Guide du traitement des déchets, Damien Alain. 2013
- [7] ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie Direction Industrie aout 2003 rapport final Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri automatique des déchets
- [8] Déchets d'équipements électriques et électroniques : nouveau pas en avant", Claire JANIS, Environnement et Technique, juin 2002, vol 227, pp 31-35.
- [9] High quality plastic materials from electronic wastes by use of combined identification methods and new handling technology (Combident) : Synthesis report for publication", Brite-Euram III, contract n°BRPR-CT98-0778, Dec 2001.
- [10] B. Mesina et al, *Automatic sorting of stainless steels from mixed metal scrap*", Recycling International, Oct 2002, pp 50-53.
- [11] José AMARAL et al, *Is recycling technology innovation a major driver for technology shift in the automotive industry under a EU context?.*, ICTPI 2002, 6th International Conference on Technology Policy and Innovation, paper 1106, 12p.
- [12] *Recycling of Aluminum from obsolete cars -economic, technical and ecological aspects*", Sven Wolf, [http://www.ifa.rwth-lfa/download/VuV/SFB525/V10\\_SFB525.pdf](http://www.ifa.rwth-lfa/download/VuV/SFB525/V10_SFB525.pdf)  
Rapport, revue?
- [13] R.Guillermet et al., *Optimisation du tri automatique des emballages aluminium*, PECHINEY CRV, brochure de notoriété ADEME, Janv 1998.
- [14] Groupe Conseil Paradis, *Equipements de tri et de conditionnement des matériaux recyclables provenant de la collecte sélective des déchets d'emballages ménagers. Catalogue à l'usage des collectivités locales*, ADEME, ECO-EMBALLAGES, Ademe Editions, Mars 1996, p 174.
- [15] L'acier dans les déchets d'emballages ménagers", Cercle National du Recyclage, <http://www.cercle-recyclage.asso.fr/publi/dossiers/materiaux/aciero1.htm>
- [16] Nouredine BEN SEDIRA *Contribution à l'étude du couplage électromagnétique thermique dans une charge à symétrie axiale (étude + simulation)*, Mémoire de magistère, Université de Batna 2013.



- [17] P.Lorrain , D.R.Corson, *Champs et ondes électromagnétiques* , Armand colin, Paris, 1979.
- [18] Marc Jougeut, *Ondes électromagnétiques 2- propagation guidée*, Dunod technique Paris,1973.
- [19] *Les ondes électromagnétiques* ,<http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/blanquet/synophys/33onelm/33one> 21/12/2008.
- [20] <http://www.joel-houzet.fr/cours/chauffageparinduction.pdf>
- [21] OUILI Mehdi, *Modélisation du comportement d'une distribution aléatoire des particules métalliques dans un séparateur magnétique en voie humide*, Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2013.
- [22] CHELGHOUM.L, *Étude de l'hystérésis magnétique par le modèle de Breisach*, Mémoire de magister de l'université de Batna, 2006.
- [23] BUZID. S, *Détection magnétique de matériaux enterrés*, Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne Ardenne, 2009.
- [24] Charles. C, *Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques*, Thèse de doctorat de Laval, Québec, 2007.
- [25] CHEBAK Ahmed, *Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables*". Thèse de doctorat université Constantine, 2010.
- [26] Soltane Belakhal, *Modélisation du comportement d'une distribution aléatoire des particules métalliques dans un séparateur magnétique en voie humide*, Mémoire de magistère, Université de Constantine 2013.
- [27] F. Wang, M. Zong, W. Zheng, E. Guan, *Design features of high speed PM machines, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, pp. 66-70, Nov. 2003.
- [28] Bossavit. A, *Electromagnétisme en vue de la modélisation*, Edition Springer-Verlag, 1993.
- [29] Dular. P, *Modélisation du champ magnétique et des courants induits dans les systèmes tridimensionnels non linéaires*, Thèse de doctorat, Université de Liège, Mai 1994
- [30] N. Bianchi, S. Bolognani, F. Luise, *High speed drive using a slotless PM motor* , *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1083-1090, July 2006.
- [31] M.I. Lamghari-Jamal, J. Fouladgar, E.H. Zaim and D. Trichet, *A magneto-thermal study of a high-speed synchronous reluctance machine*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 4, April 2006.
- [32] B. Davat, *Modélisation des dispositifs électromagnétiques*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 1984.
- [33] J.C. Sabonnadière, J.L Coulomb, *Calcul des Champs Électromagnétiques*, *Technique de l'Ingénieur*, D3020.
- [34] B. Multon , *Application des aimants aux machines électriques*, ENS de Cachan, antenne de Bretagne 2002.
- [35] Chouaib LABIOD, *Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable*, Thèse de magistère, Université de Biskra 2014

- [36] Bessais Lakhdar, *Analyse des structures par la M.E.F basée sur l'approche en déformation*. Thèse de magistère, Université de Biskra 2012.
- [37] Zienkiewicz O.C , Taylor R.L, *The Finite element Method*, Mc Graw Hill, London 1991.
- [38] <http://cfao30.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-501/Notes/tp01-introduction-Comsol.pdf>.
- [39] COMSOL-<https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics>
- [40] Herve Oudin, *Méthode des éléments finis*, Cours, Ecole centrale de Nantes, 2008.
- [41] G. Dhatt , G. Touzot. *Une présentation de la méthode des éléments finis*. Presses de l'Université Laval, Québec, 1981. 18, 27
- [42] DUBAS, F., ESPANET, C., et MIRAOUI, A. *Modélisation analytique et maximisation de l'induction magnétique à vide d'un moteur à aimants montés en surface*, Électrotechnique du Futur, 2003.
- [43] FENERCIOĞLU, Ahmet et BARUTCU, Hamit. *Separation of Granule Non-Ferrous Metals in Shredded Cable Waste with Eddy Current Separator*, Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM 2015), Barcelona, Spain –July 20-21, 2015
- [44] ZHANG, Shunli, FORSSBERG, Eric, ARVIDSON, Bo, *Aluminum recovery from electronic scrap by High-Force® eddy-current separators*, *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, vol. 23, no 4, p. 225-241.
- [45] Brett-Crowther, M., *Climate Change: The Science*, *International Journal of Environmental Studies*, 67, 268–269; 2009.
- [46] Adeyemi, I.G. and Adeyemo, O.K., *Waste management practices at the Bodija abattoir Nigeria*. *International Journal of Environmental Studies*, 64(1), 71–82, 2007,
- [47] Adedibu, A.A., *A comparative analysis of solid waste composition and generation in two cities of Nigeria*. *International Journal of Environmental Studies*, 23(3–4), 269–275, 1984,
- [48] Wilson, D.G., *A brief history of solid-waste management*. *International Journal of Environmental Studies*, 9(2), 123–129, 1976,
- [49] Bendimerad, S., Tilmatine, A., Ziane, M. and Dascalescu, L., *Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator*. *International Journal of Environmental Studies*, 66(5), 529–538, 2009,
- [50] Tilmatine, A. and Dascalescu, L., *Set-point identification of a free-fall triboelectrostatic separation process for plastic particles*. *International Journal of Environmental Studies*, 67(1), 27–40, 2010,
- [51] Yamao, F., Sassa, K., Iwai, K. and Asai, S., *Separation of inclusions in liquid metal using fixed alternating magnetic field*. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan-Tetsu to Hagane*, 83(1), 30–35, 1997,
- [52] Raichenko, A.I. and Kolesnechenko, A.F., *Electromagnetic purification of steel melt with large-scale removing of admixtures*. *Proceedings of the International Congress Paris*, 1, 461–468, 1997.

- [53] Taniguchi, S. and Brimacombe, J.K, *Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel*. The Iron and Steel Institute of Japan, 34(9), 722–731., 1994.
- [54] Gerber, R. and Lawson, P., *Magnetic cage filters*. *Transactions on Magnetics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Vol. 30, Presented at the 6th joint conference on magnetism and magnetic materials, Albuquerque, NM, USA, 4653–4655, 1994 .
- [55] Fletcher, D. and Gerber, R, *The small particle limit for electromagnetic separation*. *Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 30(6), 4656–4658., 1994.
- [56] Schlömann, E., *Separation of nonmagnetic metals from solid waste by permanent magnets*. I. Theory. *Journal of Applied Physics*, 46(11), 5012–5021, 1975.
- [57] Van Der Valk, H.J.L., Braam, B.C. and Dalmijn, W.L, *Eddy-current separation by permanent magnets part I: theory*. *Resources and Conservation*, 12(3–4), 233–252., 1986.
- [58] Settimo, F., Bevilacqua, P. and Rem, P, *Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams*. *Physical Separation in Science and Engineering*, 13(1), 15–23., 2004.
- [59] Braam, B.C., Van Der Valk, H.J.L. and Dalmijn, W.L, *Eddy-current separation by permanent magnets part II: rotating disc separators*. *Resources, Conservation and Recycling*, 1(1), 3–17., 1988.
- [60] Köhnlechner, R., Schlett, Z., Lungu, M. and Caizer, C, *A new wet eddy-current separator*. *Resources, Conservation and Recycling*, 37(1), 55–60., 2002.
- [61] Sun, Y.L., Chen-long, D., Zuo, W.R., Liu, K.L. and Song, S.L, *Separating mechanism and application of eddy current separator*. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2, 40–42., 2007.
- [62] Kercher, S.A. and Webb, M, *Scrap processing by eddy current separation techniques*. *Resources and Conservation*, 8(1), 61–74., 1982.
- [63] Fletcher, D., Gerber, R., Lawson, P. and Boehm, J, *Eddy-current separation of non-ferrous conductors and non-conductors: theory and initial experiments*. *Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 27(6), 5375–5377., 1991.
- [64] Fletcher, D. and Gerber, R, *Electromagnetic separation: the prediction and measurement of conductor separability*. *Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 29 (6), 3255–3257., 1993.
- [65] Schloemann, E. and Reiner, M, *Nonferrous metal separators for small particles*. *Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 15(6), 1535–1537., 1979.
- [66] Brett-Crowther, M, *Climate Change: The Science, Impacts and Solutions* , *International Journal of Environmental Studies*, 67, 268–269; 2010.
- [67] Schloemann, E., Reiner, M. and Pendley, A, *High performance magnetic separator for removal of partially magnetic particles from shredded waste*. *Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 15(6), 1532–1534, 1979.

- [68] Lungu, M. and Rem, P, *Separation of small nonferrous particles using an inclined drum eddy-current separator with permanent magnets*. Transactions on Magnetics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 38(3), 1534–1538., 2002.
- [69] Zhang, S., Rem, P.C. and Forssberg, E, *The investigation of separability of particles smaller than 5mm by eddy current separation technology. Part I: rotating type eddy current separators*. Physical Separation in Science and Engineering, 9(4), 233–251, 1999.
- [70] Roy, S, *Recovery improvement of fine magnetic particles by floc magnetic separation*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 33(3), 170–179., 2012.
- [71] Lungu, M, *Separation of small nonferrous particles using a two successive steps eddy-current separator with permanent magnets*. International Journal of Mineral Processing, 93(2), 172–178, 2009.
- [72] Lungu, M, *Separation of small nonferrous particles using an angular rotary drum eddy-current separator with permanent magnets*. International Journal of Mineral Processing, 78(1), 22–30, 2005.
- [73] Rem, P.C., Zhang, S., Forssberg, E. and de Jong, T.P, *The investigation of separability of particles smaller than 5mm by eddy-current separation technology-part II: novel design concepts*. Physical Separation in Science and Engineering, 10(2), 85–105, 2000.
- [74] Han, G.C., Um, N.I., You, K.S., Cho, H.C. and Ahn, J.W, *Recovery of ferromagnetic material by wet magnetic separation in coal bottom ash*. Geosystem Engineering, 12(1), 9–12, 2009.
- [75] Klima, M.S. and Killmeyer, R.P, *An evaluation of a laboratory wet-drum magnetic separator for micronized-magnetite recovery*. Coal Preparation, 16(3–4), 203–215, 1995.
- [76] Rem, P.C., Beunder, E.M. and Kuilman, W, *Grade and recovery prediction for eddy current separation processes*. Physical Separation in Science and Engineering, 9(2), 83–94, 1998.
- [77] Maraspin, F., Bevilacqua, P. and Rem, P, *Modelling the throw of metals and nonmetals in eddy current separations*. International Journal of Mineral Processing, 73(1), 1–11, 2004.
- [78] Meier-Staude, R. and Mersmann, A, *Analytic modeling of particle trajectories by eddy current separation*. Schüttgut, 3, 307–311, 1997.
- [79] Rem, P.C., Leest, P.A. and van den Akker, A.J, *A model for eddy current separation*. International Journal of Mineral Processing, 49(3–4), 193–200, 1997.
- [80] Rem, P.C., Beunder, E.M. and Van den Akker, A.J, *Simulation of eddy-current separators*. Transactions on Magnetics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States, 34(4), 2280–2286, 1998.
- [81] ] Zhang, S., Forssberg, E., Arvidson, B. and Moss, W, *Separation mechanisms and criteria of a rotating eddy-current separator operation*. Resources, Conservation and Recycling, 25(3–4), 215–232, 1999.
- [82] Zhang, S., Forssberg, E., Arvidson, B. and Moss, W, *An investigation of the parameters of rotating drum type eddy current separators*. Scandinavian Journal of Metallurgy, 27(6), 253–260, 1998.
- [83] K. Medles,; A. Tilmatine; M. Rezouga, M. Ziane, Y. Ramdani, A. Bendaoud, *Experimental Designs Methodology And Its Application To An Electrostatic Separation*, Process.

- Materials Technology, Advanced Performance Materials, Volume 21, Issue 3, pp. 144-147, 2006.
- [84] Medles Karim, *Modélisation expérimentale et optimisation des procédés de séparation électrostatique des matériaux granulaire*; Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel-Abbés, 2006.
- [85] K. Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli, L. Dascalescu, *Identification du point optimal du fonctionnement et évaluation de la robustesse des procédés électrostatiques de séparation*, ACTA electrotechnica, Ac. of Technical Science of Romania. volume 47, Number 1, 2006.
- [86] Merahi, A., Medles, K., Tilmatine, A., *Conception et développement d'un procédé de séparation à courant de Foucault pour matériaux non ferreux*, brevet enregistré à l'Institut national algérien de la propriété industrielle (INAPI), N° 150682, 10 Novembre 2015.
- [87] Merahi Amir, Medles Karim, Bardadi Bendaha Mourad , Tilmatine Amar, *Design and development of a low cost technique, for sorting household wastes using eddy current separation process*, International Journal of Environmental Studies, 2016, vol. 73, n° 2, p. 203-213.
- [88] Merahi Amir, Medles Karim, Tilmatine Amar , ,Dascalescu Lucian, *Mise en œuvre d'un séparateur semi-industriel à courant de Foucault*, Conférence Francophone de l'Eco-conception en Génie Electrique (ConFrEGE 2014) ,26- 28 Mai 2014-, Albi, France

# *Annexe*



## ANNEXE 1

LOI DE STUDENT :  $t(\alpha, v)$ 

v	$\alpha$												
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,298	3,499	5,405
8	0,130	0,262	0,399,3	0,546	0,106	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,335	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
12	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,960	2,358	2,617	3,373
00	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

**ANNEXE 2**Table de Fisher-Snedecor de  $t(v_1, v_2)$ ,  $\alpha=5\%$ 

v2	v1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16
32	4,15	3,29	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,49	2,37	2,29	2,22	2,16	2,11
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93
150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,07	2,00	1,94	1,89



## الملخص

الفصل المغناطيسي هو تكنولوجيا انفصالية ذات مبدأ تطبيقي مؤسس على تحقيق توزيع لمجال مغناطيسي الذي يعمل بصفة انتقائية على الجزيئات التي تقدم جاذبية مختلفة بالنسبة للوسط الموجود .

تصميم لفاصل مغناطيسي بقدرة عالية يركز على معرفة مجموعة الظواهر الفيزيائية المتدخلة و التحكم في تطورها خلال وضع تطبيق فيزياء الفصل. في اساليب الفصل المغناطيسي بالتيار فوكو, الظواهر الفيزيائية المتدخلة هي الظاهرة المغناطيسية المتعلقة بالحقل المطبق و السلوك المغناطيسي للمادة المعالجة, الظاهرة الديناميكية المتصلة بحركة الجزيئات المتعلقة بالفصل .

الهدف من هذا العمل هو دراسة و تصميم لفاصل بتيار فوكو باستعمال الاسطوانة الدوارة ذات مغناطيس دائم.

كلمات البحث : مغناطيس , تيار فوكو , فصل , تخطيط تجريبي.

## Résumé

*La séparation magnétique est une technologie séparative dont le principe d'application est basé sur la réalisation d'une distribution de champ magnétique qui agit de façon sélective sur les particules présentant une aimantation différentielle par rapport au milieu d'existence.*

*La conception d'un séparateur magnétique de haute performance repose sur la connaissance de l'ensemble des phénomènes physiques en présence et de la maîtrise de leur évolution lors de la mise en application de la physique de séparation.*

*Dans les procédés de séparation magnétique à courant de Foucault, les phénomènes physiques intervenant sont le phénomène magnétique lié au champ appliqué et au comportement magnétique des particules à séparer, le phénomène d'induction lié à l'état et au comportement magnétique du matériau traité et le phénomène dynamique lié au mouvement des particules concernées par la séparation.*

*Le but de ce travail est l'étude et la conception d'un séparateur à courant de Foucault par l'utilisation d'un tambour rotatoire à aimant permanent.*

**Mots clés :** Magnétique, courant de Foucault, séparation, plan d'expérience

## Abstract

*Magnetic sorting is a separation technology where the principle of application is based on the realization of a magnetic field distribution which acts in a selective way on the particles having a differential behavior relative to the nature of the medium.*

*The design of a high performance magnetic separator is based on knowledge of assemblage between all physical phenomena which are present and the control of their evolution in the implementation for separation phenomena.*

*In magnetic separation methods with the Foucault (Eddy) currents phenomenon, the involved physical phenomena are magnetic and related to the applied field and the magnetic behavior of the particles to be separated, the induction phenomenon linked to the state and the magnetic behavior of the materials to be treated and the dynamic phenomenon related to the movement of the particles involved in the separation.*

*The purpose of this work is the study and design of a separator by using Foucault currents method having a rotary drum made from a permanent magnet.*

**Keywords:** Magnetic, Foucault currents, separation, DoE (design of experiments)