

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 :

AYAD Ahmed Nour El Islam

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences
Spécialité : Electrotechnique
Option : Compatibilité électromagnétique

Intitulé de la thèse :

**Etude et Réalisation d'un
séparateur à induction
électromagnétique**

Présentée devant le jury composé de :

Mr Semmah Abdelhafid	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbes) Président
Mr Ayad Abdelghani	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbes) Encadrant
Mr Miloua Farid	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbes) Examineur
Mr Bensaid Samir	MCA	(U.Bouira) Examineur
Mr Rizouga Mohamed	Pr	(U.USTOran) Examineur
Mr Zemat Mohammed El Mouloud	MCA	(U.USTOran) Examineur
Mr. Ramdani Youcef	Pr	(U.D.L. Sidi Bel-Abbès) Invité

Soutenu le : 14/ 05 /2017

REMERCIEMENTS

Remerciements et louanges à Dieu, de m'avoir donné la foi et la force pour accomplir ce modeste travail. Prière et salut sur notre prophète Mohammed et sur sa famille et ses compagnons.

Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon directeur de thèse Monsieur Ayad Abdelghani Maître de Conférences à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il m'a toujours manifestée. Et Mr Ramdani Youcef professeur à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, comme mon premier directeur de thèse et autant qu'invité dans le jury de ma thèse.

Vous m'avez toujours réservé le meilleur accueil malgré vos obligations professionnelles Vos encouragements inlassables votre amabilité vos gentillesse méritent toute admiration. Je saisis cette occasion pour vous exprimer ma profonde gratitude tout en vous témoigne mon respect.

Je remercie monsieur **Semmah Abdelhafid** à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel-Abbes, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

J'adresse , aussi mes remerciements aux membres du Jury qui ont accepté d'examiner cette thèse en lui apportant de l'intérêt : **Mr Miloua Farid** Maître de Conférences à l'Université Djillali Liabes Sidi Bel-Abbes, et **Mr Bensaid Samir** Maître de Conférences à l'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira , et **Mr Rizouga Mohamed** professeur à l'Université des Sciences et de Technologie d'Oran,et **Mr Zelmat Mohammed El Mouloud** Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de Technologie d'Oran.

Je veux aussi exprimer ma vive reconnaissance envers tous les enseignants de l'électrotechnique de l'U.D.L de Sidi Bel Abbes, surtout à la mémoire du défunt DEY ZOUAOUI priant Dieu tout-puissant de lui prêter réconfort et d'accueillir le regretter en son vaste paradis".

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon père

A ma mère

Mes sœurs '

A mon frère '

Ma femme

Mon fils mehdi

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	I
LISTE DES TABLEAUX	IV
NOMENCLATEUR	V

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------	---

CHAPITRE -I- SEPARATION MAGNETIQUE

I.1 Introduction	3
I.2 Valorisation des matériaux	3
A-Métaux ferreux	3
B-Métaux non ferreux	3
C- Matériaux Isolant	3
I.3 Séparation magnétique	4
I.3.1 Historique	4
I.3.2 Collecte et démantèlement des objets en fin de vie	4
I.3.3 Déchiqueteuses	4
I.3.4 Séparateur magnétique	5
- définition	6
- principe de base	6
I.3.5 Application de la séparation magnétique	6
-Mines	6
-Dépollution industriel et environnemental	6
-Chimies et biologiques	7
a) Médicale	7
b) Biochimie	7
I .4. Classification des séparateurs magnétiques	7
I.4.1 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)	7
I.4. 1.1 Séparateurs en voie sèche	8
I.4. 1.2 Séparateurs en voie humide	8
I.4.2 Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI).	9
I.4.3 Séparateur magnétique à haut gradient et/ou haut champ (SMHG).	10
I .5 Aimants permanents:	10
I .5. 1 Les différentes familles des aimants permanents:	10
1-Aimants en Alinco	11
2-Aimants en Ferrite	11
3-Aimants Terre-Rares	11
I .5.2 Applications des aimants permanents	12
1-Machines synchrones à aimants permanents	12
2-Moteurs à courant continu	12
3-Haut-parleurs	13
I.6 Techniques existantes de triage des métaux non ferreux	13

A-Séparation magnétique	13
B-Séparation dans un courant gazeux	14
C-Séparation par courants de Foucault	14
D-Séparation par suspensions denses	15
E-Triage selon la couleur	16
F-Spectroscopie par claquage laser (SCL)	16
I.7 Différents types de séparateur à courant de Foucault	16
A- Moteur à induction linéaire	18
A- 1 Horizontal (LIM)	18
A- 2 Verticale (LIM)	18
B- Système à double aimant	18
C- Séparateur statique	19
C-1 Séparateur à Table incliné	19
C-2 Séparateur vertical à courants de Foucault	19
D- Séparation à Tambour à courant de Foucault	20
D-1 Tambour horizontale (HDECS)	20
D-2 Tambour Vertical	21
D-3 Tambour incliné	22
E- Séparateurs à disque tournant	22
F- Séparateur à courant de Foucault à haute fréquence	23
- Ferrite Toroidal	23
- Courant pulsée	23
I.8 Conclusion	24

CHAPITRE -II-

Formulation Mathématique Des Phénomènes Electromagnétiques

II.1 Introduction	25
II.2 Théorie du champ	25
II.2.1. Equations de Maxwell	25
a-Propriétés magnétiques	26
b-Caractéristiques diélectrique	26
c- Relations de continuité entre deux milieux différents	27
d- Conditions de passage	27
II.3 Modèles électromagnétiques	28
II.3.1 Modèle Electrostatique :	28
II.3.2 Modèle Electrocinétique	29
II.3.3 Modèle magnétostatique.	29
II.3.3.1 Modèle magnétostatique scalaire	30
II.3.3.2 Modèle magnétostatique vectorielle	30
II.3.3.3 Formulation en termes de potentiel vecteur	30
II.3.3.4 Equation magnétostatique bidimensionnelle	30
II.3.4 Modèle magnétodynamique	31
II.3.4.1 Formulation de L'équation Magnétodynamique	32
II.4 Conditions aux limites	32
II.5 Les techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles	33
II.5.1 Méthode des Différences Finis (MDF)	33

II.5.2 Méthode des intégrales de frontières (MIF)	34
II.5.3 Méthode des Volumes Finis (MVF)	34
II.5.4 Méthode des Eléments Finis (MEF)	35
a- Fonction d'approximation	37
b- Formulation Intégrale	38
II.6 Simulation dans le logiciel COMSOL	39
II.6.1 Dimension de la géométrie	39
II.6.2 Le processus de simulation sous COMSOL	40
II.6.3 Structure du programme	41
II.7 Calcul des forces électromagnétiques	43
- le tenseur de Maxwell	44
II.8 Conclusion	44

CHAPITRE -III-

Séparateur statique des particules ferreuses

III.1 Introduction	45
III.2 Présentation et définition du Modèle à étudier en 2D	45
III.3 Le processus de simulation par le logiciel COMSOL	46
III.4 Résultats de simulation	47
III.4-1 dimensionnement du modèle à étudier en 2D	48
III.4-2 Maillage du domaine d'étude	48
III.4-3 Simulation des caractéristiques magnétiques du séparateur statique	49
III.4-4 Séparateur à un seul noyau ferromagnétique	50
a-Présence des particules de petite taille	50
b-Présence des particules de grande taille	51
III.4-5 Séparateur à double noyau ferromagnétique	51
a-Présence des particules dans le séparateur a double noyau	53
b- Variation de l'intensité d'excitation du bobinage	54
c- Calcul de la force magnétique d'attraction	54
d- Variation de l'entrefer	55
III.5 Réalisation du séparateur statique à induction magnétique	57
III.5-1 Etude expérimentale du séparateur statique	57
III.5-1-1. Description du dispositif électromagnétique	57
a-Principe du séparateur statique	57
b-Réalisation du circuit d'alimentation de dispositif magnétique	58
c- Préparation des échantillons	59
III.5-2 Tests de séparation avec un électroaimant	60
III.5-2-1 particule en poudre	60
III.5-2-2 Particules de grande taille	61
III.5-3 Séparation avec un entrefer	62
III.5-3-1 Entrefer de 2 cm	63
a-Mélange en poudre	63
b-Mélange de boulons	63
III.5-3-2. Entrefer de 5 cm	65
III.5-4 Comparaisons des résultats de séparation	67
III.6 Conclusion	69

CHAPITRE -IV-

Séparateur à courant de Foucault

IV.1 Introduction	70
IV.2 Présentation du séparateur à courant de Foucault	70
IV.3 Caractéristiques magnétiques d'un séparateur à courant de Foucault	70
A- Propriétés magnétiques autour du dispositif	70
B-Formule de la force magnétique répulsive exercée sur une particule non ferreuse	72
C- Trajectoire de la particule	73
IV.4 Simulation du séparateur magnétique	74
1. Maillage	74
2. Simulation du séparateur en régime statique	75
3. Variation de l'induction magnétique et l'entrefer	76
4. Simulation du séparateur en régime rotationnel	77
IV.5 Présence des particules proche du séparateur	80
1. Vecteur Potentiel Magnétique	80
2. Densité de courant induit	81
3. Calcul des champs et forces magnétiques autour des trois particules	82
4. Calcul de la force magnétique exercée sur une particule non ferreuse	83
IV.6 Séparation entre des particules non ferreuses d'aluminium et de cuivre	85
IV.7 Séparation d'un mélange d'or et de sable	88
1. Variation du champ magnétique alternatif	88
2. Courants de Foucault induit dans les particules	89
3. Variation de la densité de flux rémanent et le calcul de la force magnétique	89
4. Distance de répulsion des particules d'or	91
5. Variation de l'entrefer du séparateur	91
6. Calcul de la distance d'éjection en fonction de l'entrefer	93
IV.8 Conclusion	94

CHAPITRE –V-

Etude et réalisation d'un séparateur magnétique rotationnel

V.1 Introduction	95
V.2 Présentation du tambour magnétique rotatif du séparateur	95
a-Aimants permanents	95
b-Séparateur rotationnel	96
V.3 Résultats de simulation	97
A- Aimant permanent en 2D	97
B-Simulation du tambour rotatif a aimant permanent	98
	99

C-Courbes des caractéristiques magnétiques du séparateur	100
D-Influence de la variation d'entrefer	103
E-Présence des particules ferreuses autour du séparateur rotationnel	103
E-1 Petite taille	103
E-2 Grande taille	
V.4 Calcul de la force magnétique du séparateur	104
V.4.1 Forces présentes dans le séparateur magnétique	104
- Force magnétique	104
- Forces mécaniques	104
V.4.2 Calcul des Forces magnétique exercées sur les particules ferreuses	105
V.5 Réalisation d'un séparateur à tambour magnétique rotationnel	108
V.5.1 Description technique du banc d'essai	108
- Préparation des échantillons	109
V.5.2 Etude expérimentale de la séparation	110
a-Mécanisme de la séparation	110
V.5.3 Résultats expérimentaux	111
a- Séparation des particules de petite taille	111
b- Séparation des particules de grande taille	113
V.6 Conclusion	116
 Conclusion Générale	 117
 Bibliographie	 119
Annexe A	124
Annexe B	127

Liste des Figures

Figure I.1- Illustration d'une déchiqueteuse à marteaux ou à fléaux	5
Figure I.2 Chaîne de séparation magnétique	5
Figure I-3 Séparateur magnétique.	6
Figure I.4 Aimant permanent	7
Figure I.5 séparateurs magnétiques à aimant permanent	8
Figure I.6 Séparateurs en voie humide	9
Figure I-7 Principe de la séparation magnétique SMHI des particules dia et paramagnétiques.	9
Figure I-8 Séparateur supraconducteur à haut gradient à tambour Descos	10
Figure I.9 Courbe B (H) des différents types des aimants permanents	11
Figure I.10 Les aimants permanents	11
Figure I.11 Moteur à aimants en géométries cylindriques	12
Figure I.12 Moteurs à courant continu avec un Stator à aimants	13
Figure I.13 haut-parleur	13
Figure I.14 Séparateur magnétique	14
Figure I.15 Séparation des différentes particules avec un séparateur à courants de Foucault	15
Figure I.16 Spectroscopie par claquage laser pour le triage des alliages d'aluminium	16
Figure I.17 La liaison entre la force de courant de Foucault et la dimension des particulaires	17
Figure I.18 Séparateur à moteur à induction linéaire	18
Figure I.19 System à aimant permanent statique	19
Figure I.20 Séparateur statique à courant de Foucault vertical.	20
Figure I.21 Séparateur à courant de Foucault de tambour horizontal	21
Figure I.22 Séparateur à tambour vertical de courant de Foucault.	22
Figure I.23 séparateurs à courant de Foucault a disque tournant.	22
Figure I.24 Séparateur à courant de Foucault à haute fréquence.	23
Figure II.1 Interface entre deux milieux différents	27
Figure II.2 Maillage type différences finies	33
Figure II.3 Méthode des Volumes Finis	35
Figure II.4 Discrétisation du domaine d'étude (maillage)	37
Figure II.5 système de séparation dessiné dans le COMSOL.	40
Figure II.6 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics	41
Figure II.7 Différents blocs du programme	41
Figure II.8 Organigramme de la résolution numérique.	43
Figure III.1 Géométrie du dispositif en 2D	46
Figure III.2 système de séparation dessiné dans le COMSOL.	46
Figure III.3 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics	47
Figure III.4 Géométrie et paramètres dimensionnels du séparateur à statique.	48
Figure III.5 présentation du modèle dans le COMSOL	49
Figure III.6 Caractéristiques magnétiques du séparateur statique en 2D	49
Figure III.7 Séparateur à un seul noyau ferromagnétique avec particules fines	50
Figure III.8 Séparateur à un seul noyau avec particules de grande taille	51
Figure III.9 Séparateur à double noyau ferromagnétique avec entrefer	52
Figure III.10 Séparateur à double noyau ferromagnétique avec des particules	53

Figure III.11	Influence du courant d'excitation sur l'induction magnétique	54
Figure III.12	Calcul de la force d'attraction en fonction de la distance y	55
Figure III.13	L'induction magnétique en fonction de la distance d'entrefer	56
Figure III.14	Photographie de bobines et le noyau	57
Figure III.15	Modèle de séparation avec induction électromagnétique	58
Figure III.16	Schéma détaillé du circuit électrique.	58
Figure III. 17	Photos de la plaquette du circuit électronique.	59
Figure III.18	Particules cuivre/fer utilisé dans les essais de séparations	59
Figure III.19	Essai avec une tension de 20V	60
Figure III.20	Résultat de la séparation avec différente tension.	60
Figure III.21	Essai avec une tension de 20v	61
Figure III.22	Taux de récupération de fer en fonction de la tension d'alimentation	62
Figure III.23	Modèle avec un entrefer	62
Figure III.24	Séparation avec une distance de 2cm avec tension de 20v	63
Figure III.25	Reste de séparation avec tension de 10v	64
Figure III.26	Taux de récupération de fer avec un entrefer de 2cm	64
Figure III.27	Séparation avec entrefer de 5cm et une tension de 20v	65
Figure III.28	Reste de récupération avec tension de 10v	66
Figure III.29	Taux de récupération de fer en fonction de la tension d'alimentation avec 5cm	67
Figure III.30	Comparaisons des résultats de séparation	68
Figure IV.1	Principe de séparation par courant de Foucault	70
Figure IV. 2	Particule non ferreuse dans les coordonnées cylindriques	71
Figure IV.3	maillage du tambour de séparateur à courant de Foucault	74
Figure IV.4	champ magnétique	75
Figure IV.5	calcul du vecteur potentiel magnétique	76
Figure IV.6	calcul du vecteur potentiel magnétique du séparateur à 2 pôles	77
Figure IV.7	Vecteur potentiel magnétique	78
Figure IV.8	Potentiel vecteur magnétique en fonction du temps	79
Figure IV.9	simulation des lignes du vecteur potentiel magnétique	80
Figure IV.10	simulation de densité de courant induit des différents types de particules	81
Figure IV.11	présence des trois particules proche du séparateur en même temps	82
Figure IV.12	calcul du courant induit autour du séparateur en fonction de temps	83
Figure IV.13	calcul de la force magnétique en fonction de la masse	84
Figure IV.14	Courant de Foucault induit dans les particules	85
Figure IV.15	Force de Lorentz	86
Figure IV.16	La distance d'éjection des particules non ferreuses	87
Figure IV.17	Calcul du potentiel vecteur magnétique autour du tambour	88
Figure IV.18	courants de Foucault induit dans les particules non ferreux rejetées	89
Figure IV.19	Force magnétique en fonction de la densité de flux rémanent de l'aimant permanent	90
Figure IV.20	La distance d'éjection des particules d'or en fonction du gradient de champ des aimants	91
Figure IV.21	force magnétique en fonction d'entrefer	92
Figure IV.22	la distance d'éjection de la particule d'or en fonction de l'entrefer	93

Figure V.1 séparateur rotationnel à tambour à aimant permanent	96
Figure V.2 Caractéristiques d'un aimant permanent.	97
Figure V.3 Implémentation du séparateur magnétique dans le logiciel Comsol	98
Figure V.4 Lignes magnétiques autour du séparateur rotatif de dix aimants permanents.	99
Figure V.5 Courbes caractéristiques du séparateur rotatif	100
Figure V.6 Variation du champ magnétique en fonction de la distance d'entrefer	101
Figure V.7 potentiel magnétique scalaire dans l'entrefer	101
Figure V.8 composantes x y du champ magnétique	102
Figure V.9 Fluctuation de l'induction magnétique en fonction du temps	102
Figure V.10 présence des particules ferreuses proche du séparateur	103
Figure V.11 Schéma de principe de séparation	105
Figure V. 12 Déplacement suivant l'axe x	106
Figure V.13 L'influence de la distance Y entre les particules et les aimants permanents	107
Figure V.14 Banc d'essai expérimental d'un séparateur rotatif a aimant permanent	109
Figure V.15 Echantillons des particules fer/aluminium,	110
Figure V.16 Séparateur à deux collecteurs	110
Figure V.17 photographie de fer/aluminium cuivre séparés a petite taille	111
Figure V.18 Séparation magnétique des particules de petites tailles.	113
Figure V.19 photographie de la séparation des particules de grandes taille	113
Figure V.20 Séparation magnétique des particules de grandes tailles.	115
Figure V.21 Séparation magnétique en fonction de la vitesse du tambour et de la classe granulométrique.	116

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Les grandes familles d'aimants	12
Tableau I.2 Masses volumiques de matériaux couramment utilisés dans l'industrie automobile	15
Tableau I.3 Rapport de Conductivité-Densité pour différents métaux non ferreux.	17
Tableau III.1 Liste d'éléments du circuit électrique.	59
Tableau III.2 Quantité de mélange séparée en fonction de variation de tension d'alimentation.	60
Tableau III.3 Quantité de mélange séparée en fonction de la tension d'alimentation.	61
Tableau III.4 Taux de récupération de fer en poudre en fonction de la tension d'alimentation	63
Tableau III.5 Taux de récupération de fer (boulon) en fonction de la tension	65
Tableau III.6 Quantité de mélange séparé en fonction de variation de tension d'alimentation	65
Tableau III.7 Quantité de mélange séparée en fonction pour un entrefer de 5Cm	66
Tableau III.8 Séparation des particules de petite taille	67
Tableau III.9 Séparation des particules de grande taille	68
Tableau IV.1 la force magnétique en fonction de la masse de la particule	84
Tableau IV.2 Courant de Foucault induit dans les particules non ferreuses	85
Tableau IV.3 Force répulsive des particules non ferreuses de 1cm	86
Tableau IV.4 distance d'éjection selon x (mm) en fonction de la vitesse angulaire du séparateur à courant de Foucault.	87
Tableau IV.5 Variation de la densité de flux rémanent de l'aimant permanent.	90
Tableau IV.6 Variation de l'entrefer entre l'aimant permanent et les particules.	92
Tableau V.1 Séparation des déchets de petites tailles (poudre) en fonction de la vitesse du tambour	112
Tableau V.2 Séparation des déchets de grandes tailles en fonction de la vitesse du tambour	114

Nomenclateurs et Abréviations

E : Champ électrique $\left[\left(\frac{V}{m}\right)\right]$

H : Champ magnétique $[(A/m)]$

J : Densité de courant de conduction $[(A/m^2)]$

ρ : Densité de charges électriques (C/m^3)

D : Induction électrique $\left[\frac{C}{m^2}\right]$

B : Induction magnétique (Tesla).

S : Surface.

Ω : Domaine d'étude

σ : Conductivité électrique $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$:

μ : Perméabilité magnétique.

μ_r : Perméabilité magnétique relative.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

ϕ : Flux de l'induction magnétique

r : Axe radial en coordonnées cylindriques.

θ : Axe angulaire en coordonnées cylindriques.

z : Axe vertical en coordonnées cylindriques

X : Réactance.

R : Résistance

Z : Impédance

T : Potentiel vecteur électrique $A \cdot m^{-1}$

V : Potentiel scalaire électrique

v : Vitesse

J_s : Densité de courant appliquée de la source

J_e : Densité du courant de Foucault

$\alpha_j(r, z)$ est la fonction d'interpolation

A_j est la valeur du nœud inconnue j

α_i : la fonction de projection

$d\Omega = dr \cdot dz$ la région de chaque élément fini

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi}$$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$: Vitesse de la lumière.

ω : Pulsation

\vec{T}_m est formé de trois composantes du tenseur de maxwell

EDP équations aux dérivées partielles

MDF la méthode des différences finies

MEF la méthode des éléments finis

MVF la méthode des volumes finis

MIF la méthode des intégrales de frontières

MCC. la méthode des circuits couplés

INTRODUCTION GENERALE

Le traitement des déchets dans notre pays reste encore très faible. Seulement 5% des 13,5 millions de tonnes de déchets annuellement sont recyclés. Le gouvernement algérien fournit beaucoup d'efforts pour satisfaire les besoins de récupération mais il reste un peu loin des objectifs voulus à cause des nombreuses lacunes: la collecte des déchets domestiques ou industriels avec des moyens traditionnels, le manque de la culture de recyclage ainsi que leurs intérêts sur l'économie, et l'environnement.

Les métaux sont les ressources essentielles de l'industrie et leurs natures contribuent à son utilisation par la récupération. Cette dernière réduira le coût, encouragera le recouvrement des matériaux et la réutilisation des composants.

La séparation de courant de Foucault est une technique de récupérer des métaux non ferreux des jets d'industriel. Elle est employée de plus en plus dans l'industrie de recyclage. L'utilisation de cette technique permet de récupérer des métaux de valeur avec une sélectivité élevée. Cependant, la séparation de divers matériaux par séparation de courant de Foucault dépend non seulement des forces de déflexion magnétiques mais aussi de plusieurs forces comme la force de gravité et la force de centrifuge.

Ces séparateurs sont basés sur l'utilisation des aimants permanents incorporée pour la génération du champ électromagnétique. Ces dernières sont limitées dans la puissance magnétique. Par contre, la séparation à induction magnétique basée sur l'excitation avec des courants alternatifs n'est pas limitée dans la puissance magnétique. La chose qui conduit à l'utilisation des fréquences plus élevées, et à la séparation d'une grande variété de métaux avec différentes tailles.

L'objectif de notre thèse est de faire une étude et une réalisation d'un séparateur à induction magnétique et de voir les paramètres influant sur cette séparation afin de proposer des prototypes modernes pour faire une bonne séparation des particules non ferreux.

Notre manuscrit est organisé en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différentes techniques de la séparation magnétique des matériaux conducteurs. Ainsi, nous allons donner une idée générale sur les séparateurs à induction magnétique.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des phénomènes magnétiques et à l'analyse de ces phénomènes qui sont basés essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et la résolution des équations de Maxwell. Cette modélisation conduit à avoir les expressions finales d'étude du dispositif de séparation à induction magnétique.

Le troisième chapitre sera consacré à l'exploitation du logiciel Comsol Multiphasiques 4.3 pour la simulation de notre séparateur. À travers cette simulation nous allons essayer de

INTRODUCTION GENERALE

faire une réalisation de ce dispositif de séparation expérimentalement pour trier un mélange de particules ferreuses et non ferreuses de différentes tailles ont variant plusieurs paramètres et de voir l'influence de ces derniers sur le taux de séparation. Pour expliquer le phénomène de séparation nous allons faire une comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation.

Dans le quatrième chapitre nous allons développer un modèle de séparateur à tambour rotatif magnétique à aimants permanents placés à la circonférence du cylindre. Ce travail vise à développer un modèle de séparateur à tambour rotatif magnétique avec une augmentation du rendement qui dépend des caractéristiques physiques, mécaniques et magnétiques. Une simulation de ce procédé est exécutée sous le logiciel COMSOL pour visualiser les lignes de champ et leur dispersion le long du tambour. Des expériences de séparation de déchets mixtes fer/aluminium ont été réalisées par notre séparateur pour différentes vitesses de rotation et différentes tailles des particules. Notre objectif est d'avoir un rendement important de séparation des déchets mixtes ferreux (fer) et non ferreux. Ce rendement dépend de la forme des aimants permanents utilisée, de la vitesse de rotation du cylindre, de la taille des particules, de leurs conductivités et de leurs perméabilités.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation du séparateur à courant de Foucault à aimant permanent. Une représentation de la distribution des paramètres magnétiques, le vecteur potentiel magnétique et l'induction magnétique seront visualisés autour du rotor du séparateur. Cette simulation va nous permettre de voir l'influence de la taille des particules, le type de particules, la distribution du champ magnétique produit autour du rotor, et l'influence du nombre de paires de pôles sur la séparation des particules.

CHAPITRE -I-

LA SEPARATION MAGNETIQUE

I.1 Introduction

Le recyclage des produits est utilisé pour minimiser la quantité de déchets produite et de revaloriser des produits en fin de vie, le traitement des déchets constitue un enjeu économique et environnemental de premier ordre. La législation écologique cherche à réduire les déchets de la production, et la diminution de l'impact environnemental des produits en fin de vie.

La valorisation est une importante activité économique et qui reste un concept ambigu. Elle peut être définie comme étant le réemploi des matériaux réutilisables. La démarche de valorisation doit permettre de réutiliser les éléments constitutifs de ces produits. L'activité de valorisation a des avantages sur les plans environnementaux et économiques.

La solution la plus utilisée pour le tri des particules est la séparation magnétique, elle sauve l'environnement de ces déchets quelle que soit sa nature qui sert à la récupération et le recyclage des matériaux conducteurs ou non conducteurs industriels ou minier.

Les systèmes de séparation magnétique sont largement utilisés dans divers secteurs d'activité et plus particulièrement dans l'industrie alimentaire, les industries d'extraction minérale et celles de transformation ainsi que dans les industries de recyclage et de dépollution. La séparation magnétique permet de trier ou de filtrer des matériaux selon leurs propriétés magnétiques [1,2].

I.2 Valorisation des matériaux

La valorisation concerne les déchets ménagers et industriels. Les matériaux les plus récupérés industriellement sont : l'acier des métaux ferreux, métaux non ferreux (l'aluminium, cuivre), matériaux non conducteurs (le plastique et le verre ...). En général, chaque filière de recyclage concerne une catégorie de déchets à récupérer [2,3].

A-Métaux ferreux

Dans les pays industriels la valorisation et le recyclage des métaux ferreux produisent des revenus non négligeables, 70 % de l'acier des matériaux en fin de vie sont récupérés. L'avantage de l'acier est son caractère magnétique qui lui permet d'être attiré facilement par aimantation.

B-Métaux non ferreux

Le recyclage des métaux non ferreux comme l'aluminium, le cuivre permet d'économiser presque 95 % de l'énergie requise pour fabriquer de l'aluminium pur à partir du minerai de la bauxite. De ce fait une réduction de la pollution et des gaz à effet de serre qui sont produites par l'extraction. Pour les métaux non ferreux la séparation se fait par courant de Foucault. [2,3].

C-Matériaux Isolant

- Verre

Le verre est produit à partir de matière minérale vierge (silice) ou de verre broyé de récupération (calcin). La quantité du verre récupérée est plus de 12 % de la masse des ordures ménagères.

- Plastique

Ces déchets représentent la grande quantité de récupération environ 20 % du volume et 11% du poids des déchets ménagers à valoriser chaque année. Les très bonnes caractéristiques du plastique (la légèreté, la malléabilité, l'imperméabilité, la rigidité, l'inflammabilité, la modularité et l'excellent rapport propriétés/coût) sont des qualités qui donnent un succès dans la récupération et le traitement de ces déchets. [3,4].

I.3 Séparation magnétique

La séparation magnétique est une application industrielle de tri et de traitement des matériaux. Son principe est basé sur l'interaction entre le champ magnétique appliqué et les particules à séparer. Le champ magnétique agit d'une manière sélective sur la composition du matériau à traiter, afin de séparer des métaux magnétiques d'un matériau amagnétique, un champ magnétique statique peut être utilisé. Par contre, la séparation des métaux conducteurs nécessite l'application d'un champ magnétique dynamique. Le séparateur magnétique est constitué principalement d'une source de champ magnétique (aimant permanent, électroaimant ou bobine supraconductrice).

I.3.1 Historique

Pendant le XIXe siècle Michael Faraday a découvert la modification de l'intensité du champ magnétique lorsqu'une substance est placée dans ce champ. Après ils ont découvert que des matériaux pouvaient être séparés selon leurs propriétés magnétiques. Dans les années 1860, la première application commerciale de séparation entre le fer et le laiton a été réalisée.

À partir de l'année 1880, les séparateurs magnétiques sont apparus dans l'industrie avec une grande importance permettant la séparation des matériaux ferromagnétiques [7].

La classification des séparateurs magnétiques, en fonction de l'intensité du champ magnétique généré est la suivante :

- Séparateur magnétique 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) [5,6]

I.3.2 Collecte et démantèlement des objets en fin de vie

Les objets en fin de vie empruntent la voie du recyclage de différentes façons, ils sont apportés à des cours de collecte et de démantèlement de la ferraille. Les démanteleurs sont également tenus d'enlever les éléments dangereux, le carburant, les fluides de toutes sortes, y compris les fluides caloporteurs, etc. avant le déchiquetage. Quelques produits sont transférés à une presse qui en réduira leurs volumes et les prépare pour la déchiqueteuse [3,56].

I.3.3 Déchiqueteuses

Une usine de déchiquetage (broyage) sert à mettre les pièces à traiter et les exposer à une roue tournante pour être marteler, afin d'avoir par arrachement et écrasement des pièces de petites dimensions (entre 50 à 150 mm). Le principe de fonctionnement d'une déchiqueteuse est illustré à la figure I.1.

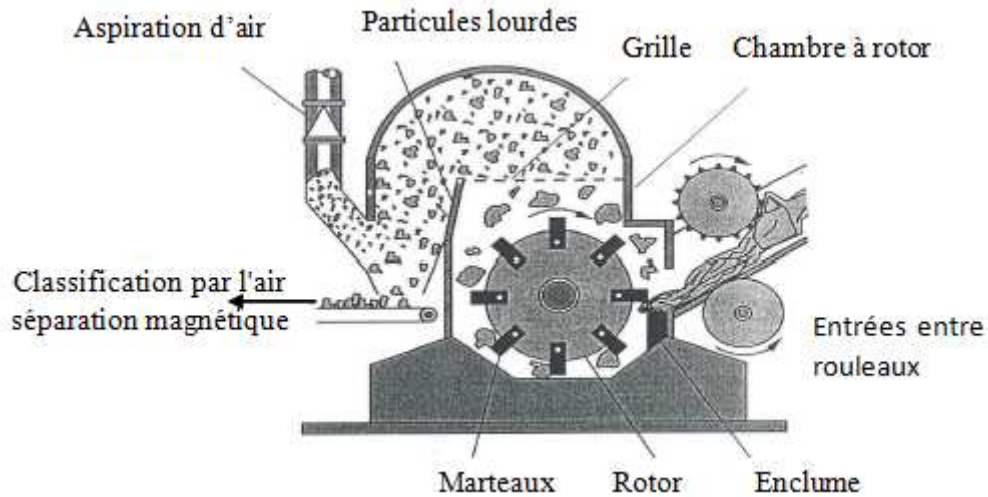


Figure I.1- Illustration d'une déchiqueteuse à marteaux [3].

Des marteaux déchiquettent le dispositif en morceaux pour passer à travers le grillage supérieur de la déchiqueteuse. Les matériaux sont placés sur un transporteur à courroie et envoyés aux étapes de tri de l'usine de déchiquetage [3].

I.3.4 Séparateur magnétique

- Définition

Un séparateur magnétique est un appareil qui modifie les caractéristiques du champ magnétique dans l'espace du traitement engendrant en particulier un champ magnétique agissant de façon sélective sur les corps qui présentent la plus grande aptitude à l'aimantation à travers une force magnétique figure I.2 et figures I.3 [6,57].

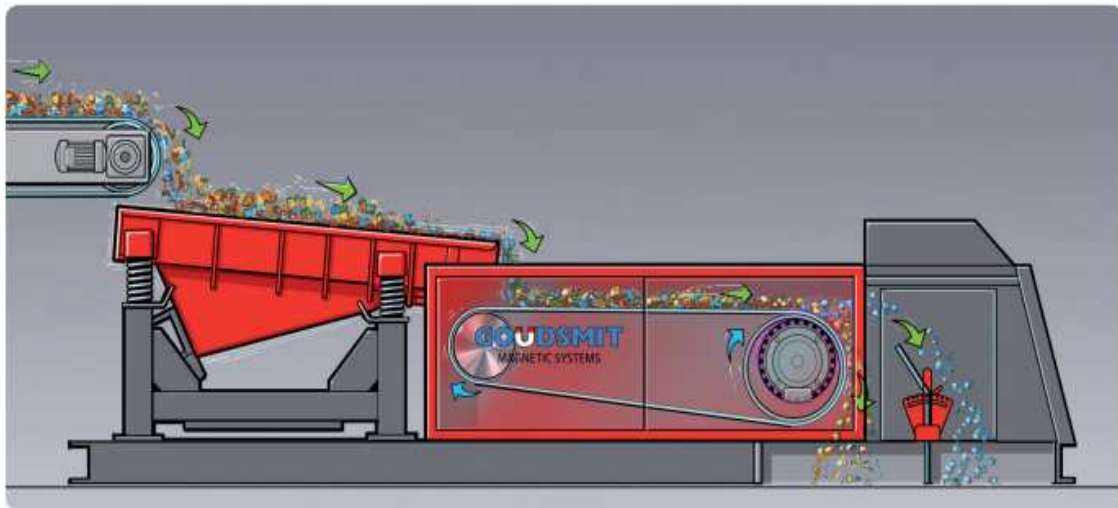


Figure I.2 Chaîne de séparation magnétique [8]

- Principe de base

Un champ magnétique est une région de l'espace où une force magnétique fait sentir son influence. Sous l'effet d'un champ magnétique H , les corps vont réagir de différentes façons dépendamment s'ils sont :

-Diamagnétique : la matière répond par un champ magnétique opposé à celui qui lui est appliqué, ce qui annule son effet.

-Paramagnétiques : la matière répond par une aimantation dirigée vers le même sens que celui du champ H, ce qui l'attire vers les pôles.

-Ferromagnétiques : s'aimantent fortement sous l'effet d'un champ magnétique[8].

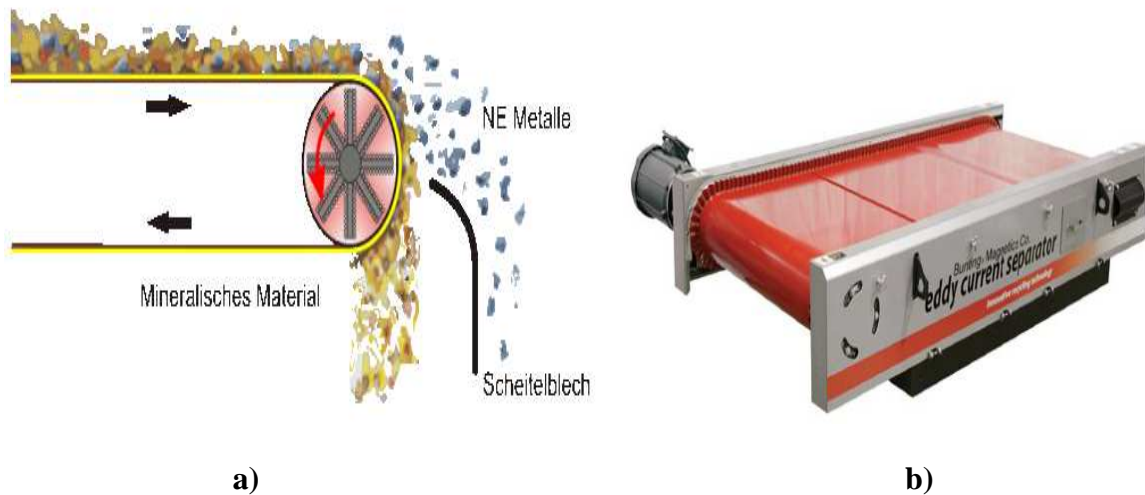


Figure I-3 Séparateur magnétique [20].

1.3.5 Application de la séparation magnétique

L'efficacité et la simplicité de la séparation magnétique ont donné un grand succès réalisé dans le domaine du minerai (épuration ou concentration) et a permis la généralisation de l'utilisation des techniques de la séparation magnétique dans des domaines de la vie (industrie, agriculture, médecine, environnement) [3]. Les principales applications de la séparation magnétique sont distribuées sur trois axes :

- Mines

La séparation magnétique est utilisée dans le domaine minier pour séparer les minéraux (teneurs faibles) avec un taux de séparation très élevé, tout en exploitant leurs différentes propriétés magnétiques (susceptibilités), et avec une pureté importante de la richesse exigée par les industriels. La séparation magnétique est utilisée pour séparer le minerai de fer des résidus minéraux [20,52].

- Dépollution industriel et environnemental

La séparation magnétique est utilisée dans plusieurs procédés d'épurations comme : la purification des eaux industrielles (métallurgie et sidérurgie, des eaux urbaines, des eaux de refroidissement des centrales nucléaires), à des débits importants. Son principe consiste à séparer les particules colloïdales par un champ magnétique générant des forces d'interactions entre particules et le système de séparation [5].

- Chimies et biologiques

a) Médicale

La séparation magnétique a été appliquée avec succès dans la recherche biomédicale et biologique et les techniques de diagnostic médical. L'implication du marquage de l'entité biologique choisie par un matériau magnétique, et la séparation des entités marquée par un dispositif de séparation magnétique agissant dans le fluide. Elle s'est avérée être une technique très sensible pour la détection de tumeurs rares des cellules du sang, étant particulièrement adaptée lorsque le nombre de cellules ciblées est faible [58].

b) Biochimie

La concentration des métaux paramagnétiques est une application biochimique, permettant de purifier des effluents liquides pollués. Des bactéries telles que *Bacillus Subtilis* ou *Candida Utilis* ont permis de fixer des phosphates métalliques, dans leur paroi externe, en processus aérobie. Une fois la fixation achevée, les bactéries sont passées dans une matrice poreuse magnétisée [6].

I.4. Classification des séparateurs magnétiques

Les séparateurs magnétiques peuvent être classés suivant plusieurs critères (nature de champ magnétique, la nature de l'élément qui produit le champ son état dynamique ou statique ...) parmi eux l'intensité du champ magnétique [14]. Les séparateurs magnétiques peuvent être classés suivant l'intensité du champ magnétique, on peut les classer en trois types :

I.4.1 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)

Les séparateurs magnétiques à basse intensité fonctionnent normalement à champ ouvert, les lignes de force magnétiques se referment dans un milieu magnétique peu perméable comme l'air. Leur construction est simple avec une énergie faible à aimant permanent voir la figure I.4. Ils sont destinés principalement pour les matériaux ferromagnétiques. Leur densité de force magnétique allant de $2 \cdot 10^4$ à 10^6 N/m³ [6].

Il existe deux types de séparation magnétique en voie humide et en voie sèche, la première est généralement employée lorsque la granulométrie des particules à trier devient fine et que la séparation en voie sèche devient difficile. Les aimants à base de terre rare, sont les plus couramment utilisés, vu les performances exceptionnelles qu'ils présentent et les progrès récents dans ce domaine [16].



Figure I.4 Aimant permanent [8]

I.4. 1.1 Séparateurs en voie sèche

Ces séparateurs excluent automatiquement les organes ferreux, de gros morceaux contenus dans des déchets métalliques, des ordures ménagères et industrielles. Leur constitution magnétique est à base d'aimants permanents. Ils sont principalement de trois classes (figure I.5).

- Séparateurs suspendus ;
- Poulies magnétiques ;
- Tambours dé-ferrailleurs.

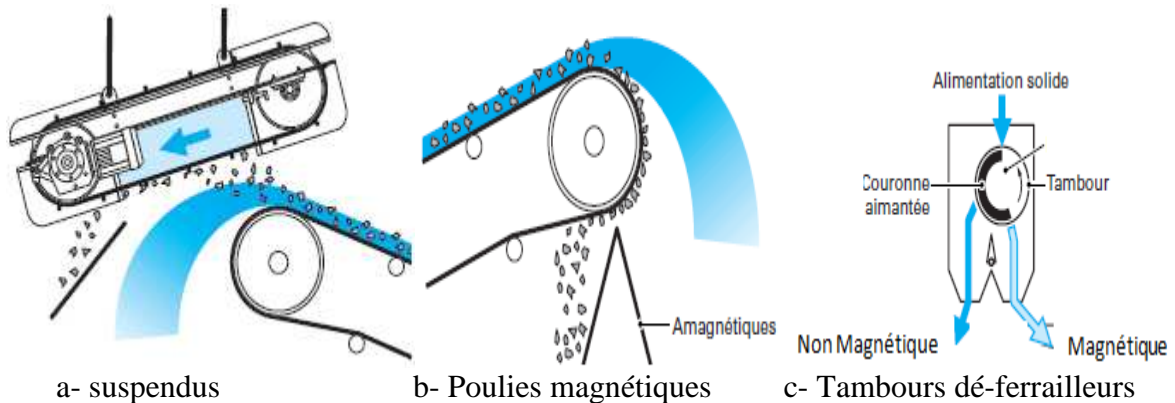


Figure I.5 Séparateurs magnétiques à aimant permanent [16].

I.4. 1.2 Séparateurs en voie humide

La séparation en voie humide est utilisée pour une taille des particules fines inférieure à 1 mm et lorsque la séparation en voie sèche devient inefficace, même pour des particules sous forme de pulpe minérale. Ils sont classifiés selon la direction du jet des particules dans le liquide et le sens de rotation du tambour (figure I.6) [12,16].

- **Séparateur à courant parallèle** : Les produits grenus magnétiques circulent dans le même sens que la rotation du tambour.
- **Séparateur à contre-rotation** : Les particules non magnétiques à une taille inférieure à 0,6 mm circulent dans le sens contraire de la rotation du tambour.
- **Séparateur à contre-courant** : Ce dispositif est l'assemblage des deux procédés précédents avec une granulométrie très fine [16].

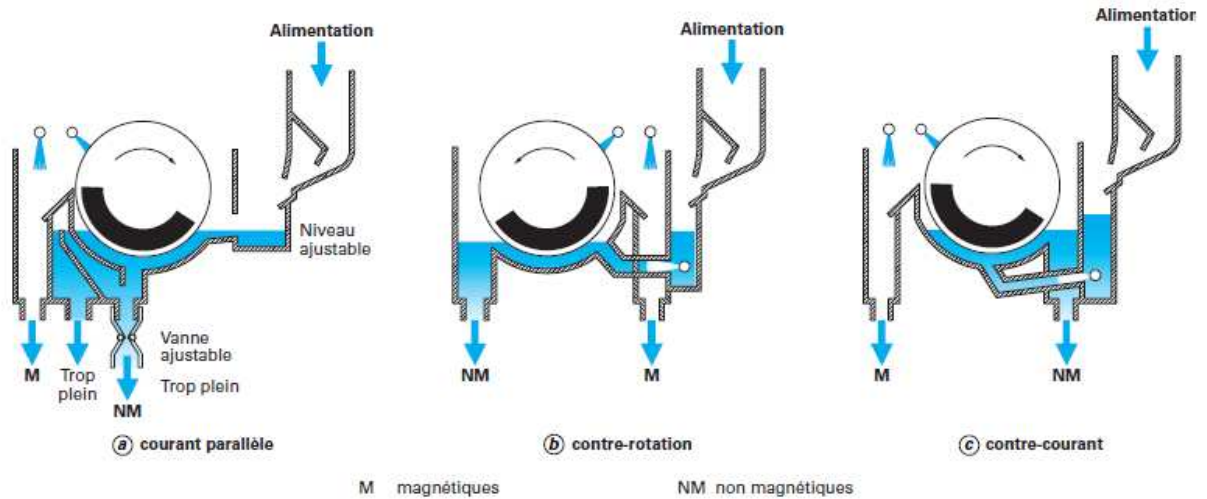


Figure I.6 Séparateurs en voie humide [16].

I.4.2 Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI).

Ce genre de séparateur magnétique est destiné à trier des matériaux paramagnétiques. Le champ magnétique est produit soit par un électroaimant ou un aimant permanent. La densité de force magnétique est de l'ordre de $2 \cdot 10^7$ à $4 \cdot 10^9 \text{ N/m}^3$. Les séparateurs magnétiques à haute intensité peuvent fonctionner en voie sèche ou en voie humide, afin de purifier ou concentrer des matériaux non magnétiques [15].

Des séparateurs magnétiques à tambours à électroaimant rotatif en voie sèche créent un champ magnétique avec une intensité de (16000-18000 Gauss) dans l'entrefer. La figure I.7 montre le principe d'une séparation d'un mélange de particules paramagnétiques et diamagnétiques. Les particules paramagnétiques restent collées au rotor. Elles sont détachées à l'aide d'un ballais. Les particules diamagnétiques sont séparées sous l'effet de la force centrifuge et de répulsion [17].

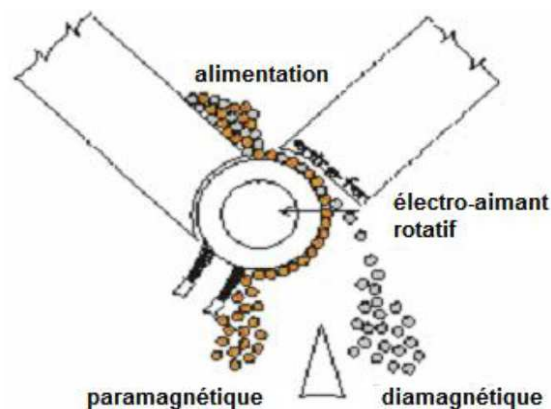


Figure I-7 Principe de la séparation magnétique SMHI des particules diamagnétiques et paramagnétiques. [14]

I.4.3 Séparateur magnétique à haut gradient et/ou haut champ (SMHG).

Ces séparateurs récupèrent les particules à très petite granulométrie ultrafines ($5\mu\text{m}$) du genre paramagnétique de susceptibilité magnétique faibles figures I.18. Le champ magnétique élevé ou une forte excitation magnétique est produit par l'utilisation des bobines supraconductrices en alliage supraconducteur qui permet de générer une densité de force magnétique de 6×10^{10} à 10^{12} N/m^3 . Ce séparateur est caractérisé par une augmentation de la force d'attraction magnétique (25 fois dans certains cas) qui permet de piéger des particules de l'ordre du micromètre. Cette séparation à haut gradient du champ (supraconducteur) nécessite un liquide de refroidissement comme l'hélium liquide, pour refroidir le bobinage en alliage supraconducteur [6,7,16].

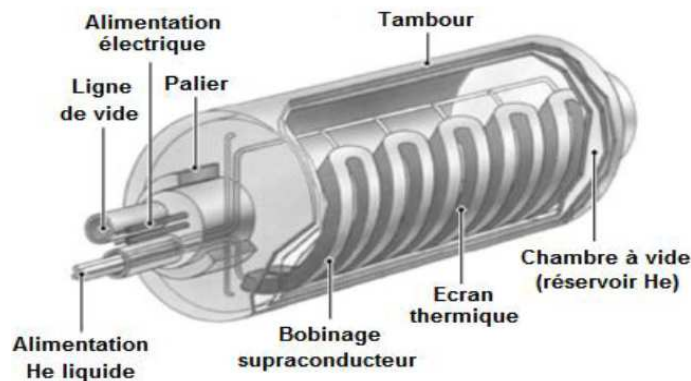


Figure I-8 Séparateur supraconducteur à haut gradient à tambour Descos [14]

I .5 Aimants permanents:

Les aimants permanents présentent des performances magnétiques de plus en plus élevées. Ils présentent des perspectives d'avenir très favorables dans un certain nombre de domaines industriels tels que; l'aéronautique, l'énergie (éolienne), les technologies de l'information...etc. Il existe plusieurs types d'aimants permanents en raison de leurs propriétés spécifiques [26].

I .5.1 Différentes familles des aimants permanents:

Actuellement les aimants permanents ont beaucoup évolué ces dernières années. Grâce à des nouvelles technologies, de nouveaux matériaux sont apparus dans leurs constitutions, comme les terres rares (NdFeB, Sm-Co) avec de très bonnes caractéristiques magnétiques. Malheureusement ils restent relativement coûteux. Il existe trois types d'aimant permanent sont:

- Les Alnicos ((aluminium+(nickel) +(cobalt)) ;
- Les ferrites ;
- Les terres rares.

Les deux figures I.9 et I.10 illustrent les caractéristiques de ces trois types.

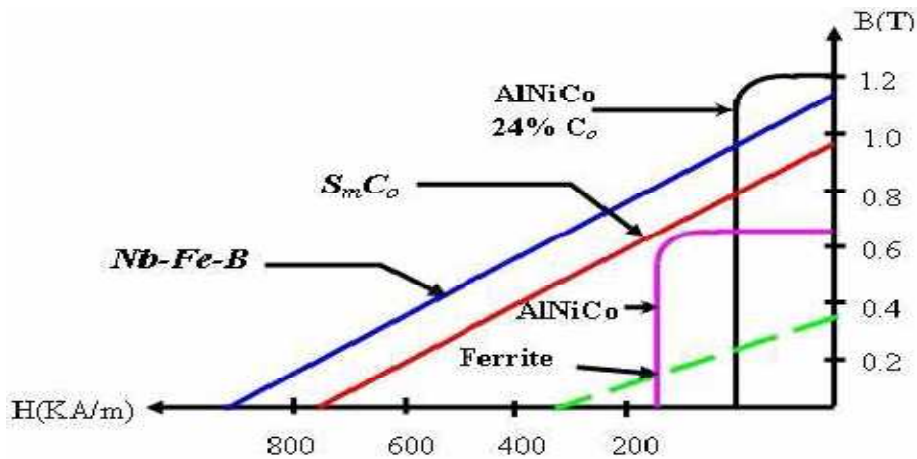


Figure I.9 Courbe B (H) des différents types des aimants permanents [8].

1- 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 pas être sortis de leur circuit magnétique, sous peine de les désaimanter.

2- Aimants en Ferrite sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux. Ils résistent bien à la température. Les aimants en ferrites trouvent l'essentiel de leurs applications dans les moteurs de faible puissance, utilisés dans l'industrie automobile.

3- Aimants Terre-Rares (Nd-Fe-B, Sm-Co) sont très puissantes et paraissent très bien appropriées pour les machines électriques. Leur coût encore élevé freine l'extension de ces nouveaux aimants. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les plasto néodyme. C'est un mélange de néodymes 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. On peut trouver trois types :

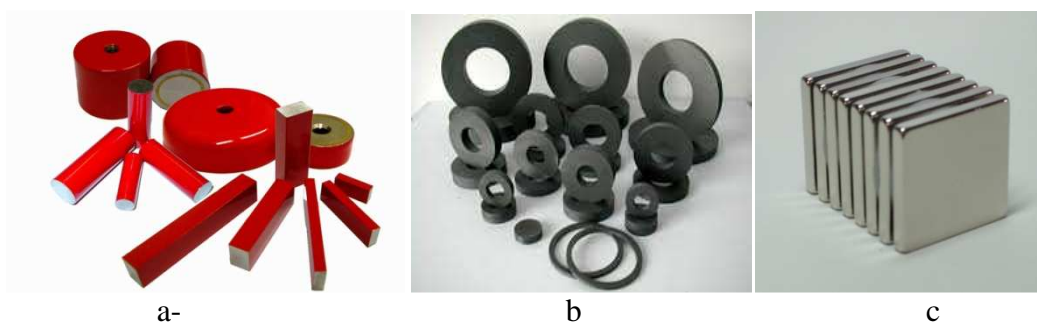


Figure I.10 Aimants permanents, (a) Alinco (Samarium-Cobalt (Sm-Co)), (b) Ferrite (Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)), (c) Terre-Rares.

Tableau I.1 – Familles d'aimants [8]

Familles	$(BH)_{\max}$ (kJ/ m ³)	H_c (kA/m)	B_r (T)
Alnico	35,8 à 43,8	64 à 103	1,1 à 1,3
Ferrites (Sr)	25,5 à 40,6	200 à 400	0,38 à 0,46
Sm-Co 1-5	135,3 à 151,2	960 à 1 600	0,82 à 0,87
Sm-Co 2-17	159,1 à 254,6	490 à 790	0,92 à 1,16
Nd-Fe-B	199,0 à 310,3	880 à 1 990	1,0 à 1,3

I.5.2 Applications des aimants permanents

1- Machines synchrones à aimants permanents

Le rotor de la machine synchrone à aimant permanent MSAP est constitué (inducteur) par des aimants permanents voir la figure I.11.

Elle est caractérisée par les avantages suivants :

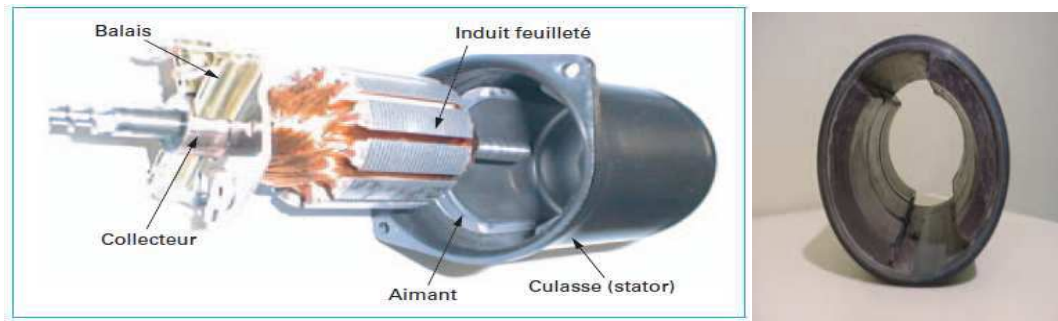
- ✓ Facteur de puissance plus élevé.
- ✓ L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules rotoriques, un bon rendement, un gain en volume et en masse, suppression des contacts balais collecteurs ou balais à bagues.



Figure I.11: Moteur à aimants en géométries cylindriques [58]

2-Moteurs à courant continu

L'inducteur du moteur à courant continu peut être construit avec des aimants permanents (figure I.12.a) [7].



a- Moteur à courant continu

b-Stator à aimants

Figure I.12 Moteurs à courant continu avec un Stator à aimants[57]

3-Haut-parleurs

Les circuits magnétiques des haut-parleurs contiennent des aimants permanents à rémanence élevée c'est-à-dire des aimants métalliques de type alnico, samarium-cobalt, néodyme fer- bore ou manganèse aluminium carbone, pour avoir une induction (ou densité de flux) magnétique maximale dans l'entrefer, dans lequel est placée la bobine mobile reliée au pavillon; cette dernière vibre en fonction des variations de courant qui lui sont appliquées (loi de Laplace) figure I.13.

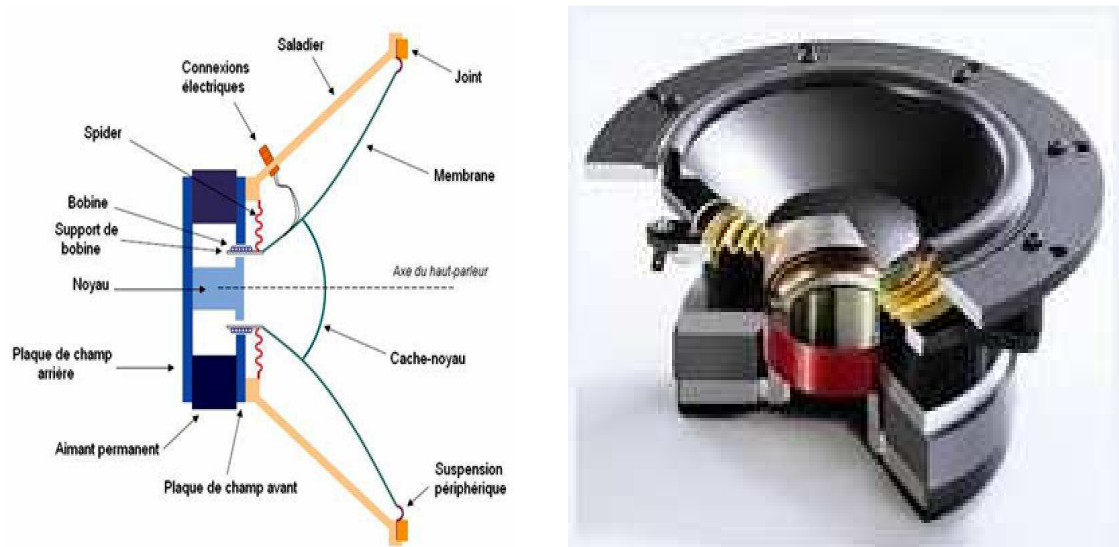


Figure I.13 Haut-parleur [7]

I.6 Techniques existant de triage des métaux non ferreux

Les techniques de triage des métaux non ferreux comme l'aluminium sont actuellement utilisées dans l'industrie. Ces techniques sont la séparation magnétique, la séparation dans un courant gazeux, la séparation par courants de Foucault et la séparation par suspensions denses.

A-Séparation magnétique

La séparation magnétique est une application à induction magnétique de trier des matériaux. Cette méthode basée sur la génération d'un champ électromagnétique statique rotationnel à travers des électroaimants ou des aimants permanents qui agissent sur les

matériaux à séparer. Le choix des aimants permanents dépendra de la nature et de l'amplitude des forces nécessaires en fonction des besoins magnétiques [3].

Dans la séparation magnétique, le tambour du séparateur est fixé. Il est constitué des aimants permanents logés dans un cylindre rotationnel. Le transporteur à ceinture couvre le tambour du séparateur figure I.14.

Lorsque les particules sont transportées vers le séparateur, les particules ferromagnétiques sont attirées vers l'aimant permanent et sont recueillies par le transporteur. Les matériaux non ferreux tombent dans un collecteur [12].

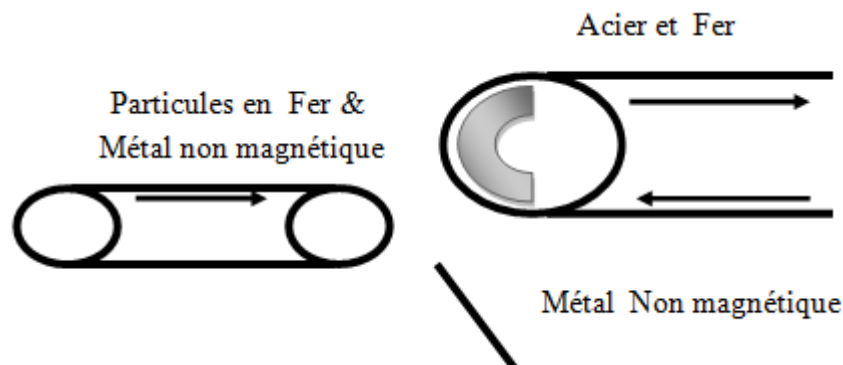


Figure I.14 Séparateur magnétique[3] .

B-Séparation dans un courant gazeux

La séparation dans un courant gazeux est utilisée pour concentrer les particules non magnétiques en composants recyclables. Elle est utilisée pour l'enlèvement des matériaux à faible densité. Les morceaux non métalliques légers, tels que le plastique, le caoutchouc, la mousse et les fibres seront extraits de la fraction métallique plus lourde à l'aide d'une buse d'aspiration placée au-dessus du transporteur. Autre technique se base sur un élutriateur et un flux d'air ascendant à une lame d'air les pièces passent dans une masse d'air statique [3].

C-Séparation par courants de Foucault

Un séparateur à courant de Foucault est une machine de tri, elle est employée pour séparer magnétiquement des déchets métalliques non-ferreux (aluminium, zinc, cuivre, plomb...). Ce genre de séparation expose les matériaux à un champ magnétique variable en fonction du temps, à l'intérieur des métaux non-ferreux (matériaux conducteurs) des courants opposés seront induits avec un champ magnétique opposé (champ secondaire) dans les particules ce champ est la cause de la force répulsive [3].

La figure I.15 illustre cette force et le moment qui agit sur une particule métallique non magnétique dans un séparateur à courants de Foucault [3,54].

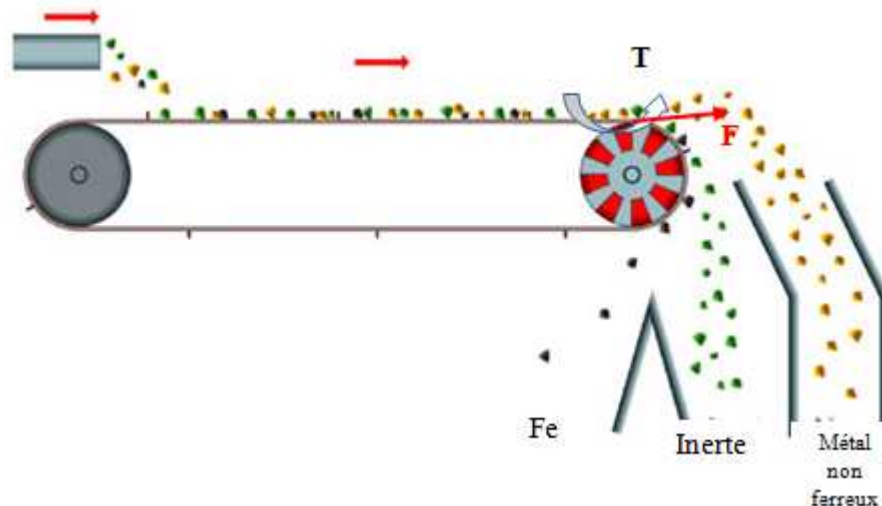


Figure I.15 Séparation des différentes particules avec un séparateur à courants de Foucault

Le rotor produit un champ magnétique alterné au tour du séparateur à cause des aimants permanents (NdFeB) inversés pôles nord et sud [59].

Un transporteur ramène le mélange de matériaux métalliques et non métalliques vers le cylindre à aimants permanents. La séparation dépend de plusieurs paramètres mécaniques magnétiques opérationnels comme la vitesse, et la forme et la nature des particules [53,57].

D-Séparation par suspensions denses

La séparation par suspensions denses à haute capacité utilise : un bain à une densité déterminée à base d'eau et des boues pour séparer les matériaux de différentes masses volumiques, les matériaux grossiers et les matériaux fins sont éliminés du procédé. La masse volumique des matériaux est indiquée au tableau I.2 [3].

Tableau I.2 Masses volumiques de matériaux couramment utilisés dans l'industrie automobile [3].

Matériau	Masse volumique (g/cm ³)
Mousses de plastique	0,01-0,6
Caoutchouc naturel	0,83-0,91
Polypropylène	0,90
Polystyrène	1,0-1,1
Polychlorure de vinyle	1,40
Magnésium et alliages	1,74-1,88
Aluminium creux	2,2-2,5
Aluminium et alliages	2,6-2,9
Zinc et alliages	5,2-7,2

La majeure partie des matériaux non métalliques et une portion lourde (densité de 2,5) qui sont retirés par flottation, le reste est acheminé vers un séparateur à courant de Foucault pour trier les matériaux métalliques des matériaux non métalliques [3].

Les inconvénients de cette méthode sont:

- ✓ Elle est coûteuse;

- ✓ Contamination d'eau;
- ✓ Une efficacité sauf pour quelques matériaux [3].

E-Triage selon la couleur

Le triage selon la couleur est un procédé automatique basé sur une technique d'analyse d'images informatisée dans laquelle la couleur de chaque pièce de métal est détectée par un détecteur d'images. Il est très utilisé industriellement. Elle est applicable pour triage de déchets métalliques non ferreux d'aluminium, zinc, du cuivre, du laiton et de l'acier inoxydable [3,9].

F- Spectroscopie par claquage laser (SCL)

La spectroscopie par claquage laser émet une impulsion sur la surface des particules, un détecteur spectral permet de recevoir l'information sur la qualité du matériau (figure I.16). Le signal de triage actionne un dispositif mécanique qui force l'acheminement de la pièce identifiée à un collecteur de triage, pour séparer les particules de ferraille des différents alliages. Les avantages de cette méthode sont :

- L'analyse de la composition des particules d'aluminium sans contact ;
- Tri des alliages sans l'utilisation de solutions aqueuses [3,9].

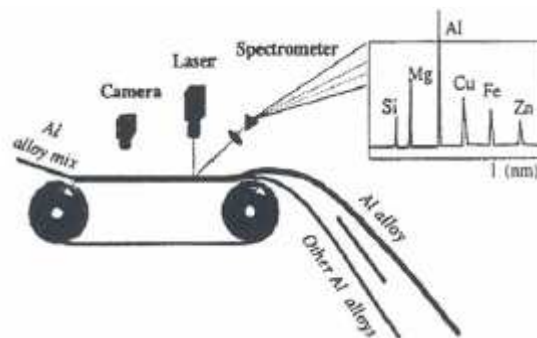


Figure I.16 Spectroscopie par claquage laser pour le triage des alliages d'aluminium [3].

I.7 Différents types de séparateur à courant de Foucault

La séparation par courant de Foucault est employée pour la séparation et la récupération des métaux non ferreux des déchets ménagers et industriels. Les courants de Foucault sont produits par une tension induite dans un métal conducteur qui crée un courant, appelé courant de Foucault [55].

Les champs d'excitation produisent des courants circulaires semblables à un flux de fluide. « Le principe de base de la séparation par courant de Foucault comporte la génération d'un flux de champ électromagnétique mobile qui donne naissance à une force répulsive générée dans les conducteurs (métaux non ferreux) qui les repousse à travers le champ opposé. La force répulsive dépend du poids, la forme, le matériel, et d'autres paramètres.

Pour induction des courants de Foucault en matériaux, il existe quatre méthodes:

1. Déplacement physique de la matière à séparer à travers un champ magnétique.
2. Déplacement de l'aimant à travers la matière à séparer.

3. Déplaçant un champ magnétique par la matière à séparer par des techniques de mise en phase électriques [13].

4. Changement temporaire de l'intensité de champ magnétique dans la matière à séparer.

La force d'éjection dépendra de la génération des courants de Foucault induit dans la surface de particule en fonction de la taille ou la dimension particulaire qui peut être repoussée ou séparée (figure I.17) [13].

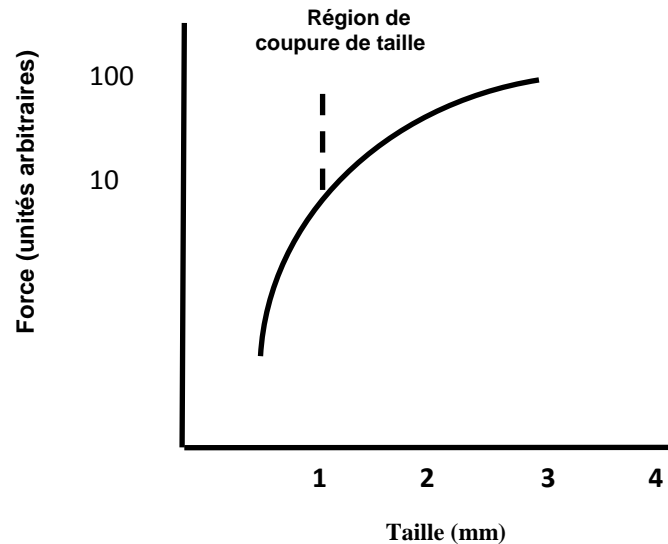


Figure I.17 Liaison entre la force de courant de Foucault et la dimension des particulaires

Le rapport entre la conductivité et la densité fournit un indicateur qui montre à quel point un matériel sera influencé par les forces répulsives (Tableau I.3). L'aluminium a un rapport de conductivité sur la densité presque deux fois de celui du cuivre qui fait le processus idéal de la séparation en aluminium [10, 11, 13].

Tableau I.3 Rapport conductivité-densité pour différents métaux non ferreux.

<i>Métal</i>	Conductivité électrique $\sigma(10^{-8} /\Omega\text{m})$	Densité de masse ρ (10^3 Kg/m^3)	σ/ρ $10^3 \text{ m}^2/$ $/\Omega\text{Kg}$
Aluminium	0.35	2.7	13.0
Cuivre	0.59	8.9	6.7
Argent	0.63	10.5	6.0
Zinc	0.17	7.1	2.4
Laiton	0.14	8.5	1.7
Etain	0.09	7.3	1.2
Plomb	0.05	11.3	0.4

A- Moteur à induction linéaire

A- 1 Horizontal (LIM)

L'université de Vanderbilt dans les années 60 a développé des séparateurs des courants de Foucault à électroaimant utilisé dans une ressemblent au stator d'un moteur triphasé sauf que le moteur avait été ouvert et s'est étendu à plat, connu sous le nom d'un moteur linéaire. Des moteurs linéaires ont été installés au-dessous et au-dessus de la bande de convoyeur.

LIM produit une onde sinusoïdale du champ magnétique lorsque le conducteur électrique passe au-dessus du LIM, des courants de Foucault sont installés et le conducteur non ferreux est poussé sur la longueur de moteurs (la figure I.18-a). En plaçant le moteur transversal à l'écoulement de la matière, le matériel visé peut être séparé. Typiquement le matériel sera transporté sur une ceinture. Une fois le matériel est sur les moteurs à induction, les forces répulsives créées poussent le matériel non ferreux ailleurs [13].

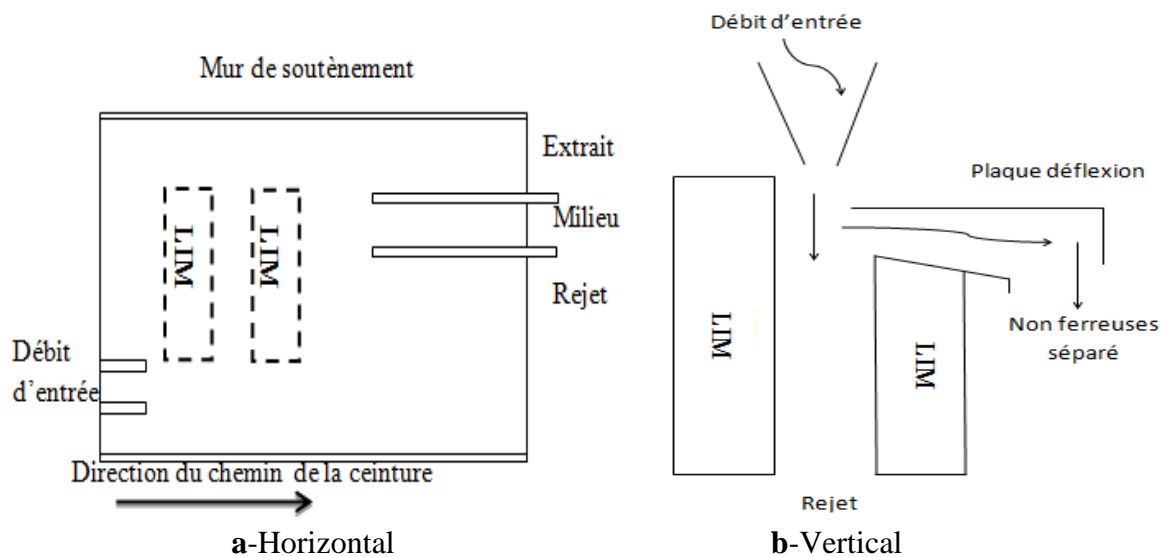


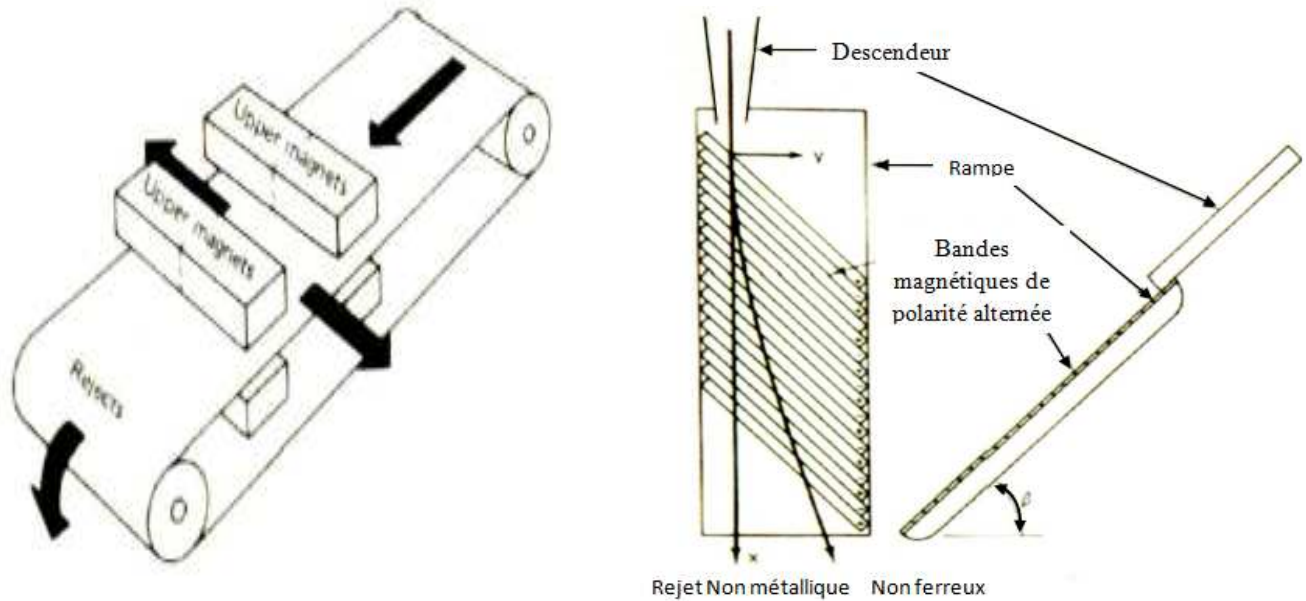
Figure I.18 Séparateur à moteur à induction linéaire

A- 2 Verticale (LIM)

Les séparateurs verticaux à courant de Foucault auront typiquement le jet du matériel coulé d'un vibreur (figure I.18-b). Les particules entrent dans un module de LIM qui a des forces répulsives dirigées vers le haut. L'interaction entre les particules visées et le champ se produisent, ces derniers seront soulevés vers le haut et projetés hors système. La dimension particulaire et le débit unitaire de particule sont des facteurs critiques pour ce système afin de déterminer les performances du système [13].

B- Système à double aimant

Un système à double aimant est composé d'un convoyeur avec deux ensembles magnétiques au-dessus et au-dessous de la ceinture avec un entrefer entre les aimants égal environ 3.5 cm (Figure I.19-a). Quand le matériel traverse le premier ensemble d'aimants, les métaux visés sont poussés au bord du côté de la ceinture. En continuant le passage au-dessus du deuxième ensemble d'aimants, les métaux sont poussés vers l'autre côté de la ceinture. Ceci place les particules visées sur les bords de la ceinture et ils sont rejetés au centre.



a-Double aimant Figure [13]

b- séparateur à Table inclinée [13]

Figure I.19 System à aimant permanent statique

C- Séparateur statique

C-1 Séparateur à Table incliné

Le mécanisme fonctionne sur une rampe d'acier inoxydable approximativement à 45° figure I.19.b. Sous la surface de la rampe un arrangement des aimants permanents de polarités alternées, la matière à séparer sera jetée dans le descendeur qui se trouve au-dessus de la rampe. Le matériel glisse vers le bas à travers la variation de l'accélération qui facilite la séparation. Les particules en métal deviennent influencées par les forces de courant de Foucault. Ces derniers sont poussés au côté de la rampe. Les particules non métalliques glissent vers le bas de la rampe non affectée [19].

C-2 Séparateur vertical à courants de Foucault

Le séparateur vertical à courant de Foucault (VECS) a été présenté par Dalmijn, d'université de Delft de technologie. Le VECS s'est composé de deux verticaux murs d'acier doux en parallèle avec les bandes magnétiques des polarités alternées qui sont incluses dans les murs intérieurs. Les particules conductrices passant par un champ magnétique non homogène vont être déviées, tandis que les particules non magnétiques tombent sous l'action de la pesanteur. Ce séparateur était fondamentalement une combinaison de deux séparateurs à rampes montés verticalement.

Les séparateurs à courant de Foucault statique ne sont pas assez forts pour la récupération de petites particules non ferreuses, car le champ magnétique est stationnaire figure I.20.

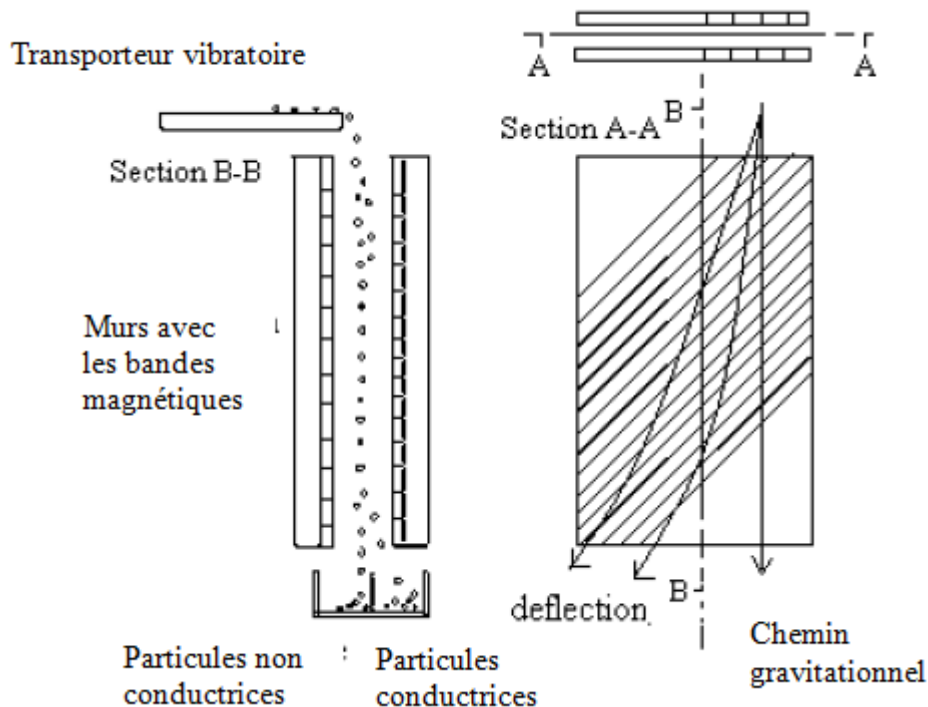


Figure I.20 Séparateur statique à courant de Foucault vertical [19,63].

D- Séparation à Tambour à courant de Foucault

D-1 Tambour horizontal (HDECS)

- Alimentation supérieure.

Pour la conception d'un tambour horizontal, les aimants permanents attachés à la surface (la figure I.21-a), sont placés alternativement NS et SN. Afin d'établir un champ alternatif, le tambour est placé à l'extrémité d'une bande de convoyeur qui transporte les déchets, une vitesse angulaire est donnée au tambour. L'exposition au champ alterné induit des courants de Foucault dans les particules conductrices non ferreuses selon la loi de Faraday. Les particules sont accélérées par le mouvement du tambour sous l'influence des forces électrodynamiques, « des particules non conductrices ne seront pas influencées et tomberont directement de la ceinture dans un collecteur ». Cependant les particules conductrices non ferreuses, auront une trajectoire influencée par le tambour et se dirigent vers le deuxième collecteur de séparation.

Les inconvénients du système sont :

- Le coût d'équipement élevé ;
- Une incapacité de séparer les particules de taille inférieure à 5 mm.

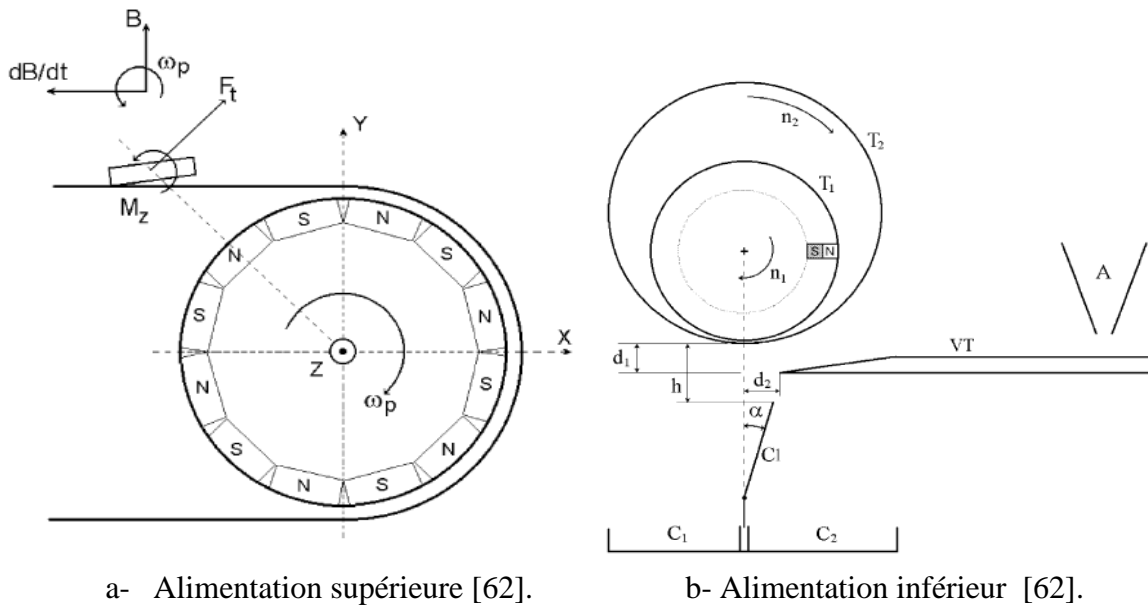


Figure I.21 Séparateur à courant de Foucault de tambour horizontal

-L'alimentation inférieure

Cette conception est constituée par un cylindre rotatif placé au-dessus d'une surface de vibration inclinée (la figure I.21-b), comme les particules se déplacent sur une surface légèrement inclinée vers le tambour. Les particules sont excitées et commencent à rebondir de la surface. Les particules non conductrices restent non influencées par le phénomène magnétique et tombent de la surface dans une trajectoire prévisible. La direction de la rotation inverse vers l'arrière (sens contraire des aiguilles d'une montre) du tambour a un impact étonnant sur la taille des particules récupérées. L'avantage du séparateur est une séparation avec une pureté de 100% pour les particules d'une taille 5-10 millimètres [13,19].

D-2 Tambour Vertical

Le tambour du séparateur vertical à courant de Foucault tourne autour d'un axe vertical (figure I.22-a). Le convoyeur n'est plus utilisé, on emploie un descendeur incliné où les particules frappent la surface d'un dôme conique en plastique. Sous le dôme il y a un tambour tournant autour d'un axe vertical.

Les particules passent par un petit descendeur, vers la surface d'impact défini par une plus petite région magnétique. Car les particules percutent la surface en plastique, les particules non conductrices rebondissent et tombent comme prévu. Cependant, les particules conductrices, ont une trajectoire de rebondissement influencée par les forces électrodynamiques.

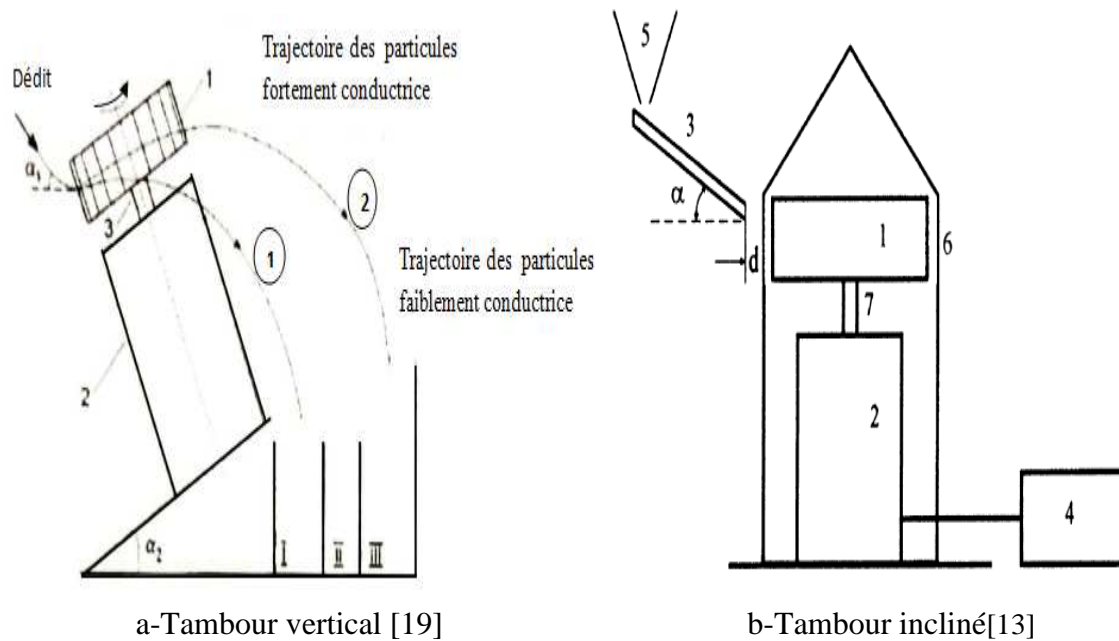


Figure I.22 Séparateur à tambour vertical de courant de Foucault.

D-3 Tambour incliné

Une autre variation du système de HDECS est le séparateur à tambour incliné à courant de Foucault. Ce type a un cylindre rotatif avec des aimants permanents joints dans la polarité alternée, sauf que le tambour est incliné (figure I.22-b), il n'y a aucun convoyeur mais plutôt une glissière qui transporte le matériel au tambour. Les déchets frappent la surface du tambour à une trajectoire oblique. Pendant que les particules rebondissent à l'impact de tambour, ces particules conductrices sont influencées par les forces électrodynamiques et assument une plus grande trajectoire que les particules non conductrices. La pente a été déterminée pour produire une plus grande déflexion des particules fortement conductrices [13].

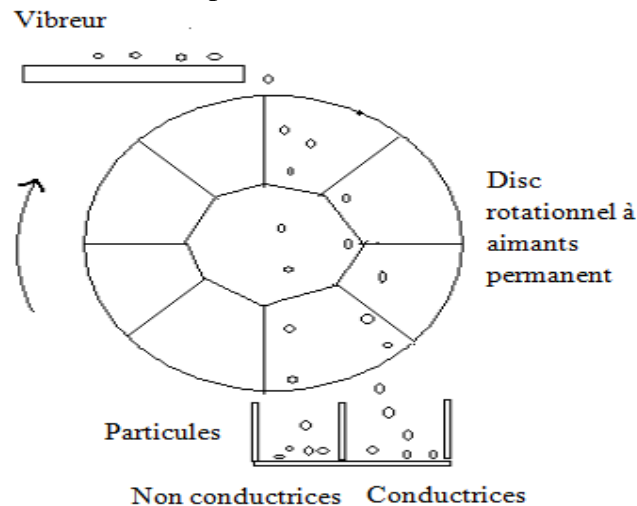


Figure I.23 Séparateurs à courant de Foucault à disque tournant [63].

E- Séparateurs à disque tournant

Dans le séparateur à courant de Foucault rotationnel à disque vertical, le changement de l'induction magnétique est provoqué par deux mouvements : La rotation des disques ;

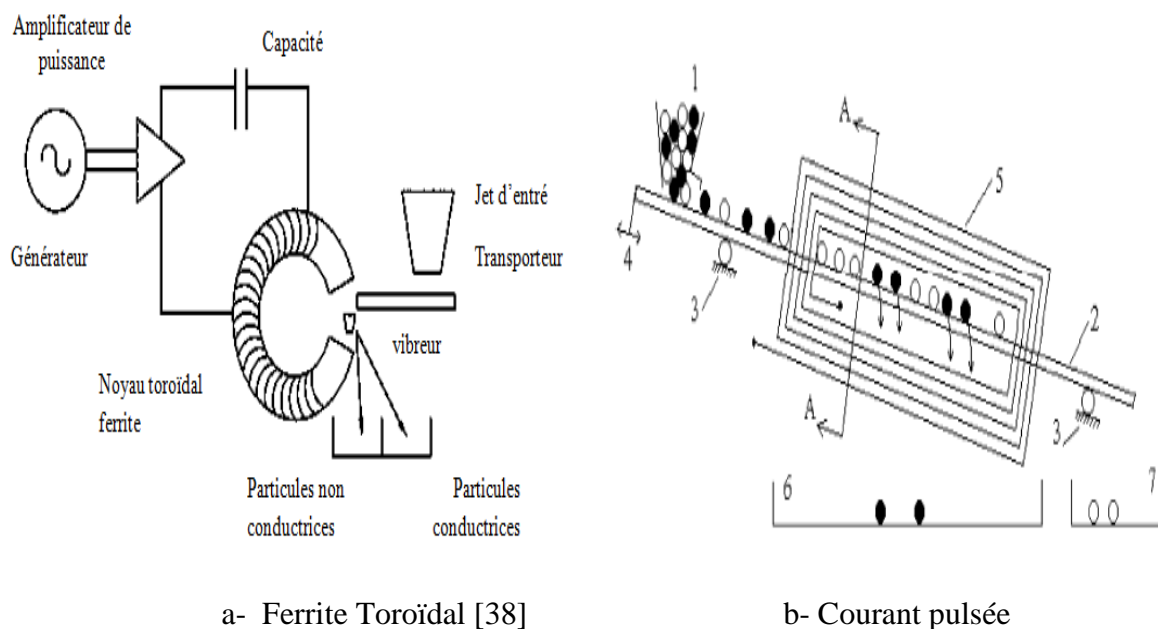
- ✓ Le mouvement de la particule.

L'induction magnétique agissant sur les particules par un séparateur rotationnel à disque ressemble à l'induction d'un séparateur vertical à courant de Foucault figure I.23.

F- Séparateur à courant de Foucault à haute fréquence

– Ferrite Toroïdal

Un noyau ferrite toroïdal enrobé par un enroulement excité par un courant alternatif à haute fréquence. La fréquence est choisie selon la résistivité spécifique du matériel visé. Pour expliquer la dimension particulière, l'utilisation de la méthode à haute fréquence a pour but la séparation des petites particules. Dans cette architecture on utilise le principe d'un champ magnétique variable dans un entrefer ou un champ oscille à haute fréquence sur la particule dans laquelle, le noyau reste statique. Il est possible grâce à la génération d'un signal avec des composants électroniques de faire la séparation des particules fines. Le schéma de séparateur à courants de Foucault à haute fréquence (HF ECS) est donné par la figure I.24-a [18, 29, 30,31,38,54].



a- Ferrite Toroïdal [38] b- Courant pulsée

Figure I.24 Séparateur à courant de Foucault à haute fréquence.

– Courant pulsée

La récupération des particules plus petites que 5 mm est une difficulté connue pour la plupart des systèmes de séparation à courant de Foucault. Cependant, l'utilisation de ce type de séparation est efficace pour des particules dans leur taille varie de 2 à 3 millimètres. Ce processus utilise un condensateur chargé à haute tension (2 - 5 kilovolts) et se décharge dans un enroulement placé à côté du jet du matériel. Le générateur d'alimentation produit des signaux sous formes d'impulsion pour cette raison il est nommé séparateur à courant de Foucault à des signaux pulsés (PECS). Ce dernier produit un champ magnétique variable intense, ce champ induit les courants de Foucault forts dans les particules conductrices qui sont à proximité de l'enroulement. Les forces répulsives se produisent alors entre ces particules et l'enroulement pour les séparer du jet [61].

Les avantages du système sont :

- La consommation de faible puissance ;
- Aucune pièce mobile ;

-Un taux de récupération élevé des particules ferreuses et non ferreuses (figure I.24-b) [10,11].

I.8 Conclusion

Ce chapitre résume les différents types de séparateur magnétique et leurs évolutions, ainsi que leurs principes de fonctionnement et ses caractéristiques techniques et magnétiques qui nous aident à mieux comprendre le principe de base de chaque séparateur. L'existence de différents types de séparateurs magnétiques explique l'importance donnée pour récupérer les métaux ferreux et non ferreux pour rétablir les quantités importantes de déchets qui existent dans notre vie quotidienne. Ainsi préserver la nature contre la pollution par le recyclage des déchets.

Dans le chapitre suivant nous allons se baser sur l'étude et la modélisation des caractéristiques magnétiques des séparateurs. Pour cela, quelques types de séparateurs à induction magnétique vont être développés dans notre travail.

CHAPITRE -II-

Formulation Mathématique Des Phénomènes Electromagnétiques

II.1 Introduction

Pour la simulation de n'importe quel dispositif de séparation magnétique nous aurons besoin des caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques des différents milieux. Le calcul et la représentation du champ magnétique produit aux bornes d'un séparateur sont gérés par les équations de Maxwell.

Le principe de la séparation à induction magnétique des particules d'un mélange non ferreux et ferreux repose sur le phénomène de l'induction 'électromagnétique'. La compréhension de ce phénomène est l'étape principale pour l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la conception et le dimensionnement des séparateurs efficaces et de répondre aux problèmes rencontrés lors de la séparation [20].

Dans notre deuxième chapitre on s'intéresse aux équations de Maxwell et aux modèles mathématiques des phénomènes électromagnétiques. Ainsi une simple présentation des méthodes numériques de calculs du champ magnétique est présentée. La méthode des éléments finis est utilisée pour visualiser et calculer la distribution des paramètres magnétiques autour d'un séparateur magnétique à l'état statique et rotationnel sans ou avec la présence des particules non ferreuses.

II.2 Théorie du champ

Le calcul du champ magnétique est basé essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme qui constituent le modèle du système décrit par les équations différentielles aux dérivées partielles de Maxwell [20].

II.2.1. Equations de Maxwell

La plupart des phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations aux dérivées partielles de Maxwell qui doivent être adaptées au milieu et à plusieurs domaines du dispositif à étudier [22]. Tout dispositif électromagnétique en tout point de l'espace obéit aux équations suivantes:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{Loi de Maxwell-Gauss} \quad (\text{II-1})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell-Faraday} \quad (\text{II-2})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Loi de Maxwell-Ampère} \quad (\text{II-3})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

\vec{E} : Champ électrique en (v/m)

\vec{B} : Induction magnétique en (T).

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

\vec{J} : Densité de courant en (A/m²).

\vec{D} : Induction électrique en (C/m²).

ρ : Densité de charge volumique en (C/m³).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m²).

À ces équations il faut rajouter les relations constitutives supplémentaires, afin d'améliorer les équations de Maxwell en fonction des propriétés caractéristiques des milieux, qui s'écrivent sous les expressions suivantes ;

- Propriétés magnétiques.
- Caractérisation diélectrique [22].

a-Propriétés magnétiques

Un milieu magnétique est caractérisé par les relations magnétiques, qui permettent d'exprimer l'induction magnétique en fonction du champ d'excitation pour les milieux isotropes on a :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{Relation magnétique} \quad (\text{II-5})$$

$$B = \mu H \quad \text{Induction du champ magnétique} \quad (\text{II.6})$$

Où

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{Pour un milieu magnétique} \quad (\text{II.7})$$

$\mu_r = 1$ pour un milieu amagnétique. μ_r perméabilité relative du milieu considéré

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ perméabilité du vide (H/m) [21, 34].

b-Caractéristiques diélectrique

Induction du champ électrique est donnée par :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad \text{Relation diélectrique} \quad (\text{II.8})$$

Où :

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ Avec ε_0 : Permittivité de l'air et ε_r : Permittivité relative du milieu considéré en (F/m).

Pour un milieu conducteur, la densité de courant est donnée par la loi d'Ohm généralisée :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Loi d'ohm}) \quad (\text{II-9})$$

Les densités des courants sont reliées entre eux par leurs milieux (conductivité électrique, perméabilité magnétique, etc.) à travers les équations exprimant les lois du comportement du milieu. L'expression détaillée des densités des courants est donnée par:

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

J_s : la densité de courant imposée dans l'inducteur et J_{ind} la densité du courant induit.

$$\vec{J}_{\text{ind}} = \sigma [\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}] \quad (\text{II. 11})$$

Où σ la conductivité électrique en (S/m), v le vecteur de vitesse en (m/s).

\vec{B}_r : Induction magnétique rémanente (cas d'aimants permanents) en (T).

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique \vec{E} et le terme $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement [21].

c- Relations de continuité entre deux milieux différents

Si le système est composé de deux milieux différents, les champs électriques et magnétiques des différents milieux sont liés à l'interface par des relations de continuité afin de relier deux milieux de propriétés électromagnétiques différentes. Soit deux milieux M_1 et M_2 . On appelle $(\vec{E}_1, \vec{B}_1, \vec{H}_1, \vec{D}_1)$: les différents champs de M_1 et $(\vec{E}_2, \vec{B}_2, \vec{H}_2, \vec{D}_2)$: et de M_2 . Soit \vec{n}_{12} la normale unitaire à la frontière entre M_1 et M_2 dirigée de M_1 vers M_2 (figure II.1).

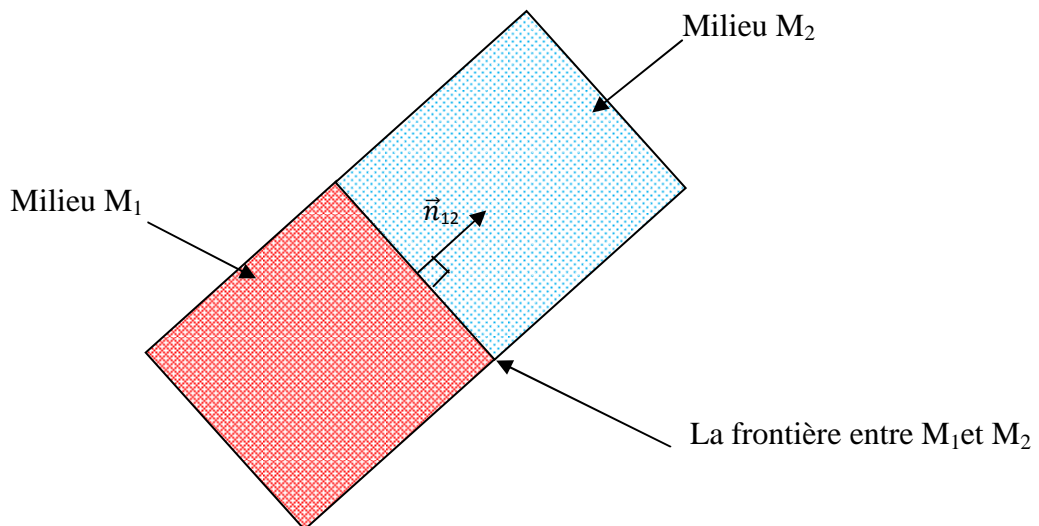


Figure. II.1 Interface entre deux milieux différents

Dans le cas général, un dispositif électrotechnique comporte des milieux différents (fer, air, aluminium, cuivre, ...etc.). Avant d'aborder la résolution du problème, il est nécessaire de connaître le comportement des champs électromagnétiques à travers l'interface entre deux milieux différents. En effet, la composante normale de l'induction B est continue au passage entre deux milieux différents [21,24].

d- Conditions de passage

La limite de séparation entre deux milieux de propriétés physiques différentes notés 1 et 2, les conditions de passage (transmission) permettant alors d'exprimer les relations entre deux grandeurs sur ces frontières, les grandeurs électromagnétiques pourraient être discontinues. Ces conditions sont traduites par les équations de type :

- La continuité de la composante normale de l'induction magnétique.

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II-12})$$

- La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent.

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (\text{II-13})$$

- La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{II-14})$$

- Discontinuité de la composante normale du vecteur d'induction électrique D , en présence de charges superficielles ρ_s .

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II-15})$$

Ici \vec{n} est le vecteur normal à l'interface dirigée du milieu vers un autre, \vec{J}_s est la densité surfacique de courant à l'interface et ρ_s densité de charge électrique surfacique à l'interface.

D'après les équations précédentes, on constate qu'il y a une continuité des composantes respectivement normale de l'induction magnétique \vec{B} et tangentielle du champ électrique \vec{E} et une discontinuité des composantes respectivement tangentielle du champ magnétique \vec{H} et, normale de l'induction électrique \vec{D} par la présence du courant et des charges surfaciques, à la traversée de la surface de séparation des deux milieux 1 et 2. Le système d'équations contient beaucoup d'inconnues et se prête donc mal à une résolution numérique [21,35].

En admettant les hypothèses suivantes :

L'électroaimant est alimenté par une source parfaite de courant et que l'induction rémanente \vec{B}_r dans le système étudié est négligeable. Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre deviennent [33]:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_s \quad (\text{II-16})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II-17})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-18})$$

II.3 Modèles électromagnétiques

La formulation mathématique des équations électromagnétiques à partir des équations de MAXWELL donne plusieurs modèles simplifiés comme :

- ✓ Modèle électrostatique ;
- ✓ Modèle électrocinétique ;
- ✓ Modèle magnétostatique ;
- ✓ Modèle magnétodynamique [35].

II.3.1 Modèle Electrostatique :

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas du temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce fait le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps [34, 35]:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II-19})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{D} = \rho \\ \operatorname{rot} \vec{E} = \vec{0} \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

La relation nous permet de définir le champ électrique en fonction du potentiel scalaire électrique V , telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V \quad (\text{II-21})$$

Le modèle se résume alors à l'équation suivante :

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} V) + \rho = 0 \quad (\text{II-22})$$

II.3.2 Modèle Electrocinétique :

Ce type de modèle concerne l'étude de la répartition des courants dans des conducteurs hétérogènes (connexion, jeu de barres, contact...) soumis à des tensions continues. Le terme $\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)$ reste nul, ce modèle est régi par le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = \vec{0} \\ \operatorname{div} \vec{J} = 0 \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

σ : est la conductivité d'un conducteur

V : potentiel scalaire électrique

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V \quad (\text{II-24})$$

En tenant compte des équations donner par (II-23) on trouve :

$$\vec{J} = -\sigma \overrightarrow{\operatorname{grad}} V \quad (\text{II-25})$$

Injectant cette dernière équation dans l'équation (II.23), on aboutit alors à l'équation globale du modèle :

$$\operatorname{div}(-\sigma \overrightarrow{\operatorname{grad}} V) = 0 \quad (\text{II-26})$$

La résolution numérique de ce genre d'équations est bien maîtrisée ; cela est dû particulièrement à la simplicité de la détermination des conditions aux limites [33,35].

II.3.3 Modèle magnétostatique

Dans ce type le terme $\partial B / \partial t$ est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

II.3.3.1 Modèle magnétostatique scalaire

Les courants électriques seront nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps. On obtient alors les relations :

$$\operatorname{Rot} H = J$$

$B = \mu H + Br$ la loi du milieu,

H : Dérive d'un potentiel scalaire magnétique \vec{V} , d'où la nomination du modèle magnétostatique scalaire, tel que : $H = -grad(\vec{V})$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$Div(\mu grad(\vec{V})) = Div Br \quad (II-27)$$

II.3.3.2 Modèle magnétostatique vectorielle

Ce modèle est caractérisé par des courants électriques non nuls. On a alors l'équation :

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot(\vec{A})\right) = \vec{J} + rot\left(\frac{1}{\mu} \vec{Br}\right) \quad (II-28)$$

II.3.3.3 Formulation en termes de potentiel vecteur

Le potentiel vecteur magnétique \vec{A} permet de simplifier les calculs et de diminuer le nombre d'inconnus. Ces formulations sont bien connues et très utilisées dans le domaine du calcul du champ électromagnétique. La relation de la conservation du flux magnétique permet de définir une fonction vectorielle A appelée potentiel vecteur magnétique tel que:

$$\vec{B} = rot(\vec{A}) \quad (II.29)$$

En effet, puisque le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire (f) est nul, donc tout vecteur : $(\frac{\partial A}{\partial t} - grad(v))$ satisfait la relation (II.29), d'où la nécessité d'imposer la condition de jauge afin d'assurer l'unicité de la solution. Nous proposons d'utiliser la jauge de coulomb pour assurer l'unicité de la solution:

$$div(\vec{A}) = 0 \quad (II-30)$$

En remplaçant B par $rot(A)$ de l'équation (II-19) dans (II-16), on obtient la formule du modèle magnétostatique vectoriel[34]:

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot(\vec{A})\right) = \vec{J}_s \quad (II-31)$$

II.3.3.4 Equation magnétostatique bidimensionnelle

Le modèle magnétique bidimensionnel est supposé symétrique par translation suivant la troisième dimension. Sa direction du vecteur de la densité du courant \vec{J} est perpendiculaire au plan simulé. Le problème reste donc stable suivant l'axe oz dans les coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

Le champ magnétique à deux composantes ox et oy , dans un plan perpendiculaire à \vec{J} , le potentiel vecteur magnétique \vec{A} est suivant la direction (oz) , qu'on désigne par $Az(x, y)$.

- Coordonnées cartésiennes

L'étude est faite dans un plan $[x, y]$ On a alors : $\vec{A}(0, 0, Az)$ et $\vec{J}(0, 0, Jz)$ Sachant que :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{A}) = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & Az \end{bmatrix} \quad (\text{II-32})$$

Où, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ sont les vecteurs unitaires dans le système cartésien suivant les axes ox, oy, oz .
Après développement on obtient :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{A}) = \frac{\partial Az}{\partial y} \cdot \vec{i} - \frac{\partial Az}{\partial x} \cdot \vec{j} \quad (\text{II-33})$$

$$\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot}(\vec{A}) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial y} \cdot \vec{i} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial x} \cdot \vec{j} \quad (\text{II-34})$$

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial x} \right) \cdot \vec{i} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial y} \right) \cdot \vec{j} + \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial y} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (\text{II-35})$$

Il est clair que les parties selon ox et oy , sont nuls, d'où l'équation précédente peut s'écrire :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \right) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial Az}{\partial y} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (\text{II-36})$$

Avec \vec{k} le vecteur unitaire selon \vec{oz} [26,27].

II. 3.4 Modèle magnétodynamique :

Ce modèle est caractérisé par le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ non nul. Les deux phénomènes magnétiques et électriques sont couplés, c'est-à-dire que la variation de champ magnétique dans le temps induit des courants de Foucault et des f.é.m. ce qui est le cas de tous les dispositifs dans lesquels les courants et les tensions électriques ne sont pas stationnaires [33, 34].

Le potentiel vecteur A joue un rôle important dans la connaissance de toutes les grandeurs physiques ou:

$$\begin{cases} \overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \\ \vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \end{cases} \quad (\text{II-37})$$

On doit ajouter les lois caractéristiques au milieu:

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II-38})$$

À partir de ces équations de base de ce modèle que nous pouvons déterminer l'équation décrivant l'évolution des phénomènes électromagnétiques dans un dispositif ou l'ensemble des champs présents en fonction du temps.

L'utilisation de ce type de formulation est très utile dans l'étude des transformateurs électriques, des machines industrielles et des dispositifs d'inductions magnétiques, ...etc [33,34].

II.3.3.4 Formulation de l'équation Magnétodynamique:

On se basant sur les équations de Maxwell, pour avoir l'équation qui décrit l'évolution spatiale temporelle des phénomènes électromagnétiques on a:

$$\text{rot } \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-39})$$

À partir de l'équation précédente on obtient:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial(\text{rot}\vec{A})}{\partial t} = \text{rot } \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \overrightarrow{\text{rot}} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \end{cases} \quad (\text{II-40})$$

Cela implique $E + \partial A / \partial t$ un champ conservation, il drive donc d'un potentiel scalaire électrique U tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}} U \rightarrow \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}} U \right) \quad (\text{II-41})$$

Le potentiel vecteur \vec{A} ne peut pas être défini par la seule condition $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$, on doit fixer sa divergence pour assurer l'unicité de la solution de l'équation aux dérivés partielle (E.D.P). Après modification et simplification nous aurons.

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \overrightarrow{\text{grad}} U - \sigma (\vartheta \wedge \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II-42})$$

On ajoute alors la condition $\text{div}\vec{A} = \vec{0}$ appelée la Jauge de coulomb nous aurons ainsi :

Les termes $-\sigma \partial A / \partial t$ et $(\vartheta \wedge \text{rot } \vec{A})$ représentent les densités des courants induits. Ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques [32].

Le terme $-\sigma \overrightarrow{\text{grad}} U$ décrit la densité des courants dépendant des conditions électriques impose aux extrêmes des conducteurs. Dans le cas où la pièce est immobile par rapport à l'inducteur et U est uniformément nul l'équation (II.40) devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II-43})$$

II.4 Conditions aux limites

Pour l'application des méthodes numérique (éléments finis) on distingue essentiellement deux types de conditions aux limites (conditions de Dirichlet et de Neumann).

Si le vecteur potentiel magnétique A est constant sur la frontière, ce qui veut dire que l'induction magnétique B est parallèle à ce contour qui présente alors une équipotentielle. On rencontre cette condition lorsqu'une partie ou bien tout le contour se trouve à une distance suffisamment éloignée des sources d'excitation, pour pouvoir négliger les valeurs du vecteur potentiel magnétique sur cette partie de la frontière par rapport aux valeurs de ce même potentiel à l'intérieur du domaine (c'est-à-dire on suppose que $A = 0$). Cette condition est la condition du Dirichlet[21, 34].

Dans le cas où on a la dérivée du vecteur potentiel magnétique A par rapport à la normale est différent de zéro, c'est-à-dire la condition aux limites de Neumann. Donc on spécifie les dérivées des valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières/limites du domaine.

II.5 Techniques de résolutions des équations aux dérivées partielles

Les méthodes de résolution des EDPs dans les milieux linéaires nous pouvons citer :

- la méthode des différences finies(MDF)
- la méthode des éléments finis(MEF)
- la méthode des volumes finis(MVF)
- la méthode des intégrales de frontières(MIF)
- la méthode des circuits couplés(MCC).

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation a pour but pour simplifier 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 la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques et du déplacement [33] .

II.5.1 Méthode des Différences Finis (MDF) :

Cette méthode est basée sur le théorème de Taylor avec un opérateur aux différences. Leur principe c'est de découper au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point où nœud de maillage, on obtiendra un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds de la grille.

Cette méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée est approchée par une différence de valeur de l'inconnue aux nœuds du domaine de résolution [35]. Considérons le domaine suivant:

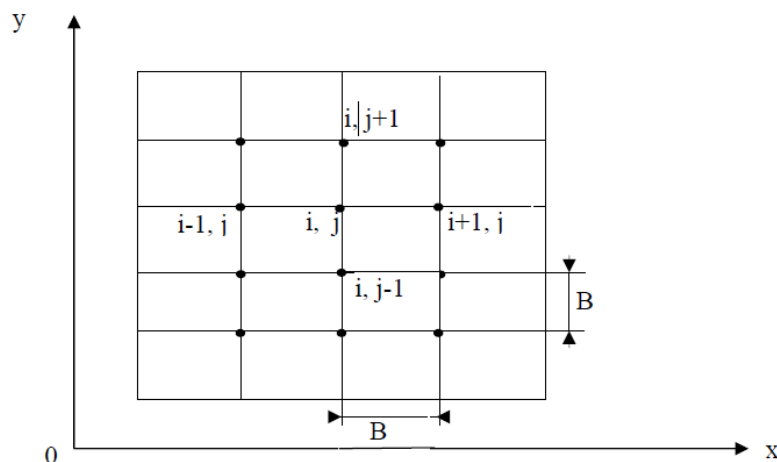


Figure II.2 Maillage type différences finies [35]

L'application d'un développement limité en séries de Taylor de la fonction à déterminer en chacun des nœuds du maillage, l'approximation des dérivées aux points (i, j) est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2B} \\ \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{f_{i,j+1} - f_{i,j-1}}{2B} \\ \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{B^2} \\ \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_{i,j} = \frac{f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}}{B^2} \end{array} \right. \quad (\text{II-44})$$

On déduit l'expression de Laplacien

$$\left\{ \begin{array}{l} (\Delta f)_{i,j} = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_{i,j} + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{B^2} + \frac{f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}}{B^2} \\ (\Delta f)_{i,j} = \frac{f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j+1} + f_{i,j-1} - 4f_{i,j}}{B^2} \end{array} \right. \quad (\text{II-45})$$

La méthode des différences finies est très attrayante à cause de sa simplicité pour des problèmes de géométrie régulière, par contre très difficile pour les problèmes à géométrie complexe et des conditions aux limites quelconques [35].

II.5.2 Méthode des intégrales de frontières (MIF) :

La méthode des intégrales de frontières permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. L'avantage du calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine à travers le théorème d'Ostrogradski-Green. Cette méthode est très utilisée pour les structures tridimensionnelles ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. L'inconvénient de cette méthode est l'augmentation du temps de calcul [34].

II.5.3 Méthode des Volumes Finis (MVF) :

La méthode des volumes finis se déduit de la MDF. Le domaine d'étude (Ω) est divisé en un nombre d'éléments finis à quatre nœuds, dans le cas bidimensionnel axisymétrique, un volume fini entoure chaque nœud [33].

L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection et puis intégrée dans chacun des volumes élémentaires du milieu.

Le calcul de l'intégrale d'un volume élémentaire, la fonction inconnue est représenté à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle,...etc.) entre deux nœuds consécutifs, et puis la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

Cette méthode existe depuis une vingtaine d'années elle est très utilisée en mécanique des fluides, sa solution est plus précise que celle fournie par la MDF. L'équation discrète obtenue exprime le principe de conservation de la fonction sur le volume de contrôle.

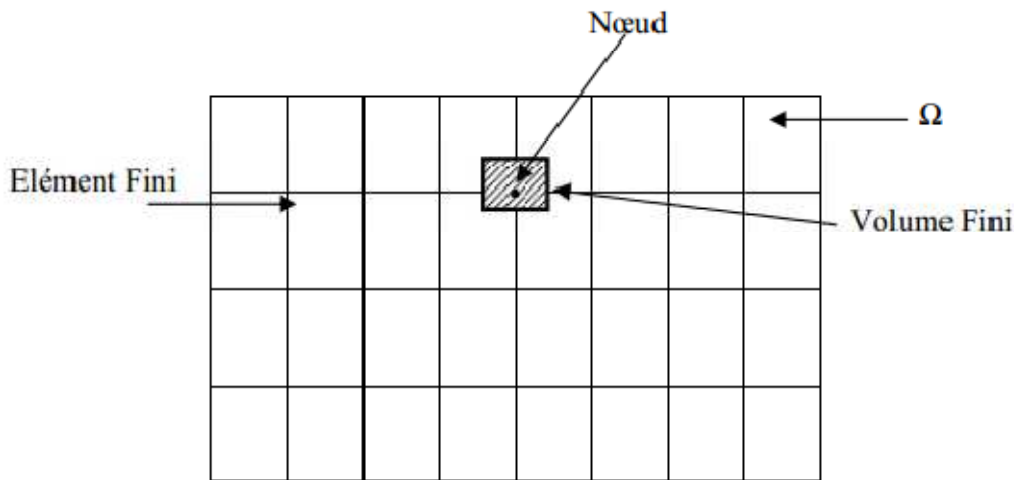


Figure II.3 Méthode des Volumes Finis

II.5.4 Méthode des Éléments Finis (MEF) :

La méthode des éléments finis est consacrée pour les géométries complexes et aux matériaux non linéaires. Elle subdivise le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis, voir la figure II.4. L'inconnue de chaque élément est exprimée par des fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. En tenant compte des conditions de continuité à l'interface et au passage entre les milieux.

Pour des structures bidimensionnelles, les éléments de maillage sont triangulaires, pour les problèmes tridimensionnels les éléments sont tétraédriques ou prismatiques.

L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non-linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important.

La méthode des éléments finis en 2D se basant sur l'approche résidus pondérés qui ne tient pas compte de l'aspect énergétique du problème traité. La méthode consiste à dissocier le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de premier ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments.

Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont

la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (nœuds) de la discrétisation. Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (sous domaine) [24].

Il existe différents types d'éléments :

- élément linéique (1D).
- élément surfacique (2D).
- élément volumique (3D) [24].

Pour notre cas le domaine d'étude, soit à deux dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage.

- ✓ Problème monodimensionnel (élément droit) :

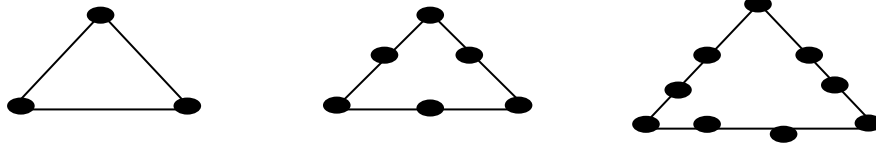


Linéaire (02 nœuds)

quadratique (03 nœuds)

cubique (04 nœuds)

- ✓ Problème bidimensionnel (triangle ou quadrilatère)



a)élément linéaire (03 nœuds) b) quadratique (06 nœuds) c)cubique (09 nœuds)

- ✓ Problème tridimensionnel

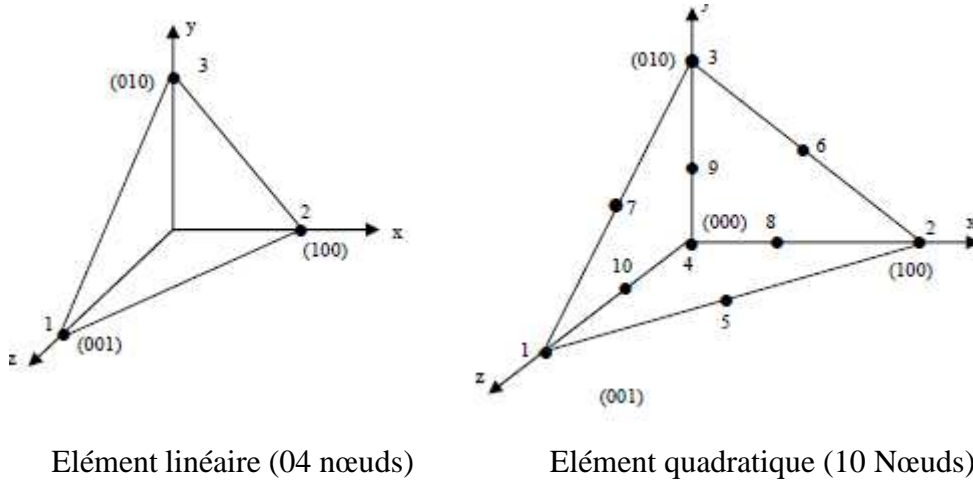


Figure .II.4 Discretisation du domaine d'étude (maillage) [32,35]

a- Fonction d'approximation

Le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans un milieu peut être trouvée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions doivent garantir la continuité du potentiel aux interfaces de discrétisation. Généralement on utilise des fonctions polynomiales [24].

Pour un élément triangulaire de premier ordre :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \tag{II-46}$$

$A(x, y, z)$, Solution de l'équation différentielle aux dérivées partielles vue de sorte que :

$A(x, z)$: la fonction ne dépend que de x .

$A(y, z)$: la fonction ne dépend que de y .

Pour un milieu ou un élément quadrilatéral :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \tag{II-47}$$

Ici a, b, c et d sont des constantes à déterminer.

L'étude du domaine entier contenant (n_e) éléments, le potentiel $A(x, y)$ est la sommation des potentiels de tous les éléments du maillage. On peut écrire donc :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} Ae(x, y) \tag{II-48}$$

n_e : est le nombre des éléments du maillage de milieu.

Le potentiel pour chaque point dans un domaine ainsi que la densité de courant sont définis en fonction des valeurs de ses sommets. Par exemple pour un élément triangulaire on a:

$$Ae = a + bx + cy = \sum_{i=1}^3 \alpha_i A_i \tag{II-49}$$

$$Je = a + bx + cy = \sum_{i=1}^3 \alpha_i J_i \quad (\text{II-50})$$

Avec α_i ce sont des fonctions d'interpolations, nommées fonction de formes. Ces fonctions de formes ont des propriétés données par :

$$\alpha_i(x_j y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{II-51})$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (\text{II-52})$$

Pour chaque élément triangulaire du premier on peut écrire que :

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{2s} [(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ \alpha_2 = \frac{1}{2s} [(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \\ \alpha_3 = \frac{1}{2s} [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \end{cases} \quad (\text{II-53})$$

S : la surface de l'élément triangulaire [24].

$$S = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (\text{II-54})$$

b- Formulation Intégrale

L'essentiel c'est d'avoir un système algébrique est la mise sous forme intégrale de l'équation EDP.

Comme avantage cette formulation nous permet d'avoir les expressions des éléments des différentes matrices et vecteurs du système algébrique élémentaire (dans un domaine).

La formulation intégrale peut être développée de deux manières:

- Variationnelle.
- Résidus pondérés.

b-1 Formulation Variationnelle

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre. Le principe de base de cette méthode variationnelle exige la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système. Cette fonctionnelle est résolue à partir du principe de l'action hamiltonienne qui définit l'existence d'une fonctionnelle du type intégral donné par:

$$\mathfrak{J}(A) = \int_{\Omega} L d\Omega \quad (\text{II-55})$$

L : La fonction de Lagrange qui assemble entre les énergies cinétique et potentielle du système. Ainsi que Ω c'est le domaine d'étude [24].

b-2 Résidus Pondérés

Cette méthode donc consiste à minimiser le résidu $R = 0$. C'est la méthode à base de projection de l'équation locale sur des fonctions de base d'un espace de fonctions à pondérations, pour but de minimiser le résidu par l'approximation de la fonction de l'inconnu, l'expression est la suivante:

$$\begin{cases} \int_{\Omega} R_i \phi_i d\Omega = 0 \\ R = DF(A) - g \end{cases} \quad (\text{II-56})$$

g : fonction définie dans le domaine de résolution, R est le résidu de l'approximation, $DF(A)$ est l'opérateur différentiel, ϕ_i est la fonction de projection et A est l'inconnu à trouver. Les valeurs de \vec{A} permettant d'annuler l'intégrale sont les solutions du système algébrique obtenu. Les méthodes qui dépendent de la méthode des résidus pondérés sont:

- ✓ La méthode des moindres carrés ;
- ✓ La méthode de collocation par point ;
- ✓ La méthode de GALERKINE.

Nous avons utilisé la méthode des éléments finis car on possède un logiciel CAO qui travail avec cette méthode et elle est facile par rapport aux autres méthodes.

II.6 Simulation dans le logiciel COMSOL

Pour la séparation d'un mélange granulaire de matériaux, il existe plusieurs facteurs qui influent sur ce phénomène tel que : l'intensité du champ magnétique généré par le système d'électroaimant ou l'aimant permanent, la distribution de ses lignes de champ, l'orientation de la taille des particules et la vitesse du jet,...etc. Dans le but d'expliquer le phénomène de séparation de nos dispositifs, nous allons passer en premier lieu à la simulation numérique [22,23].

Cette étude nécessite l'utilisation de deux logiciels suivants :

- COMSOL Multiphysics 4.3.
- MATLAB 7.12.0.

II.6.1 Dimension de la géométrie

Cette étape consiste à représenter le modèle en deux ou trois dimensions dans une interface graphique (le domaine d'étude) du logiciel COMSOL pour le premier exemple nous allons réaliser la forme géométrique du séparateur en 2D qui contient le cylindre et les aimants permanents ainsi que les particules non ferreuses.

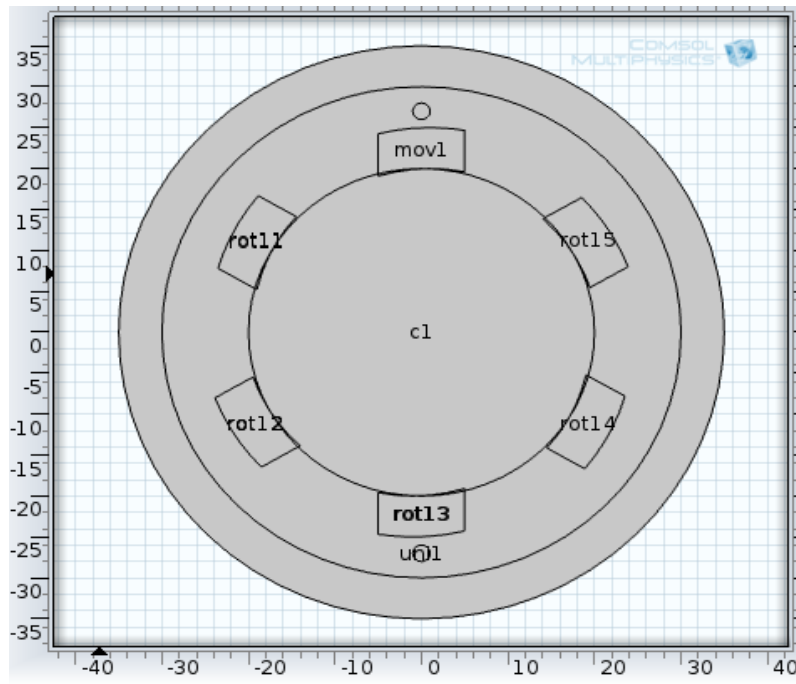
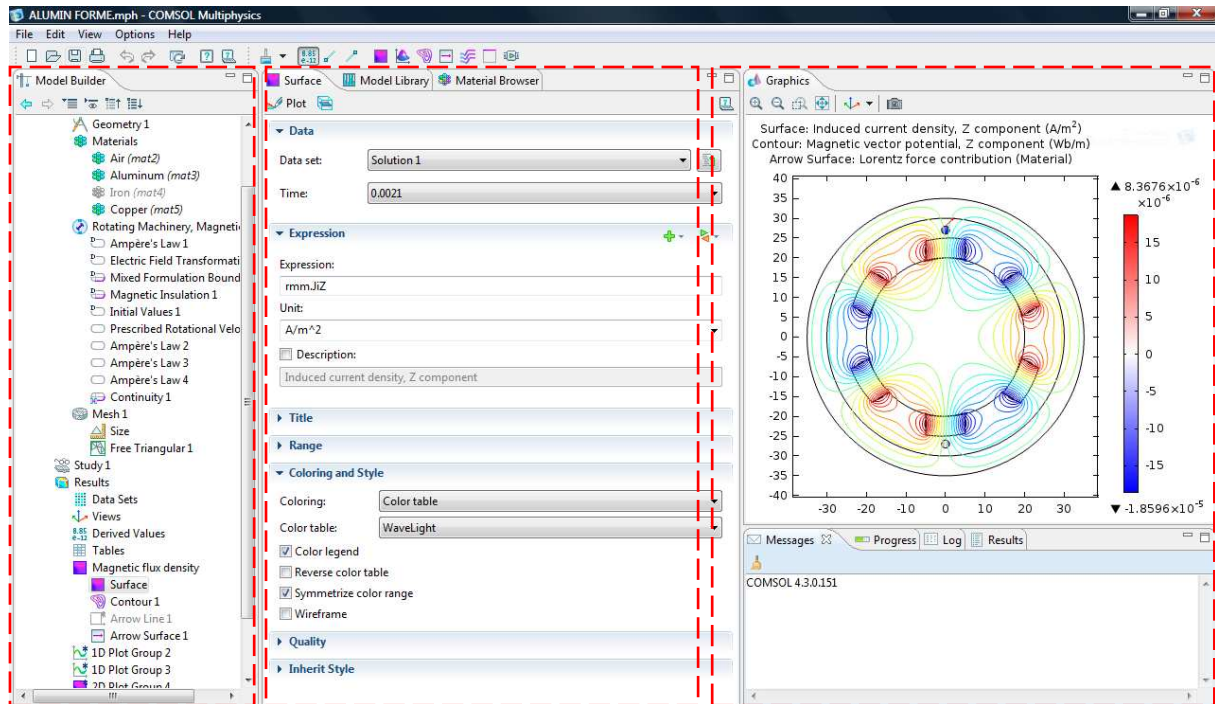


Figure II.5 Système de séparation réalisé sous COMSOL.

II.6.2 Processus de simulation sous COMSOL

Le logiciel COMSOL est fondé sur la méthode des éléments finis. Il permet d'effectuer le calcul du champ magnétique dans les deux domaines magnétostatique ou magnétodynamique. La possibilité de savoir la valeur du champ magnétique à n'importe quel point du domaine, et permettra de faire une étude de manière exacte, et de voir une bonne distribution du champ de n'importe quel système complexe.

COMSOL contient les différentes étapes du processus de simulation « définition de la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, choisir le domaine physique d'étude, résolution et l'exportation des résultats » sont intégrées dans une interface graphique, représentée par la figure II.6.



Construction physique

déclaration des paramètres

Géométrie à étudier

Figure II.6 : Présentation du logiciel COMSOL

II.6.3 Structure du programme

En premier lieu, nous allons présenter la structure de notre programme qui est constituée de trois parties. En se basant sur les équations de Maxwell données au début du chapitre, nous allons développer notre simulation.

Le programme développé sous l'environnement COMSOL est structuré comme suit:

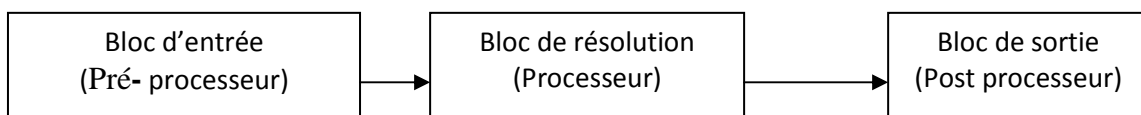


Figure II.7 Différents blocs du programme

A) Bloc d'entrée (Préprocesseur)

Dans ce bloc, nous trouvons les différentes données concernant la description de la géométrie du dispositif du séparateur à courant de Foucault, les particules, les différentes propriétés physiques, le calcul des coefficients des équations algébriques et les conditions aux limites.

Le bloc est constitué de trois parties : partie base de données, partie de maillage et partie d'affectation. Ces trois parties sont décrites comme suit :

A-1 Base de données

Cette partie est consacrée à la description de la géométrie du dispositif et englobe :

- Le nombre de régions du domaine d'étude.
- Les dimensions et la géométrie de chaque région.

A-2 Maillage

Le maillage est une discrétisation qui contient un nombre de nœuds, de triangles et d'éléments qui dépendent du système à étudier.

Les erreurs numériques inhérentes à la méthode des éléments finis sont le plus souvent dues au maillage [22].

A-3 Affectation

Cette partie est dédiée à l'introduction des propriétés physiques et électromagnétiques (Conductivité électrique, perméabilité magnétique) de chaque région selon le phénomène à étudier (thermique, magnétostatique, électrocinétique, magnétodynamique), en l'occurrence la densité de courant source.

L'espace de cette partie est utilisé pour le calcul de coefficients des équations algébriques à résoudre à partir des propriétés physiques de la partie précédente.

B) Bloc de résolution (Processeur)

Ce bloc est caractérisé par les équations algébriques discrétisées, par les méthodes de résolution telles que la méthode de Gauss ou Gauss Seidel. Les résultats du calcul permettent d'évaluer les composantes du vecteur potentiel magnétique, densité des courants induits, champs magnétiques, etc.....

Après avoir calculé le vecteur potentiel magnétique A , on peut déterminer les autres paramètres magnétiques le champ et l'induction magnétique et même mécanique comme les forces d'attraction à partir des équations développées auparavant.

C) Bloc de sortie (Poste processeur)

Ce bloc est destiné à l'affichage et la visualisation de toutes les grandeurs électromagnétiques, à savoir le vecteur potentiel magnétique, les lignes de champ magnétique.

Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique :

- sous forme numérique.
- sous forme graphique [23].

L'organigramme de la figure (II.7) représente les différentes étapes à suivre pour la résolution de l'équation (II. 36).

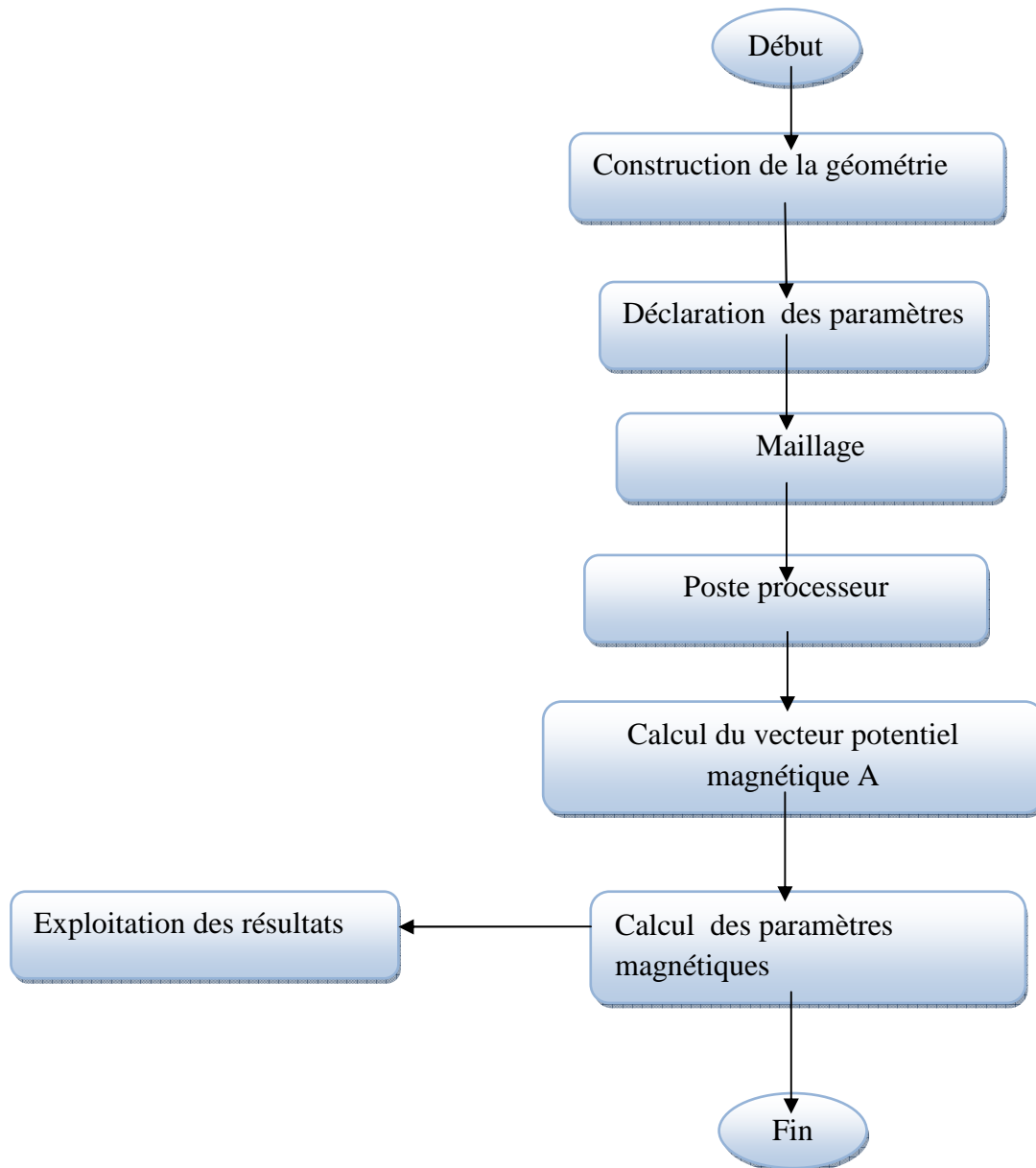


Figure II.8 Organigramme de la résolution numérique.

II.7 Calcul des forces électromagnétiques

L'évaluation des forces exercées sur les particules ferreuses mobiles dans un milieu électromagnétique peut se faire avec la connaissance de la répartition des forces autour de l'objet. Il existe plusieurs méthodes de calcul des forces qui agissent sur un matériau ferromagnétique avec des approches différentes à la notion de densité de force. Ces approches fondées sur:

- ✓ Le principe énergétique
- ✓ Le concept des sources équivalentes
- ✓ Le tenseur de maxwell

Elles sont simples et efficaces pour calculer la force globale. La méthode des éléments finis est très sensible à la qualité du maillage utilisé et les caractéristiques magnétiques extérieures au matériau influent sur le calcul des forces magnétiques globales [24].

- Tenseur de Maxwell

La force globale est décrite par l'expression suivante:

$$\vec{f} = \mu_0 \oint_S \left((\vec{H} \cdot \vec{n}) \vec{H} - \frac{1}{2} (\vec{H}^2) \vec{n} \right) dS \quad (\text{II-57})$$

Le passage d'une intégrale de volume à une intégrale de surface à travers le théorème de divergence, peut-être possible dans le cas d'un calcul numérique et résulte un gain de temps de calcul important, voir l'annexe A [24,25].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les différentes équations aux dérivées partielles (EDP), nous avons cité les méthodes de résolution des équations EDP pour notre cas nous allons utiliser la méthode des éléments finis en 2 D par l'utilisation du logiciel COMSOL pour la résolution. Après avoir spécifié certaines données telles que le domaine, les conditions aux limites, et le maillage de la géométrie. Après simulation, les résultats peuvent être exportés même vers l'éditeur MATLAB. La simulation des lignes de champ autour des particules dans un dispositif de séparation magnétique nécessite un outil de calcul numérique comme le logiciel COMSOL qui donnera les valeurs du champ magnétique dans chaque point du domaine d'étude.

Le chapitre suivant va être consacré à l'étude et à la réalisation d'un électroaimant pour la séparation des particules.

CHAPITRE -III-
Séparateur statique des
particules ferreuses

III.1 Introduction

Le principe de la séparation à induction magnétique des particules ferreuses de non ferreux repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique. La compréhension de ce phénomène est l'étape principale pour l'élaboration des modèles mathématiques destinés à la conception et le dimensionnement des séparateurs efficaces qui répond aux problèmes rencontrés lors de la séparation.

Dans cette perspective s'inscrit notre troisième chapitre. Nous allons faire une analyse en deux dimensions d'un séparateur statique à électroaimant pour le tri des particules ferreuses et non ferreuses en utilisant la méthode des éléments finis.

En connaissant les caractéristiques électriques, magnétiques et géométriques de différentes parties de notre dispositif, nous pouvons simuler la séparation magnétique et faire la représentation du champ magnétique produit aux bornes du séparateur.

La modélisation et l'implémentation du modèle électromagnétique sont faites sous le logiciel Comsol. La résolution des équations aux dérivées partielles est réalisée par la méthode des éléments finis. Nous allons exposer et traiter les résultats de simulation obtenues et on calcule les forces magnétiques d'attraction. Ce chapitre sera consacré à l'exploitation de ses résultats de simulation comme un premier pas pour faire la réalisation de ce dispositif de séparation expérimentalement pour trier un mélange de particules ferreuses et non ferreuses de différentes tailles nous faisons varier plusieurs paramètres afin de voir l'influence de ces derniers sur le taux de séparation. On termine ce chapitre par une comparaisant entre les résultats de simulation et d'expérimentation pour expliquer le phénomène de séparation non linéaire [36, 40].

III.2 Présentation et définition du modèle à étudier en 2D

Le modèle à deux dimensions est constitué de trois régions :

- L'air
- Noyau ferrite.
- Les deux bobines montées en série. La géométrie en deux dimensions est donnée par le schéma de la figure (III.1).

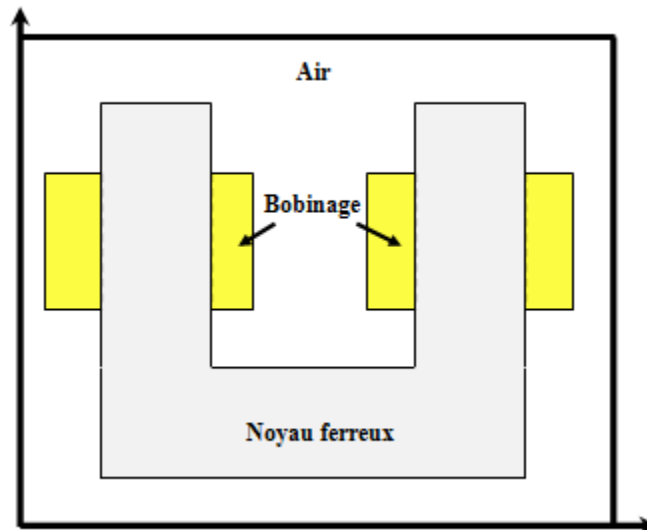


Figure .III.1 Géométrie du dispositif en 2D

II.3 Processus de simulation par le logiciel COMSOL

Cette étape consiste à représenter le modèle en deux ou trois dimensions dans une interface graphique. Dans le domaine d'étude du logiciel COMSOL nous allons dessiner la forme géométrique de l'électroaimant en 2D qui contient le bobinage et le noyau ferrite.

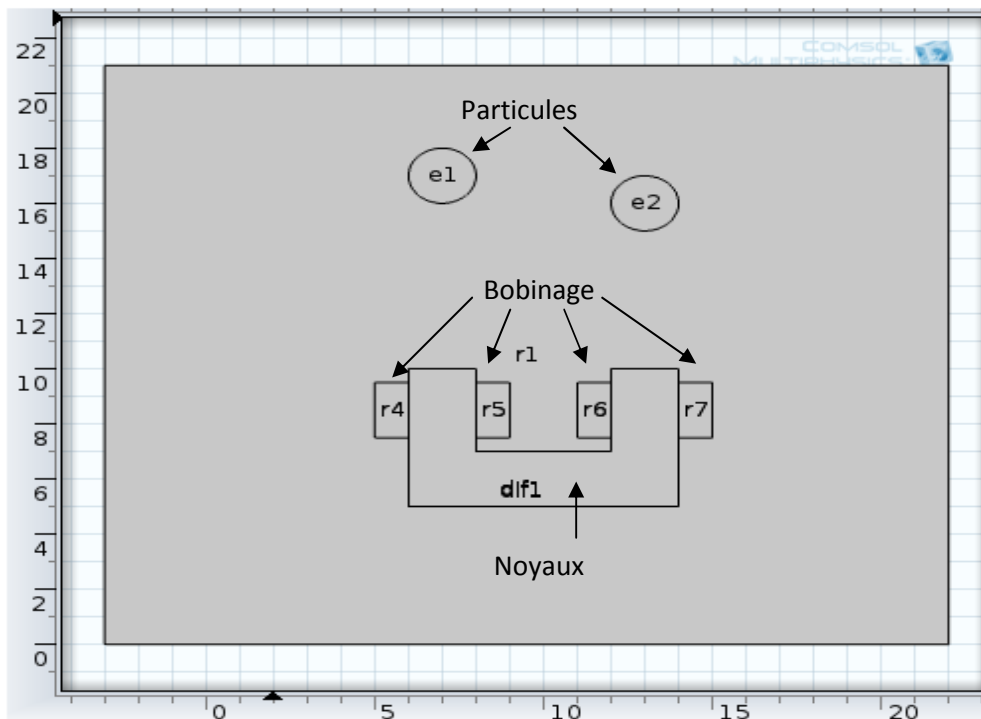
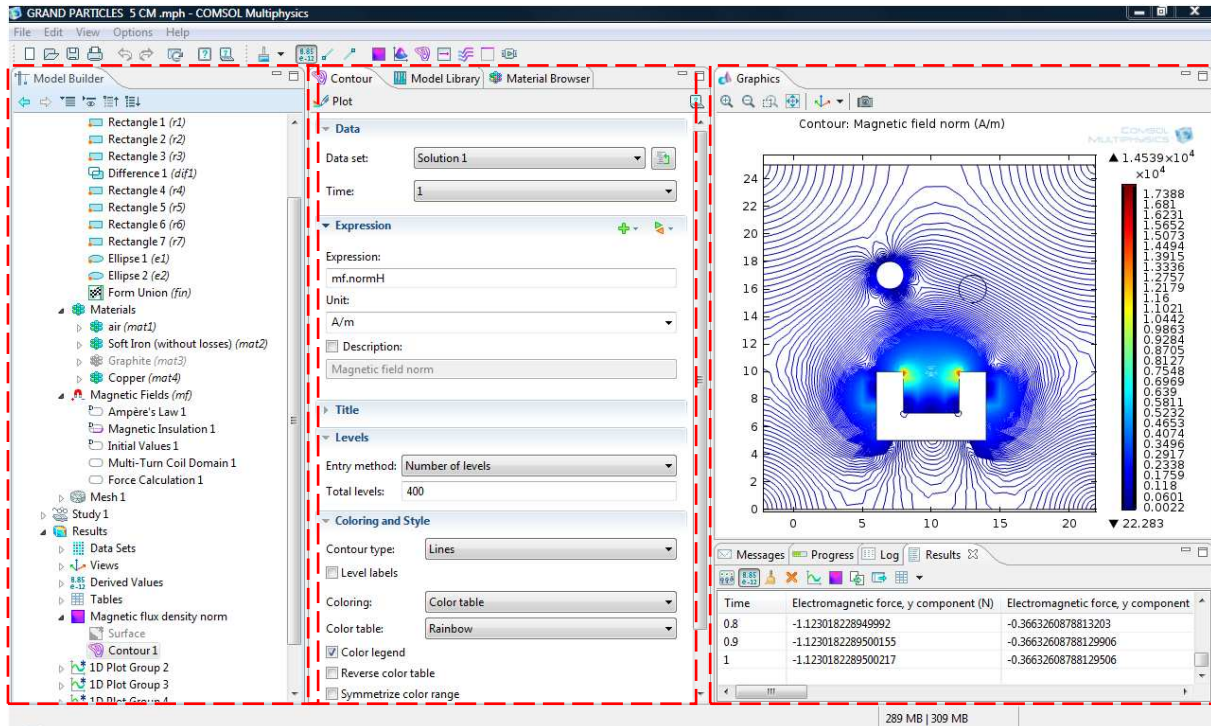


Figure III.2 Schéma du système de séparation sous COMSOL.

Le logiciel COMSOL Multiphysics, fondé sur la méthode des éléments finis permet d’effectuer le calcul du champ magnétique dans le domaine magnétostatique. Ce logiciel donne la distribution du champ magnétique dans des géométries complexes caractérisées par des paramètres non linéaires de chaque milieu du système [40].

Le logiciel COMSOL contient les différentes étapes du processus de simulation (définition de la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le domaine physique d’étude, résolution et l’exportation des résultats) qui sont intégrées dans une interface graphique, représentée dans la figure III.3 [36,40].



Construction physique

déclaration des paramètres

Géométrie a étudié

Figure III.3 : Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

Dans ce chapitre, nous donnons les différentes étapes pour l’exploitation du logiciel COMSOL utilisé pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP). En utilisant la méthode des éléments finis en 2D et après simulation les résultats peuvent être exportés vers l’éditeur MATLAB.

La modélisation numérique des lignes de champ autour des particules dans le dispositif de séparation électromagnétique nécessite impérativement l’utilisation d’un outil numérique de calcul comme le logiciel (COMSOL Multiphysics) qui donnera les grandeurs du champ magnétique dans chaque point du domaine d’étude.

III.4 Résultats de simulation

Pour mieux comprendre le phénomène de la séparation magnétique, nous définissons la nature de la force produite par le champ exercées sur les différentes particules. Nous allons présenter la distribution des caractéristiques magnétiques dans le milieu de séparation .La force magnétique dépend du champ magnétique et de sa distribution.

III.4-1 Dimensionnement du modèle à étudier en 2D

Le dimensionnement du dispositif à étudier en 2D est donné par la figure III.4.

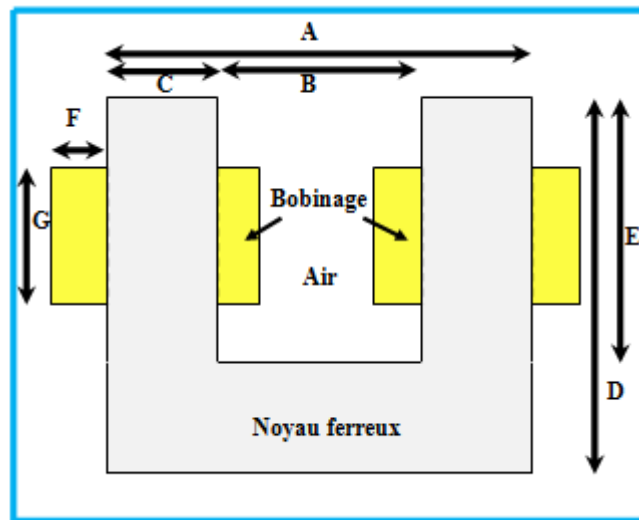


Figure III.4 : Géométrie et paramètres dimensionnels de l'électroaimant

Notre circuit magnétique a les dimensions suivantes : $A=8\text{cm}$, $B=4\text{cm}$, $C=2\text{cm}$, $D=5\text{cm}$, $E=3\text{cm}$, $F=1\text{cm}$, $G=2\text{cm}$.

En vue d'une modélisation magnétique, il est nécessaire de ramener les limites théoriques à une distance finie qui peut être aussi grande. Les conditions aux limites associées à l'équation électromagnétique sont du type de Dirichlet ($A=0$).

III.4-2 Maillage du domaine d'étude

La figure III.5 montre le maillage du domaine d'étude. Nous avons raffiné ce maillage aux bornes du noyau et à l'extrémité du bobinage de l'électroaimant pour avoir une meilleure précision de calcul.

On implémente notre modèle dans le domaine d'étude du COMSOL présenté par la figure (III.5), et en exploitant ce maillage, il en résulte trois matrices (p, t, e).

- La matrice (p), où matrice des points (nœuds), comprend les coordonnées du maillage.
- La matrice (e), où matrice des segments (arrête), englobe les indices et les sous-domaines de chaque segment.
- La matrice (t), où matrice des triangles (éléments), contient les indices des points et les sous-domaines de chaque triangle.

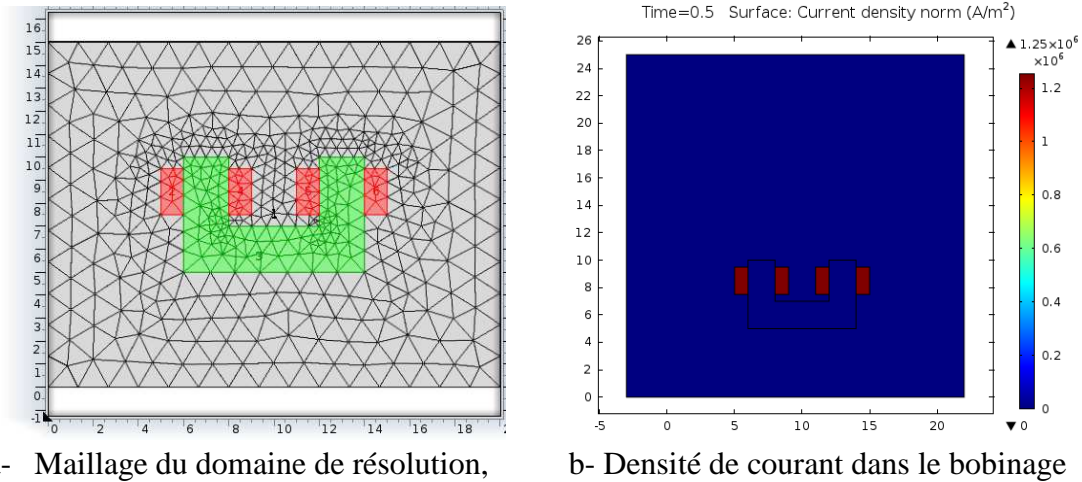


Figure III.5 : Présentation du modèle dans le COMSOL

III.4-3 Simulation des caractéristiques magnétiques du séparateur statique

Nous avons simulé un électroaimant constitué de deux parties. Le noyau ferrite est caractérisé par une perméabilité égale à 4000, une conductivité de $1.12e7[S/m]$, et de deux bobines en cuivre alimentées par un courant d'excitation de densité égale à 1A. Les résultats de simulation sont donnés comme suite:

Les densités de courant dans le bobinage sont représentées dans la première figure III.5 avec une densité uniforme d'une valeur absolue de l'ordre de $1.3 \cdot 10^6 A/m^2$. La figure III.6 correspond à la distribution du vecteur potentiel **A**. Elle montre une forte concentration de ce dernier au niveau du noyau de l'électroaimant, cette grandeur devient avec de faibles proportions de lignes on s'éloigne du séparateur [30,40].

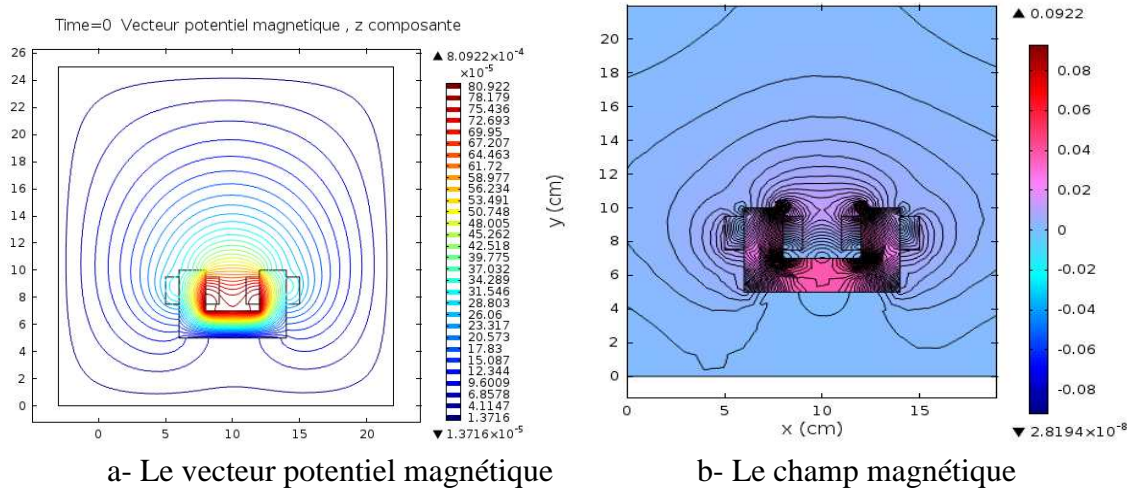


Figure III.6 : Caractéristiques magnétiques du séparateur statique en 2D

L'induction magnétique **B** élevée apparaît dans le noyau et à proximité de sa surface. La densité du champ magnétique est dispersée autour de l'électroaimant et aux endroits les plus proches du dispositif magnétique.

III-4-4 Séparateur avec un seul noyau ferromagnétique

a-Présence des particules de petite taille

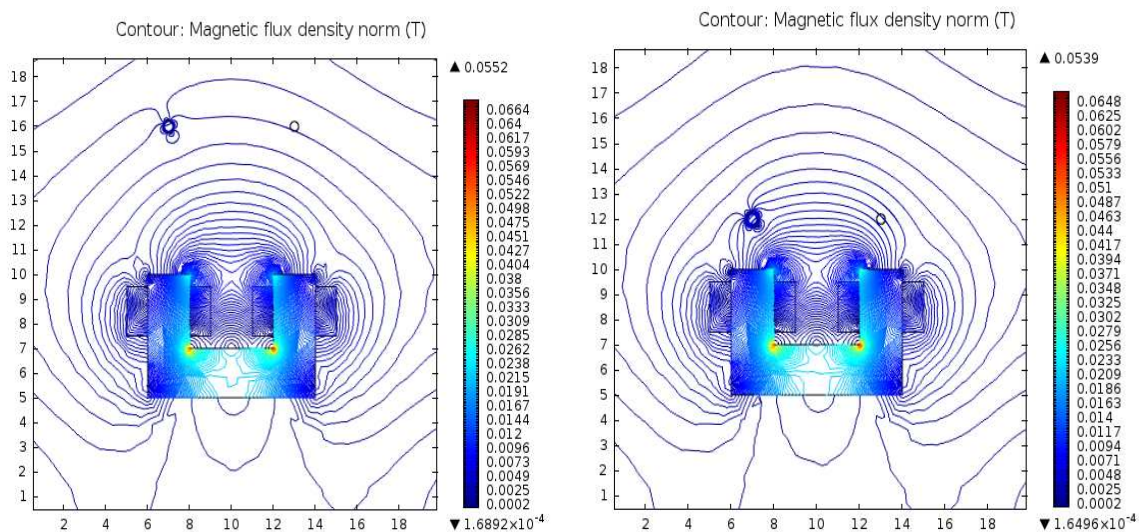
La présence des particules ferreuses (fer) et non ferreuses (aluminium et cuivre) proches des lignes de champ magnétique se traduit une attraction entre le séparateur à induction et les particules ferreuses. Pour les autres types de particules n'y aura pas d'interaction entre eux grâce à leurs natures non ferreuses. Ce phénomène peut être représenté et expliqué par la simulation de l'ensemble dans un milieu par l'utilisation du logiciel COMSOL. Les résultats de simulation sont représentés dans les figures suivantes :

a-1 Particules de petite taille proche du séparateur

Dans cette seconde simulation nous avons choisi une petite distance entre les particules et le séparateur de l'ordre de 2 centimètres pour visualiser les lignes de champ autour des matériaux choisis. Les particules de petite taille ont un diamètre de 4 millimètres (voir la figure III.7).

a-2 Particules de petite taille loin du séparateur

Dans cette partie nous avons choisi une grande distance entre les particules et le séparateur de l'ordre de 6 centimètres pour expliquer l'effet de la distance et voir les lignes de champ autour des matériaux utilisés.



a- Lignes du champ magnétique dans le séparateur et autour des particules

Figure III.7 : Séparateur avec un seul noyau ferromagnétique

D'après les résultats de simulation on peut constater que l'approchement des particules ferreuses du séparateur magnétique donne une bonne distribution du flux magnétique avec une densité très importante autour dans la surface de la particule. Ce qui sera traduit en réalité avec une force d'attraction importante. Par contre lorsque les particules seront éloignées il y aura moins de flux ou d'induction magnétique dans la particule, ainsi moins de champ autour d'elles et causera la réduction de la force magnétique. Pour les particules non ferreuses il n'y aura aucune action entre le séparateur et ces derniers grâce à la nature des particules.

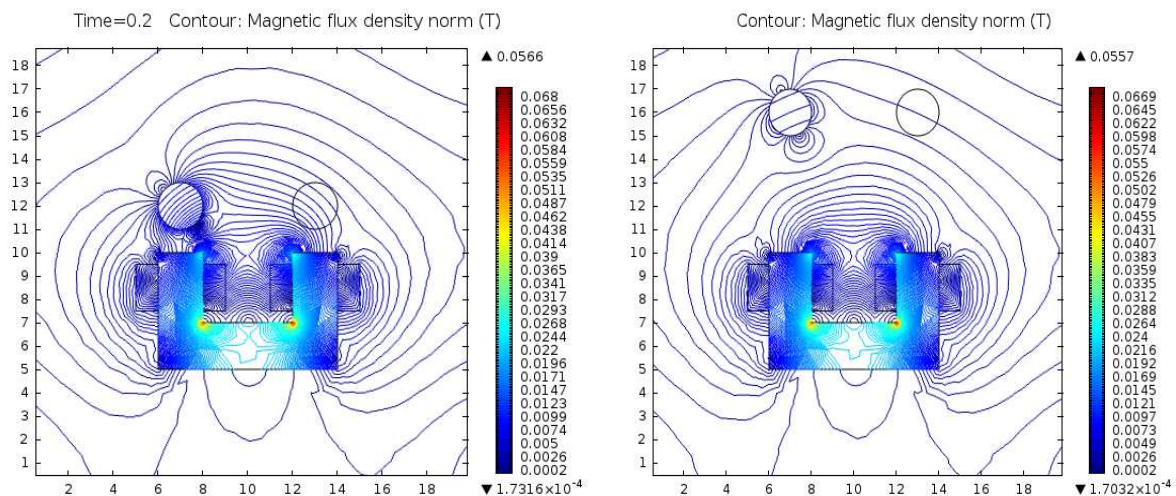
b-Présence des particules de grande taille

b-1 Particules de grande taille proche du séparateur

La taille des deux types de matériaux présentés précédemment (fer, aluminium ou cuivre) avec un diamètre de 2 cm pour les deux particules circulaires proche du séparateur magnétique [36,40].

b-2 Particules de grande taille loin du séparateur

Les particules ont un diamètre de 2 cm et la distance entre eux et le séparateur on va l'augmenter pour cette simulation. Les deux particules circulaires sont loin du séparateur magnétique. La représentation des résultats de simulation est donnée dans les figures suivantes :



a- Champ magnétique autour des particules

Figure III.8 : Séparateur avec un seul noyau ferromagnétique avec particules de grande taille

Les figures de simulation montrent l'influence de la taille des particules sur la distribution des caractéristiques magnétiques. Lorsqu'elles sont adjacentes on remarque des lignes avec une distribution intense autour de la particule ferreuse et une induction magnétique très importante à l'intérieur des particules.

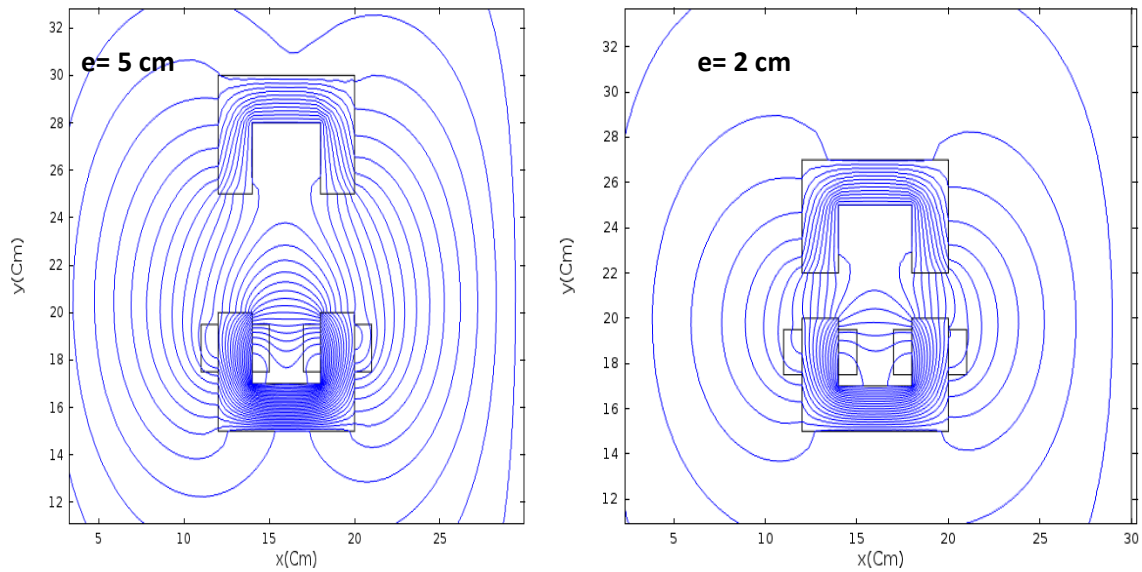
Si la particule ferreuse de grande taille est loin du séparateur, il y aura moins de lignes de champ autour d'elle, donc une distribution moins importante qu'une particule plus proche du séparateur. Mais sa surface accumulera une induction magnétique importante que celle d'une particule de petite taille dans la même distance.

Au contraire les particules non ferreuses ne sont pas affectées par le champ du séparateur électromagnétique grâce à leur nature.

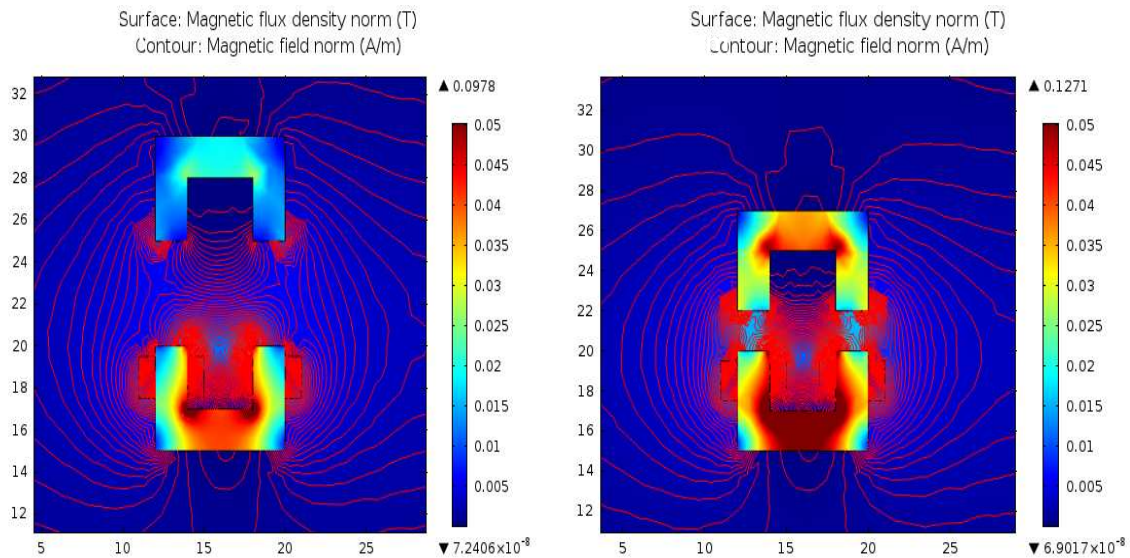
III-4-5 Séparateur avec double noyau ferromagnétique

L'utilisation d'un second noyau ferrite sert à canaliser les lignes de champ électromagnétique et minimiser les pertes dans l'air. L'objectif est de donner une grande efficacité de séparation.

Dans cette application nous allons varier la distance de l'entrefer afin de visualiser la distribution des grandeurs magnétiques pour le premier cas l'entrefer à une distance de 2 cm et pour le deuxième cas la distance est de l'ordre de 5 cm.



a-Distribution de l'induction magnétique dans séparateur.



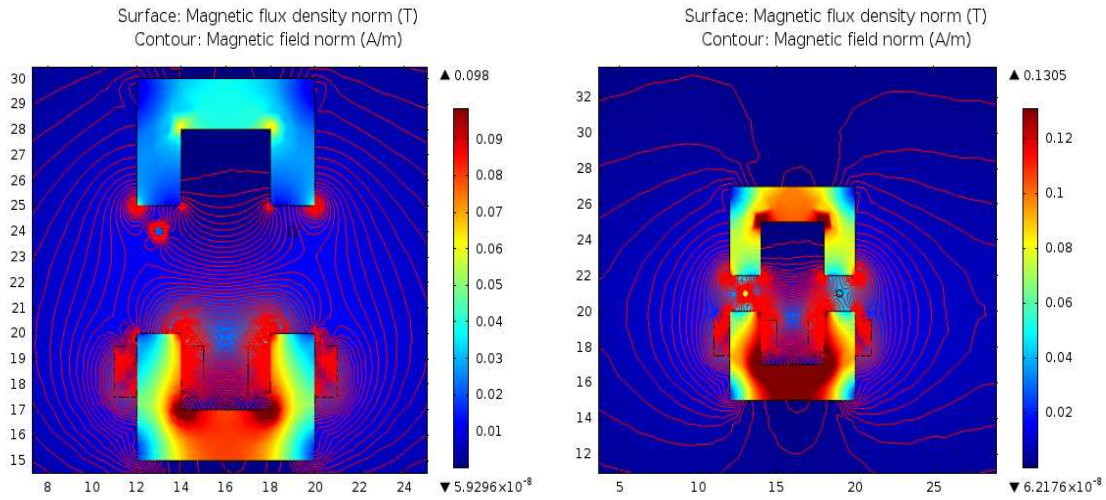
b-Distribution du champ magnétique dans l'entrefer à 2 et 5 cm.

Figure III.9 : Séparateur avec double noyau ferromagnétique

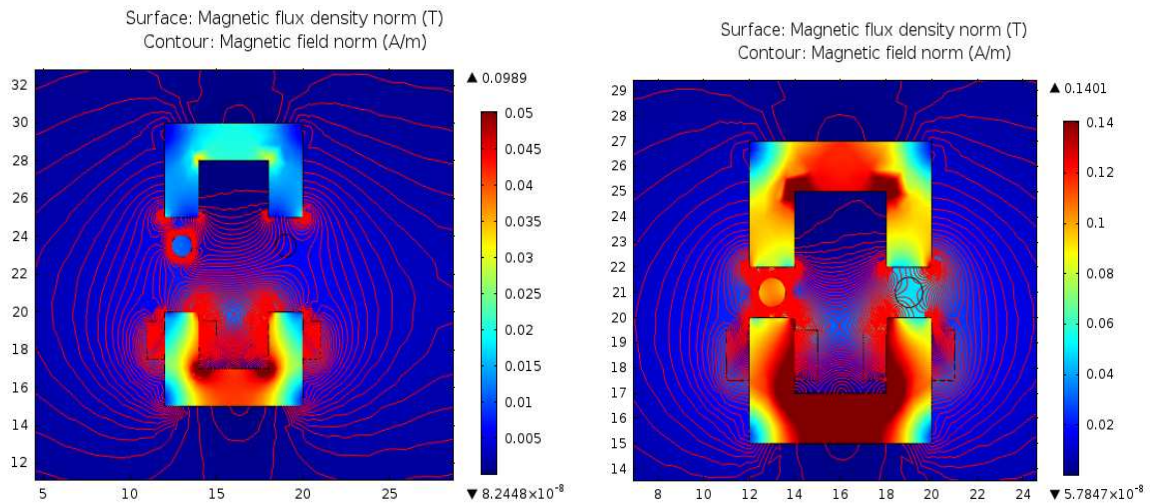
On peut constater qu'avec un entrefer petit la canalisation des lignes de champ magnétique dans l'entrefer est très importante. Mais lorsque la distance de l'entrefer entre les deux ferrites devient importante la distribution du champ sera moins intense dans l'entrefer qui causera moins d'interaction entre le jet des particules ferreuses.

a-Présence des particules dans le séparateur a double noyau

Dans cette étape les deux types de particules petite et grande taille seront simulées à l'intérieur de l'entrefer à deux valeurs différentes (2 et 5 cm) :



a-Distribution des lignes de champ magnétique autour des particules fine



b- Distribution des lignes de champ magnétique autour des particules de grande taille.

Figure III.10 : Séparateur à double noyau ferromagnétique avec des particules.

1-Petites particules

Le rôle essentiel de la présence d'un deuxième noyau expliquera l'alignement et la récupération des lignes de champ perdues dans l'espace ce qui sera traduit par une bonne distribution autour de la particule ferreuse fine et une amélioration de séparation. Le petit entrefer donne une distribution très importante dans la particule ferreuse par rapport à un grand entrefer [40].

2- Grandes particules

Pour le deuxième cas nous allons choisir des particules de grande taille (les boulons) leur distribution est importante grâce à la grande surface qui résulte un champ important autour d'elles. Si on augmentera la distance d'entrefer le champ diminuera mais il sera important par rapport au champ du séparateur avec un seul noyau ferromagnétique.

b- Variation du courant d'excitation du bobinage

Dans cette partie nous allons faire varier le courant d'excitation du bobinage afin de voir l'influence de ce dernier sur le champ produit autour d'un pôle de séparateur(entrefer de 0 à 7.7cm). Cette variation expliquera le changement de la force d'attraction des particules ferreuses qui dépend de l'induction magnétique montrée dans la figure III.11. On peut conclure que l'élévation du courant entrainera une induction importante et résultera théoriquement une force d'attraction suffisante pour attirer les particules de fer.

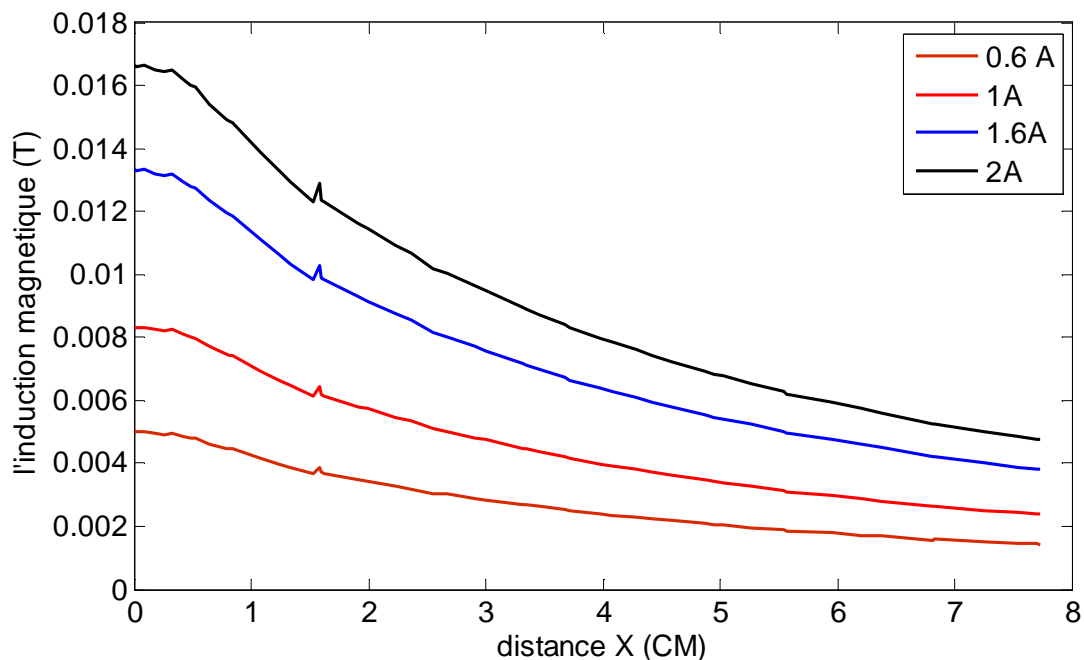
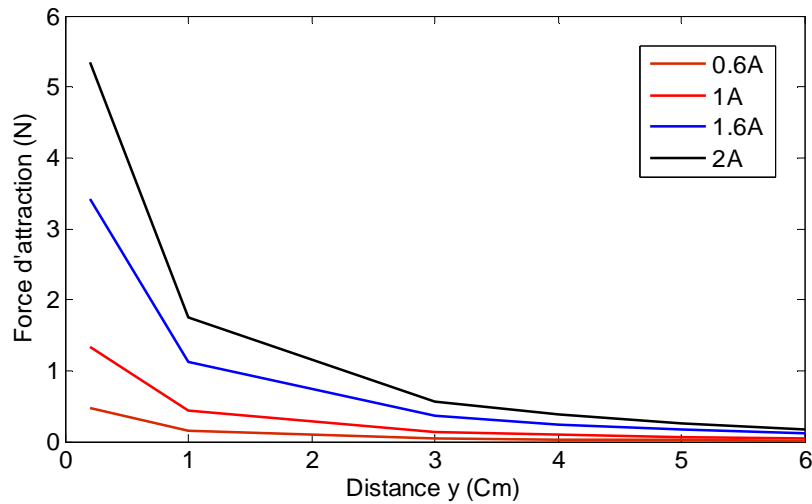


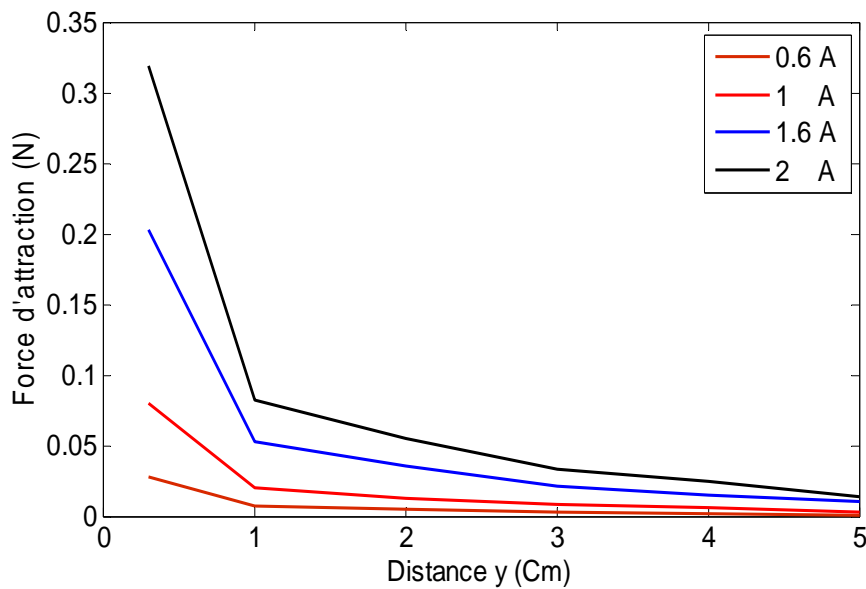
Figure III.11 Influence du courant d'excitation sur l'induction magnétique

c- Calcul de la force magnétique d'attraction

Le calcul de la force d'attraction exercée sur les particules ferreuses dépend de la distance entre le jet du mélange et les extrémités du séparateur. Ce calcul montre que la force est proportionnelle et dépend de l'entrefer et du courant d'excitation. Lorsque le courant augmente le champ généré croît et la force devient importante. Le calcul de la force magnétique se fait par les équations développées dans l'annexe A avec le logiciel COMSOL. Après simulation nous avons exporté les résultats vers le logiciel Matlab pour les représenter dans les figures suivantes.



a- Grande particule



b- Petite particule

Figure III.12 Calcul de la force d’attraction en fonction de la distance y

Si on compare les résultats obtenus des forces exercées sur les particules de même nature et les différentes tailles on peut conclure que:

Lorsque la taille des particules devient petite de l’ordre de 4 mm de diamètre la force magnétique d’attraction démunira mais pour les grandes particules de 2 cm la force magnétique augmente.

d- Variation de l’entrefer

Pour cette deuxième application nous allons comparer l’induction magnétique produite par un seul électroaimant et l’induction d’un électroaimant à deux noyaux avec un entrefer de deux centimètres. Pour la même application précédente nous allons augmenter la distance de

l'entrefer à 5 cm pour un courant d'excitation de 1 Ampère les mesures sont faites dans l'entrefer voir figure III.13.

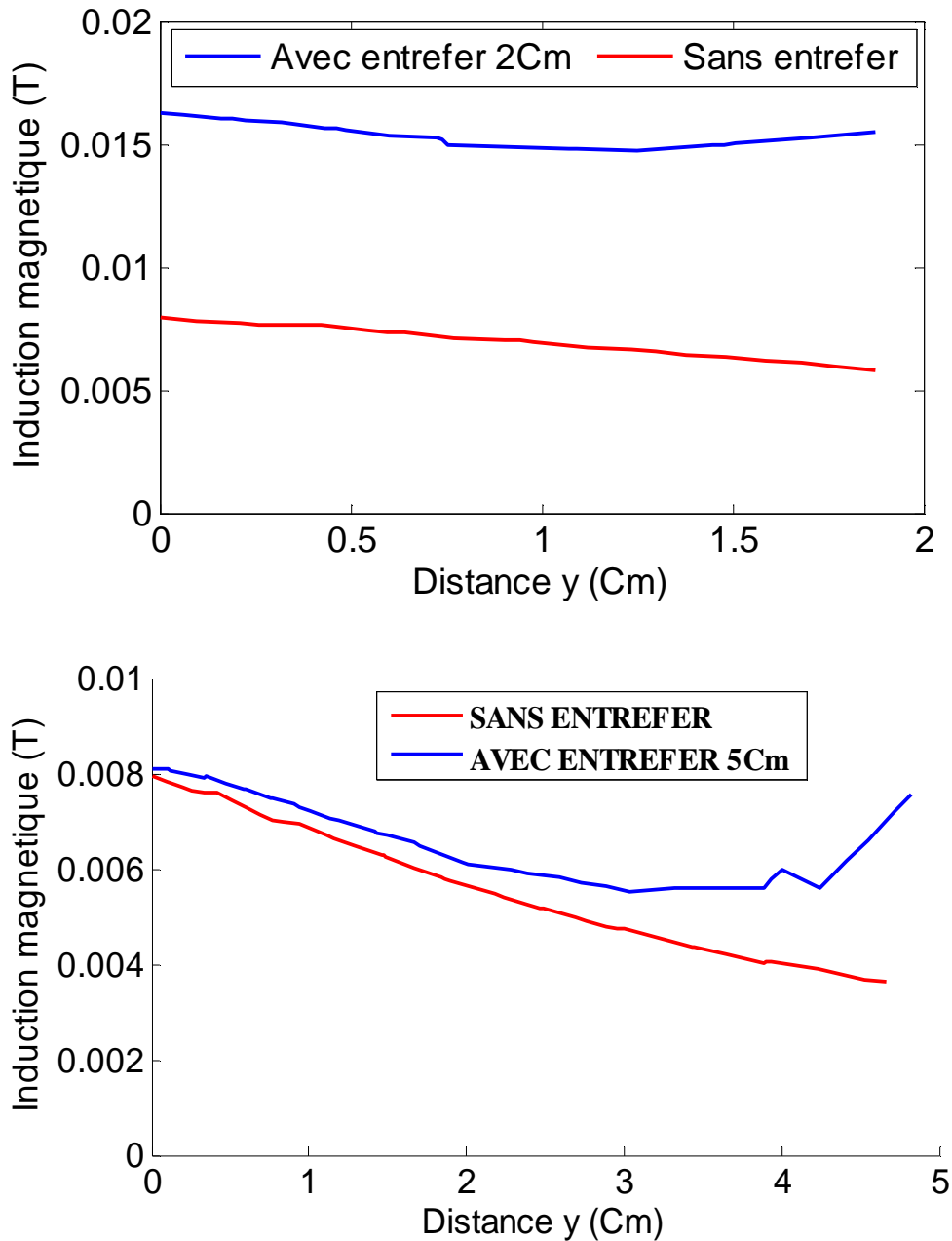


Figure III.13 Induction magnétique en fonction de la distance d'entrefer

On peut conclure que l'induction magnétique devient importante quand il y aura un deuxième noyau qui sert à la canalisation des lignes de champ. La distance entre ses deux noyaux influe sur l'intensité de l'induction magnétique. Cette dernière augmente si la distance est petite inférieure à 2 cm. Quand la distance d'entrefer augmente l'induction diminue, mais elle commence à augmenter dans la deuxième extrémité du second noyau car il est formé une boucle magnétique fermée. Dans le cas d'absence du deuxième noyau l'induction devient moins importante [40].

III.5 Réalisation du séparateur statique à induction magnétique

III.5-1 Étude expérimentale du séparateur statique

Dans notre travail nous allons réaliser deux types de séparation tout en variant la tension d'alimentation entre 10 et 30 volts :

- Le premier est juste avec un seul noyau.
- Le deuxième type consiste à utiliser un entrefer tout en jouant sur la distance entre les deux noyaux.

III.5-1-1. Description du dispositif électromagnétique

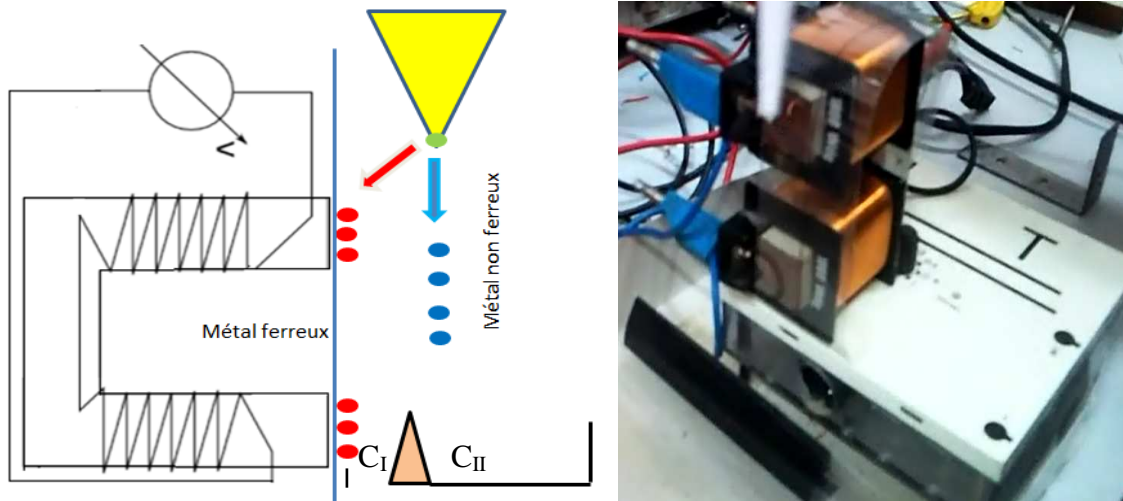
Dans notre projet le dispositif électromagnétique c'est un électroaimant représenté dans la figure III.14. Sa configuration physique, permet d'attirer les types de matériaux ferromagnétiques. Il est constitué de deux bobines en série de 1000 tours chacune, et un noyau ferrite de géométrie appropriée et définie dans la figure III.4. Lors du passage d'un courant à travers la bobine, elle génère un champ magnétique qui produit un flux dans le noyau. Ce dernier génère un champ magnétique qui attire les particules ferromagnétiques, d'où il aura une séparation entre les particules ferreuses et non ferreux.



Figure III.14 : Photographie de bobines et du noyau [40].

a-Principe du séparateur statique

Dans le premier modèle de séparation, nous avons réalisé le dispositif à électroaimant suivant la figure III.15-b. Il existe deux collecteurs de particules le premier plus proche de l'électroaimant qui collecte le fer (C_I , Fe) et le deuxième collecteur plus loin qui récupère les particules non ferreuses (C_{II} , Cu). Le jet des particules sera à une distance horizontale de 5 cm loin du séparateur et à une distance verticale de 12 cm.



a- Principe de séparation des particules b- Séparateur à électroaimant

Figure III.15 : Modèle de séparation avec induction électromagnétique

b- Réalisation du circuit d'alimentation de dispositif magnétique

L'excitation de l'électroaimant se fait par un circuit électronique pour générer le signal voulu qui excite les bobines. La description de ce dernier est donnée dans la figure III.16. Notre circuit est caractérisé par une source de tension continue de 30 volts un variateur de tension du type LM723, de deux transistors de puissance, de deux potentiomètres pour varier l'intensité qui attaque notre bobine a aimanter (pour avoir une variation d'attraction magnétique), des résistances et un condensateur voir tableau III.1 et la figure III.6 [30,40].

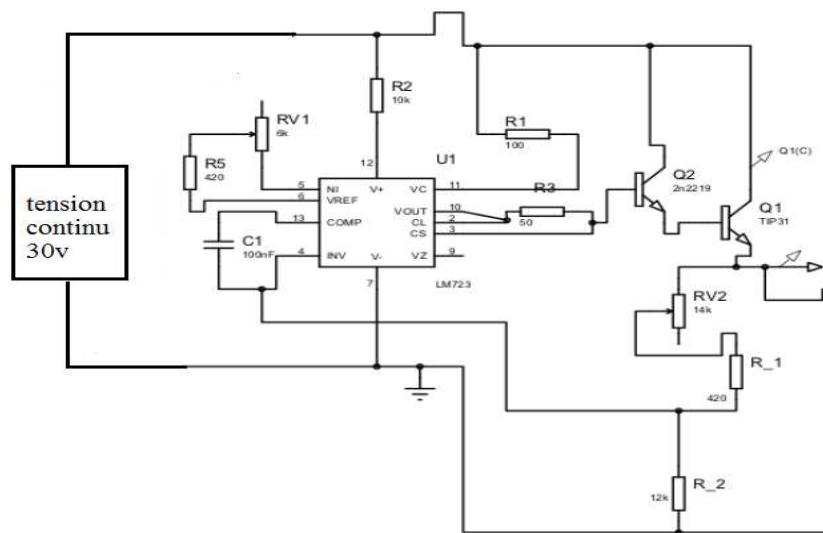


Figure III.16 : Schéma détaillé du circuit électrique [30].

Tableau III.1 : Liste des éléments du circuit électrique.

L'élément	Code ou valeur
JFET	2n2219, TIP31
Résistances	100,420, 10k, 12k
Potentiomètres	6k ,14k
Condensateur en céramique	100n [F]
Variateur de Tension	LM723

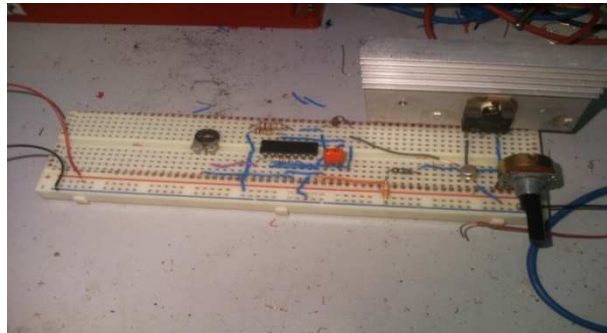


Figure III. 17 : Photo de la plaquette du circuit imprimé.

c- Préparation des échantillons:

Nous allons faire la séparation des échantillons avec différentes tailles :

- Dans le premier test le mélange est constitué de cuivre et de fer pour chaque matériau la taille varie entre 1 et 2 millimètres (Figure III.18-a).
- Dans le deuxième cas nous allons prendre 20 g de fer constitué de boulons et d'écrous avec une taille de (7 à 15 mm) mélangé avec 20 g de cuivre d'une taille de (4 à 8 mm) (Figure II.18-b).



a-Petite taille

b-Grande taille

Figure III.18 : Particules cuivre/fer utilisées dans les essais de séparations

III.5-2 Tests de séparation avec électroaimant:

III.5-2-1 particule en poudre :



Figure III.19 : Essai avec une tension de 20V

Lors de la chute de mélange, les particules de fer sont attirées et accrochées avec les deux extrémités du noyau alors que le cuivre tombe dans le récipient; la séparation était facile et ne prend pas beaucoup de temps pour séparer les particules. Quand supprime la tension (éteindre le générateur de tension) les particules de fer tombent dans le collecteur.

Nous varierons la tension d'alimentation, pour voir l'influence de la tension sur l'intensité du champ qui influe sur le rendement du séparateur en mesurant la quantité de fer séparé du reste de mélange (Figure III.20).



a- Tension de 10V

b- Tension de 25V

Figure III.20 : Résultat de la séparation avec différentes tensions.

Le tableau III.2 suivant décrira ces mesures:

Tableau III.2 : Quantité de mélange séparé en fonction de variation de tension d'alimentation.

Tension en (volt)	30	25	20	15	10
C_I (Fe g)	10	7.3	7.1	6.9	1.9
R_{Fe} (%)	100	73	71	69	19

Avec, R_{Fe} (%) : Le pourcentage de récupération ou de rétablissement des particules ferreuses. le poids des deux collecteurs est mesuré à l'aide d'une balance électronique.

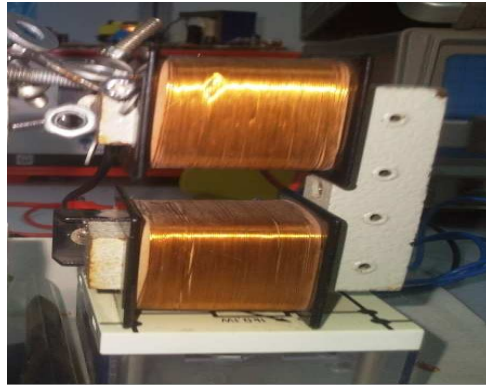
III.5-2-2 Particules de grande taille :

Figure III.21 : Essai avec une tension de 20 V

La séparation avec ce type de mélange est plus facile et avec un bon rendement de séparation. Avec 20g de fer, on a mesuré le taux de récupération en fonction de la variation de tension d'alimentation, le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableau III.3 : Quantité de mélange séparé en fonction de la tension d'alimentation.

Tension en (volt)	30	25	20	15	10
C I (Fe g)	20	16.4	15.3	5	0
C II (Cu+ Fe g)	20	23.6	24.4	35	40
Masse tot (g)	40	40	40	40	40
R Fe (%)	100	82	78	25	0

Discussion :

Lorsqu'on augmente la tension le circuit électronique injecte un courant important dans le circuit magnétique et on obtiendra un champ magnétique intense donc une force d'attraction élevée. Les résultats sont représentés dans les tableaux précédents de récupération du fer séparé en fonction de la variation de la tension. On peut résumer le taux de récupération des deux tableaux précédents (grande et petite taille) en fonction de la tension d'alimentation représentée dans le graphe suivant:

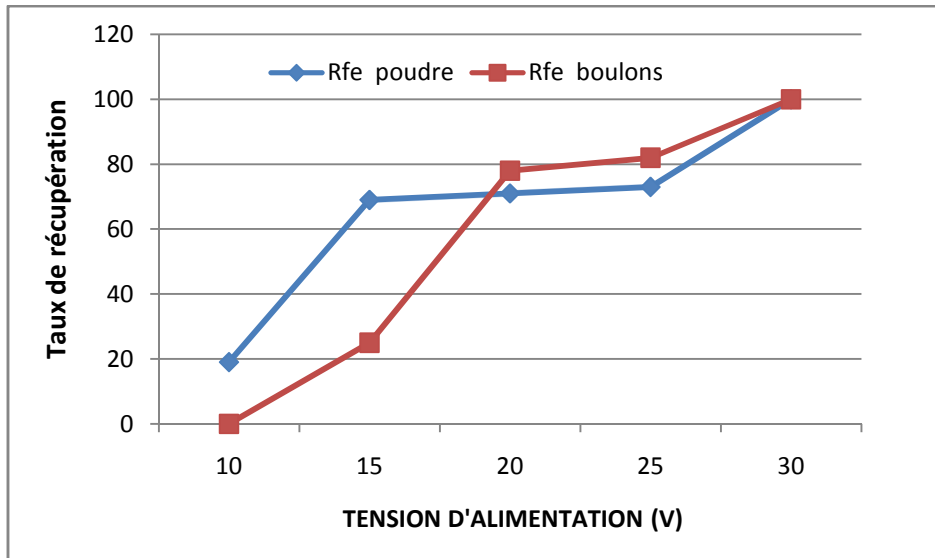


Figure III.22 : Taux de récupération de fer en fonction de la tension d'alimentation

On constate que la séparation s'améliore et devient meilleure en augmentant la tension excitation (le courant d'excitation) qui génère un champ important et intense à l'extrémité du séparateur à induction. La force d'attraction devient très importante et forte et nous offrons un taux de récupération de particules ferreuses importantes figure III.22.

Pour le choix de la taille des particules on peut dire que la séparation de la poudre donne des résultats de séparation acceptables même à faibles valeurs de tension entre 15 et 25 volts. La force de gravité et l'accélération des particules en poudre sont moins importantes, par rapport aux grandes particules qui nécessitent une très forte force d'attraction pour les attirer vers le séparateur. Il existe plusieurs facteurs qui influent sur la séparation par exemple la hauteur du jet de mélange...

III.5-3 Séparation avec un entrefer :

Dans ce type de séparation nous allons jouer sur deux paramètres le premier c'est la tension d'excitation et le deuxième est la variation de la distance (entrefer) qui sépare les deux noyaux figure III.23.

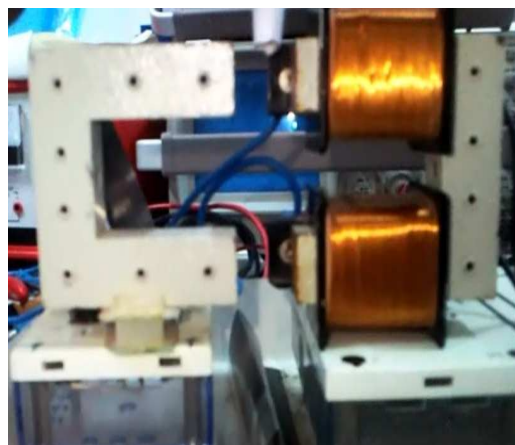
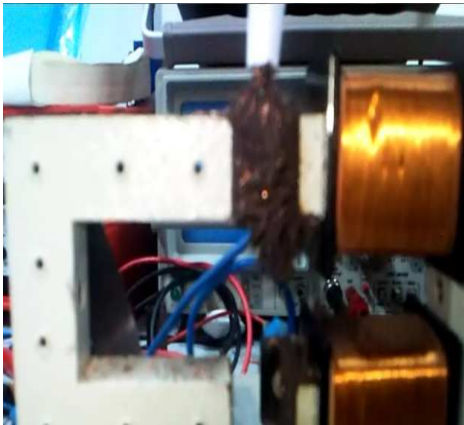
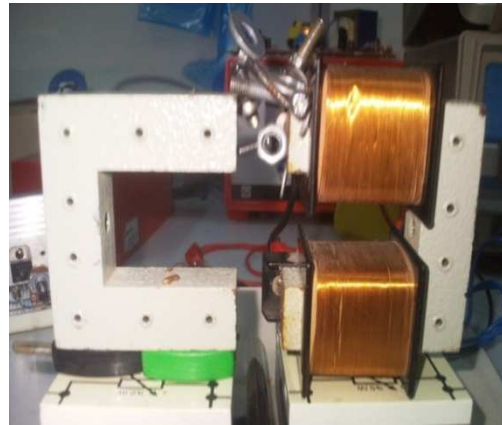


Figure III.23 : Modèle avec entrefer

III.5-3-1 Entrefer de 2 cm :

a-Petite taille (poudre)



b-Grand taille (boulon)

Figure III.24 : Séparation avec une distance de 2 cm avec tension de 20 V

a-Mélange en poudre :

Pour une variation de la tension, les résultats du tri des particules à petite taille (mélange de 10g de fer et 10g de cuivre) sont représentés dans la figure III.24. Les mesures du taux de récupération de fer sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Taux de récupération de fer (en poudre) en fonction de la tension d'alimentation

Tension en (volt)	30	25	15	10
$C_{I\text{ Fe}}$ (g)	10	7.3	5.9	1.9
R_{Fe} (%)	100	73	59	19

Cette séparation est difficile parce que nous avons eu un encombrement entre les particules. Ils sont attirés vers le noyau et bloquent le chemin devant les particules de cuivre et les empêchent de passer. Le test de séparation a donné des résultats insuffisants car le collecteur du fer contient des particules de cuivre.

b-Mélange de boulons :

Le tableau suivant résume la variation de la tension et la masse des particules à séparer avec une quantité de 40g de mélange (20g de fer et 20g de cuivre) :

Tableau III.5 : Taux de récupération de fer (boulon) en fonction de la tension

Tension en (volt)	30	25	15	10
C _{I Fe} (g)	20	17.2	15	14.4
R _{fe} (%)	100	86%	75%	72%



Figure III.25 : Reste de séparation avec tension de 10 V

La séparation est facile, pas d’encombrement grâce au volume des boulons et des écrous qui n’empêche pas les particules de cuivre à suivre leurs chemins. Les résultats de séparation sont propres et bons surtout pour des tensions importantes.

Discussion :

La séparation des boulons de fer (grande taille) est facile et ne prend pas beaucoup de temps, par rapport à la séparation avec des petites tailles (poudre). On perd beaucoup de temps en attendant la fin de séparation pour déboucher l’entrefer qui contient des particules de cuivre à cause de l’encombrement lors de la chute du mélange. La figure suivante illustre la différence des résultats de cette séparation avec entrefer de 2 cm:

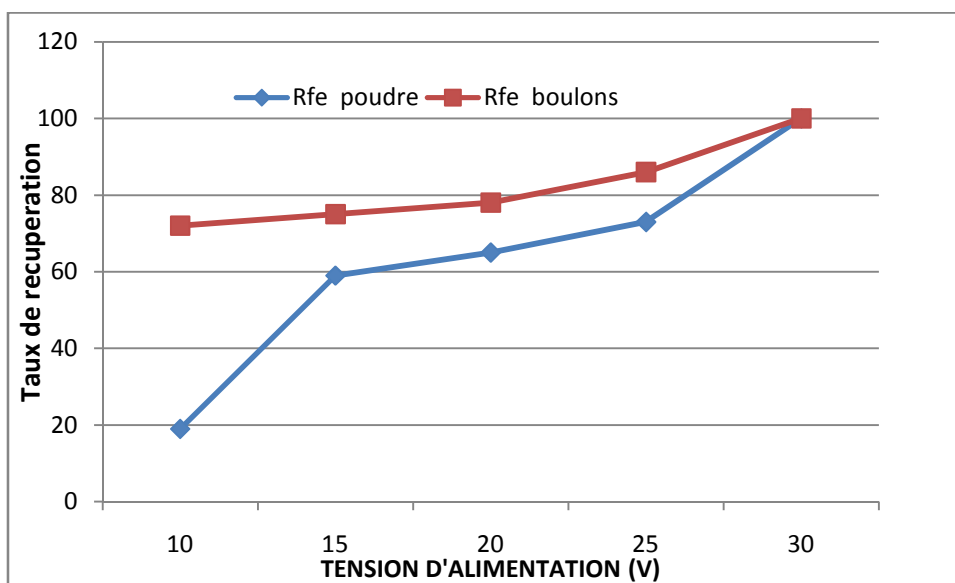


Figure III.26 : Taux de récupération de fer avec un entrefer de 2cm

Le rendement de la séparation des boulons est plus élevé que la poudre. Donc, la meilleure séparation dans ces conditions est celle des boulons qui dépasse les 70% dans tous les cas pour un entrefer de 2 cm figure III.26. On peut remarquer une importante évolution du taux de récupération dans la séparation de grandes particules par rapport aux petites particules. Le séparateur avec entrefer ne permet pas une très bonne séparation à cause de la présence des particules non ferreuses qui bloque le chemin des particules pour tomber dans leur collecteur (la cause est la distance de l'entrefer qu'est petite).

III.5-3-2 Entrefer de 5 cm :

a-Mélange en poudre :



Figure III.27 : Séparation avec entrefer de 5 cm et une tension de 20 V

En variant la tension et on mesure les quantités de fer/cuivre séparés, nous pouvons calculer le taux de récupération :

Tableau III.6 : Quantité de mélange séparé en fonction de la variation de la tension d'alimentation

Tension en (volt)	30	25	15	10
$C_{I\ Fe}$ (g)	10	8.9	7.9	2.9
R_{Fe} (%)	100	89	79	29

La séparation est améliorée et ne prend pas beaucoup de temps, les particules de fer séparées sont propres pas de cuivre pour une tension de 30 volts. Le taux de récupération est plus de 50% avec une tension basse, cette efficacité est due à la présence du deuxième noyau et aussi à la distance d'entrefer (Figure III.27). Dans l'entrefer la force d'attraction est importante que la force générée par un seul noyau.

b-Mélange de boulons :

Le fer utilisé est de 20 g, nous allons réaliser le même travail :

Tableau III.7 : Quantité de mélange séparée en fonction pour un entrefer de 5 cm.

Tension en (volt)	30v	25v	15v	10v
$C_{I\ Fe}$ (g)	20	18	5.7	0
$C_{II\ Cu}$ (g)	20	22	34.3	40
Masse tot (g)	40	40	40	40
R_{Fe} (%)	100%	90%	28.5%	0%



Figure III.28 : Reste de récupération avec tension de 10v

Discussion :

La séparation était facile et ne prend pas beaucoup de temps grâce à la distance de l'entrefer. Le rendement dans ce cas est plus élevé pour la séparation de poudre alors que la séparation des boulons augmente rapidement dès qu'on dépasse la tension de 15 v.

La figure de taux de récupération avec un entrefer de 5 cm montre la différence pour les deux cas poudre et boulons :

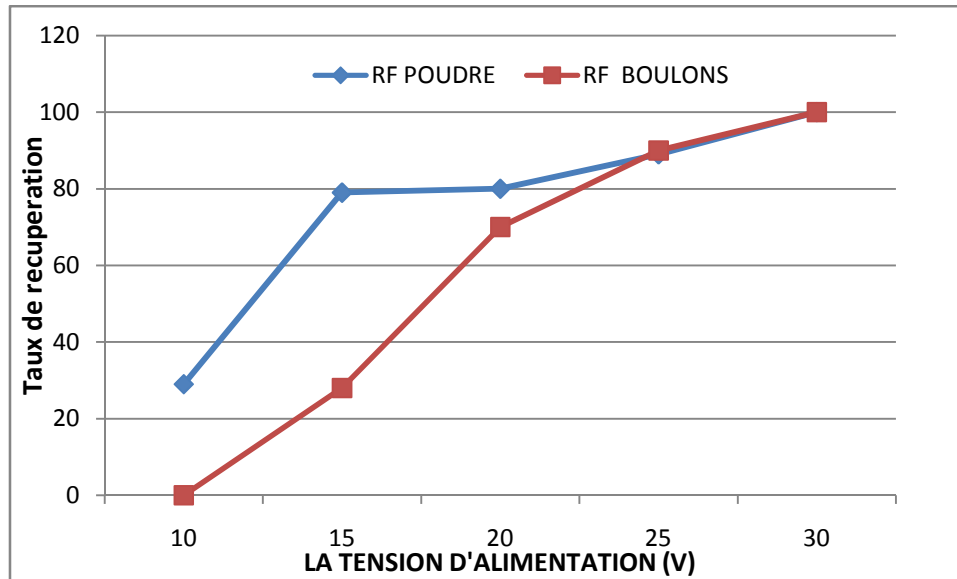


Figure III.29 : Taux de récupération de fer en fonction de la tension d'alimentation et une distance de 5 cm

Les deux tests de séparations ont presque le même rendement mais avec des tensions basses moins de 20 volts d'où on voit que la meilleure séparation est celle de poudre. On constate que la meilleure méthode de séparation pour la poudre est d'utiliser un entrefer égal à 5 Cm. Pour des particules de grande taille il faut utiliser un entrefer égal à 2 cm.

III.5.4 Comparaisons des résultats de séparation

Nous allons faire une comparaison entre les taux de séparation pour les trois cas étudiés précédemment.

Pour les particules de petite taille représentées dans le tableau III.8 on peut dire que, grâce à la canalisation des lignes de champ magnétique dans l'entrefer et la force d'attraction, la séparation avec un entrefer est meilleure à une séparation sans entrefer.

La séparation avec un entrefer de 5 cm est meilleure qu'une séparation avec un entrefer de 2 cm car cela résultera un blocage des particules au niveau d'entrefer qui causera une mauvaise séparation et un taux d'impureté inférieur.

Tableau III.8 : Séparation des particules de petite taille avec et sans entrefer

Petite particule	Récupération Fe (%)			
	Sans entrefer	100	73	69
Entrefer de 2Cm	100	73	59	19
Entrefer de 5Cm	100	89	79	29

Tableau III.9 : Séparation des particules de grande taille avec et sans entrefer

Grande particule	Récupération Fe (%)			
	Sans entrefer	Entrefer de 2Cm	Entrefer de 5 Cm	
Sans entrefer	100	82	25	0
Entrefer de 2Cm	100	86%	75%	72%
Entrefer de 5 Cm	100%	90%	28.5%	0%

Pour le second type (particules de grande taille), la meilleure séparation est avec un entrefer de 2cm, dans ce cas la force exercée sur les particules est grande (des lignes de champ magnétique intense).

Pour un entrefer de 5Cm il ya une amélioration du taux de séparation par rapport à la séparation mais pour des valeurs de tension supérieur entre 30 et 25 Volt, au contraire des autres valeurs (petit valeurs de tension 15 et 10V). Car les particules ont un poids important (force de gravité est supérieure a la force magnétique) empêchera l'attraction des particules avec le séparateur, voir le représenté dans le tableau III.9

Nous avons fait le trie des particules ferreuses avec deux objectifs : purifiés le mélange, est récupéré les particules non ferreuses avec un taux élevé. on jouant sur :- la taille des particules -l'entrefer -la tension d'alimentation, voir la figure III.30.

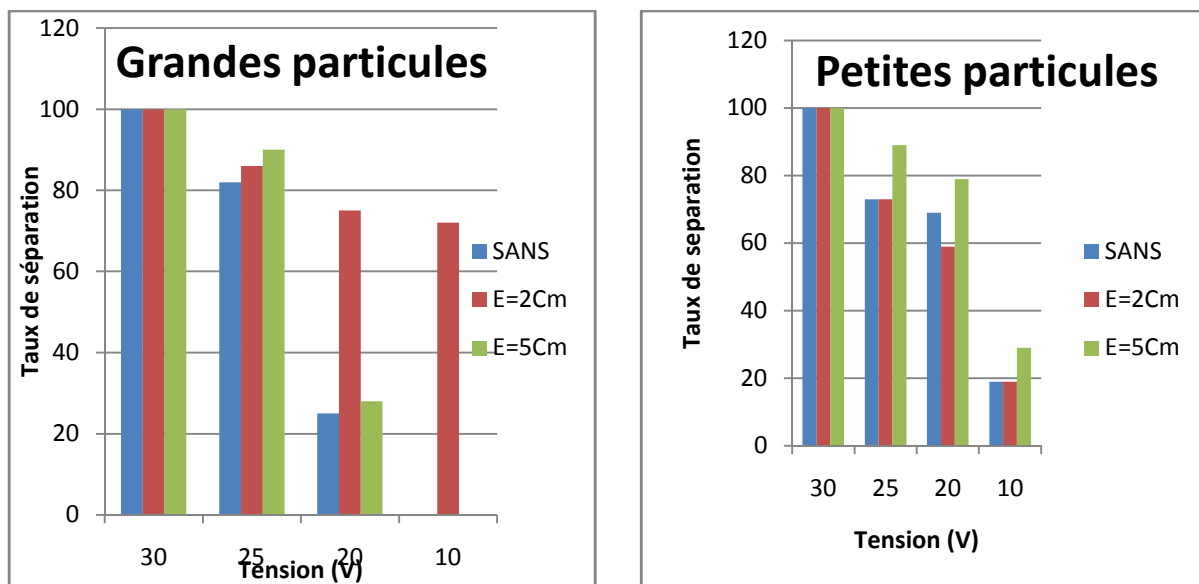


Figure III.30 : Comparaisons des résultats de séparation

III. 6 Conclusion

Les résultats de simulation montrent le phénomène d'attraction magnétique pour un électroaimant avec et sans entrefer. Il nous a permis de calculer les forces et la distribution des lignes d'induction magnétique des particules ferreuses. D'après les résultats de simulations et expérimentaux on peut constater :

- ✓ La force est supérieure pour une séparation avec un entrefer qu'une séparation sans entrefer.
- ✓ La variation de la distance d'entrefer est de 2 cm donne de bons résultats pour la force d'attraction et une très bonne séparation des particules ferreuses, surtout de grande taille. Mais pour les petites particules nous sommes tombés dans le problème du blocage d'entrefer par les particules. La solution pour éliminer ce problème c'est de faire un transporteur dynamique autour du séparateur.
- ✓ Pour un entrefer de 5 cm la séparation de petites particules est améliorée expérimentalement, cela a été traduit par le poids négligeable et la force de gravité moins importante et une force d'attraction faible.
- ✓ Les particules de grande taille pour $e=5$ cm des résultats de simulation et expérimentale étaient liées et complémentaires. Au contraire les valeurs de la force étaient importantes mais pour l'expérimentale la séparation était très mauvaise pour des valeurs de tension entre (10V et 15 V) car le poids des particules est grand.

Enfin dans ce chapitre nous avons eue des résultats de simulation afin d'expliquer et justifier le taux de séparation expérimentale en fonction des forces calculées pour les différentes tailles en fonction de l'entrefer.

Le chapitre suivant va être consacré à une simulation du séparateur à courant de Foucault sous le logiciel Comsol.

CHAPITRE -IV-
Séparateur à courant de
Foucault

IV.1 Introduction :

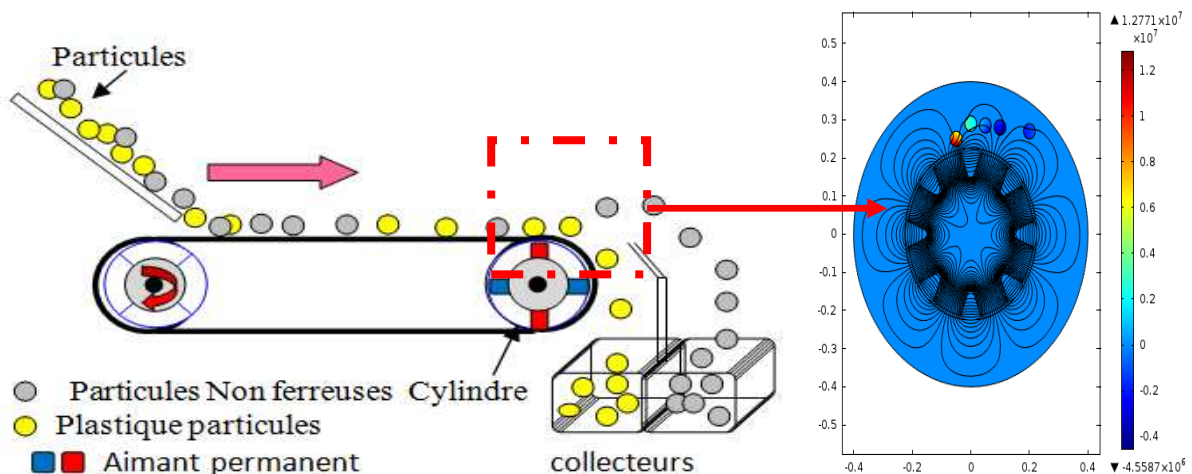
La séparation à courants de Foucault est un moyen efficace de récupération de métaux non ferreux (aluminium et cuivre) à partir des déchets industriels ou municipaux.

Ces courants génèrent un moment magnétique dans les particules qui sont ensuite triés par une répulsion entre le champ secondaire et le champ primaire des aimants [19,41]. Ces particules conductrices (or, Al, Cu) sont accélérées de manière à suivre le mouvement du tambour et sont éjectées loin du séparateur. Les matériaux isolants (plastique, sable, verre) tomberont près du tambour. La trajectoire de particules conductrices dépend de la combinaison de la force magnétique, la gravité, la friction et les forces de l'air.

Ce genre de séparateur à courant de Foucault a été déjà réalisé par de nombreux travaux expérimentaux de recherche et d'application industrielle [42, 43, 44, 46,59].

IV.2 Présentation du séparateur à courant de Foucault :

La figure IV.1 présente le schéma de principe d'un séparateur à courant de Foucault avec des particules non ferreuses et non métallique. Dans notre travail nous allons simuler le cylindre à aimants permanents avec des différents types de particules à trier. Par la suite nous allons visualiser les lignes magnétiques et les courants induits, et puis calculer les forces de répulsion et la distance d'éjection des particules près du séparateur à courant de Foucault.



IV.3 Caractéristiques magnétiques d'un séparateur à courant de Foucault

A- Propriétés magnétiques autour du dispositif

Le séparateur à courant de Foucault est entouré par un nombre de paires de pôle d'aimant permanent. L'ensemble des aimants permanents symétriques de polarisation NS et SN sont alternés et tournent avec une vitesse angulaire du tambour. Le champ magnétique alternatif est produit autour du tambour magnétique à cause de la rotation.

La densité de flux magnétique du séparateur peut adapter une série d'expansion dans les coordonnées de cylindriques (r, α, z) relativement à l'axe de tambour aux formules suivantes [37,60,64]:

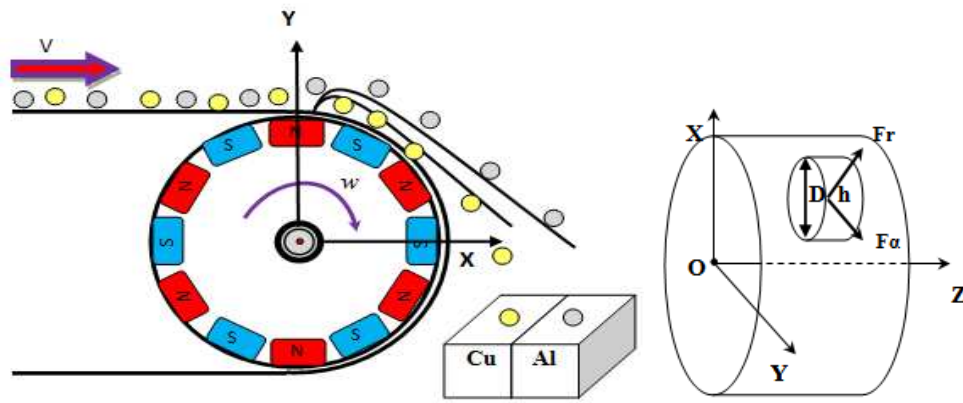
$$B_r = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (r/R)^{-(2n+1)k-1} \sin(2n+1)k(\alpha - \omega_m t) \quad (IV-1)$$

$$B_\alpha = \sum_{n=0}^{\infty} -b_n (r/R)^{-(2n+1)k-1} \cos(2n+1)k(\alpha - \omega_m t) \quad (IV-2)$$

$$B_z = 0 \quad (IV-3)$$

ω_m la vitesse angulaire du tambour , R : le rayon du tambour

Ainsi, la valeur de $(\alpha - \omega_m t)$ peut être supposée comme 90° , et α est l'angle des coordonnées de particules dans le repaire cylindrique. Le coefficient de Fourier (b_n) dépend de la densité du flux magnétique et la valeur correspondante de la distance radiale (r). Le calcul théorique de la force magnétique exercée sur les particules non ferreuses dans le séparateur à courants de Foucault dans un système de coordonnées cylindrique illustré par la figure IV.2.



A- présence des particules dans le séparateur B- Particule non ferreuse dans les Coordonnées cylindriques

Figure IV.2 Séparateur à courant de Foucault

Pour le calcul du champ magnétique dû à un volume magnétisé d'un aimant permanent, dans un point extérieur proche chaque élément de volume dv' se comporte comme un moment élémentaire $d\vec{M}$:

$$d\vec{M} = \vec{j}(r') \cdot dv' / \mu_0 \quad (IV-4)$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_{v'} \frac{\vec{j}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (IV-5)$$

S' surface, v' volume magnétisé, unité de la normale n' , $\vec{A}(\vec{r})$ vecteur potentiel, $J(r')$ densité de courant, r coordonné. Dans toutes les applications et les calculs nous considérons que les aimants sont idéaux, pour simplifier les expressions des grandeurs du potentiel scalaire et le vecteur magnétique nous aura:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \left[\iint_{S'} \frac{\vec{j}(\vec{r}') \times \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' \right] \quad \text{rot}(\vec{j}) = \text{rot}(\text{rot } H) \quad (IV-6)$$

Nous pouvons considérer le milieu magnétisé d'où

$$\vec{B}(\vec{r}) = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}(\vec{r})) \quad (\text{IV-7})$$

B- Formule de la force magnétique répulsive exercée sur une particule ferreuse

Quand les particules non ferreuses sont placées dans le champ magnétique fluctuant, un potentiel V sera induit par la loi de Faraday quand une particule conductrice est émergée dans un champ magnétique alternatif. Un courant électrique est induit sur la surface de la particule par effet de peau. Ce courant induit s'appelle le courant de Foucault. La fem est décrite par [37,64]:

$$\vec{e} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = \vec{V} \quad (\text{IV-8})$$

Cette équation donne la fem induite en fonction de la variation du flux magnétique à tout instant de temps. La particule d'aluminium se déplace près du tambour magnétique rotationnel. La vitesse linéaire relative entre la particule et l'aimant peut être exprimée par:

$$v' = v - \omega m R \quad (\text{IV-9})$$

m la masse de la particule, v la vitesse du tambour par conséquent, la variation du flux magnétique de la particule peut être donnée comme :

$$\Delta \phi = \iint B \, dS \quad (\text{IV-10})$$

La vitesse de la particule est négligeable devant la vitesse du tambour magnétique. On a $\omega \gg v_0$. \vec{V} vecteur potentiel scalaire.

$$\vec{V} = -A[\omega - v_0] \frac{\partial B}{\partial \phi} \approx -A\omega \frac{\partial B}{\partial \vec{V}} \quad (\text{IV-11})$$

A : section de la particule, ω est la vitesse angulaire du tambour, v_0 vitesse du transporteur. Le courant induit dans les particules métalliques est calculé par:

$$I = \frac{V}{R} = -\frac{m}{2\pi\rho} \sigma \omega \frac{\partial B}{\partial \vec{V}} \quad (\text{IV-12})$$

Avec m est la masse, le σ est la conductivité électrique, ρ est la densité volumique. Par conséquent, la force magnétique induite sur la particule non ferreuse est écrite par la formule suivante:

$$F = M_r \frac{\partial B_r}{\partial r} + M_\alpha \frac{\partial B_r}{\partial \alpha} = -\frac{1}{8} m D^2 \frac{\sigma}{\rho} \omega \left(\frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial B_r}{\partial \alpha} \right) \quad (\text{IV-13})$$

La force magnétique dépend du courant de Foucault, la vitesse de rotation de tambour, le gradient magnétique d'un aimant permanent, la conductivité et la densité des particules non ferreuses, la force magnétique peuvent être écrites par [65]:

$$F = \delta \frac{\sigma}{\rho} \omega (\nabla B)^2 \quad (\text{IV-14})$$

Avec δ est une constante (dépende du métal et le champ magnétique). La solution obtenue avec la MEF laisse évaluer les distributions du champ magnétique dans le tambour du séparateur. Et le courant de Foucault induit (J) dans les particules en aluminium de cercle peut être calculé par:

$$J = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \Delta \hat{V} \right) \quad (\text{IV-15})$$

Avec \hat{V} est un potentiel scalaire peut-être déterminé par les conditions physiques des courants de Foucault induits. On peut établir l'équation de Laplace sur le potentiel scalaire pour satisfaire l'équation suivante [37,60]:

$$\Delta^2 \hat{V} = 0 \quad (\text{IV-16})$$

La solution d'Eq. (15) pour \hat{V} peut-être obtenue par les conditions de frontière. L'interaction entre l'induction magnétique et les courants de Foucault induits dans les particules non ferreuses avec un volume V produit la force répulsive F représentée par:

$$F = J \times B d_v \quad (\text{IV-17})$$

Les propriétés physiques sont le rayon des particules circulaire de R=1cm, l'épaisseur en millimètres, la conductivité (S/m). ω_m la vitesse de rotation du tambour magnétique (rad/s), v la vitesse du tapie ou la vitesse initiale des particules (m/s), nombre de k de paires des aimants placés dans le tambour magnétique. Ses caractéristiques sont employées pour calculer les propriétés magnétiques et mécaniques entre la particule et le tambour magnétique du séparateur.

La force de séparation par l'intermédiaire du courant de Foucault dans les matériaux non ferreux est provoquée par le champ magnétique variable du tambour cylindrique [60,64]:

$$F_r = H^2 f \times \frac{m\sigma}{\rho s} \quad (\text{IV-18})$$

$$f = \frac{nk}{2} \quad (\text{IV-19})$$

F_r représente la force répulsive, H est l'intensité du champ magnétique, f est la fréquence du champ magnétique, n est la vitesse du tambour magnétique, k est le nombre de paire de pôles magnétiques, s est le facteur de forme des particules non ferreuses [60,64].

C- Trajectoire de la particule : La somme des forces est donnée par la loi suivante :

$$\ddot{a} = \frac{1}{m} \sum F_i \quad (\text{IV-20})$$

$$r(0) = [0, 0, -y_0] \quad (\text{IV-21})$$

La condition de Newton qu'une telle approche soit utile pour la séparation magnétique, la force magnétique d'éjection doit être plus grande que d'autres forces (poids, ...):

$$F_{magnetique} \geq F_{poids}$$

La trajectoire de la particule dans les deux axes x, y s'accorder les forces accélération et la pesanteur liées au temps est donnée par:

$$y_0 - \left(\frac{F_{my}}{m} + g \right) t_0^2 = (y_1) \quad (\text{IV-22})$$

$$-x_0 + v_0 t + \left(\frac{F_{mx}}{m} \right) t_0^2 = (x_1) \quad (\text{IV-23})$$

IV.4 Simulation du séparateur magnétique

Le séparateur est constitué d'un nombre de paires de pôles d'aimants permanents placés en alternance sur la surface d'un tambour amagnétique. Le rôle du séparateur à courant de Foucault est de séparer les particules non ferreuses.

La simulation du séparateur avec différents pôles d'induction magnétique est traitée dans cette partie. Pour réaliser la simulation nous allons commencer par la construction de la géométrie et puis le maillage qu'est une étape cruciale dans la simulation par les méthodes numériques.

1. Maillage :

La qualité du maillage est cruciale pour une simulation à élément fini. Un bon maillage permet d'obtenir des bonnes solutions avec un temps de calcul élevé.

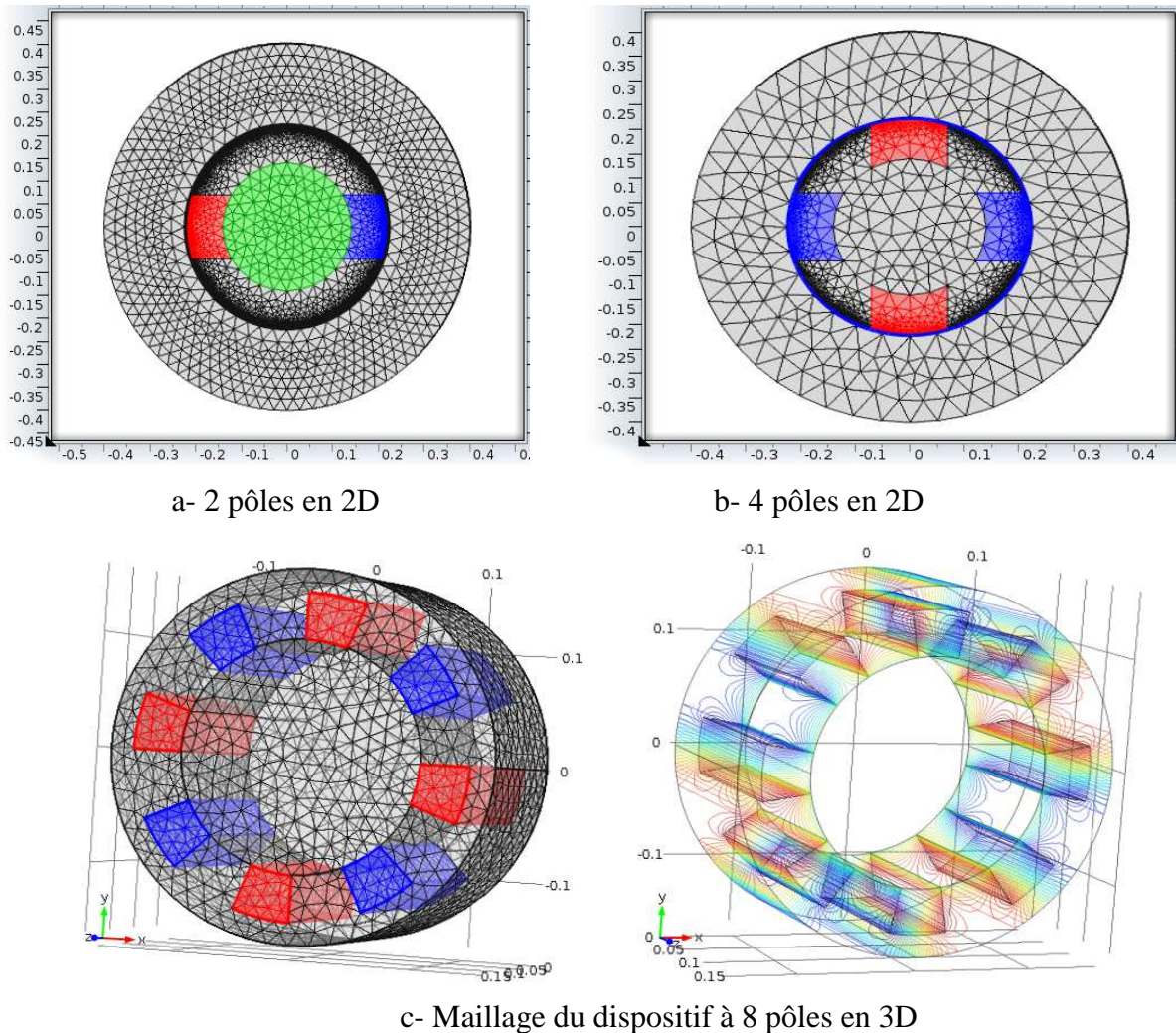


Figure IV.3 Maillage du tambour de séparateur à courant de Foucault

Le maillage de l'ensemble du domaine considéré, est généré avec des éléments tétraédriques. Il doit être raffiné dans les régions où la variation des champs est importante. Pour notre simulation, nous utilisons un maillage raffiné autour des aimants permanents puisque le champ d'induction magnétique varie de manière significative dans ces régions[48,49].

2. Simulation du séparateur a l'état statique :

La variation du nombre de pôles du séparateur est prise en considération en premier lieu. L'objectif est de présenter les différentes géométries du séparateur magnétique et de voir la distribution des lignes de champ magnétique en fonction de ces géométries [39,40]. Nous allons choisir une simple représentation du séparateur à l'état statique non rotationnel, on varie le nombre de paires des pôles (2 pôles et 4 pôles) les résultats de simulation sont représentés dans les figures suivantes:

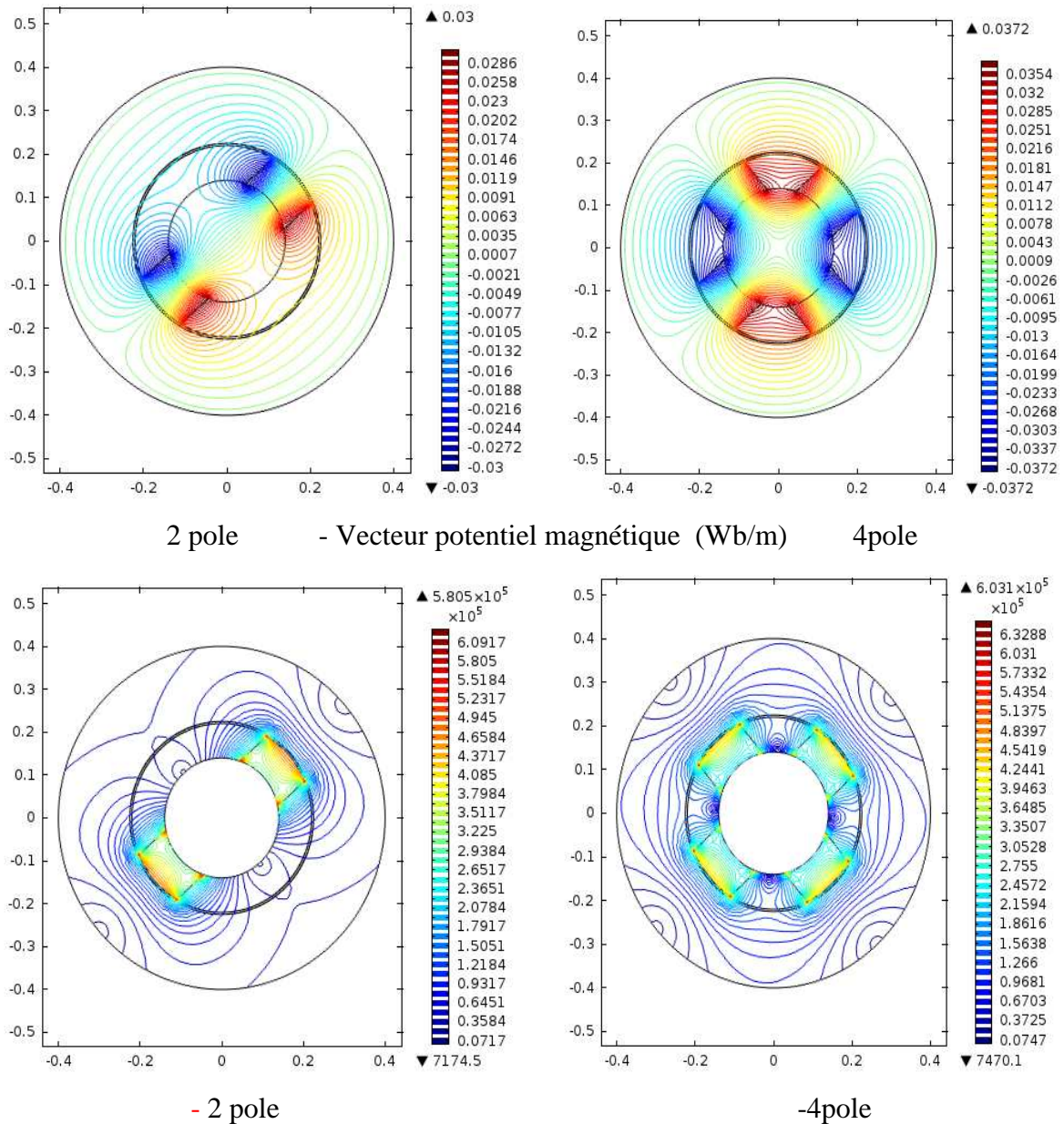


Figure IV.4 Champ magnétique (A/m²)

Les résultats de simulation de la figure IV.4 montrent la distribution des lignes du vecteur potentiel magnétique avec une polarisation inverse. On peut voir une grande concentration des lignes du champ magnétique autour des aimants permanents du séparateur à l'état statique. Lorsque le nombre des aimants permanents augmente la magnétisation du milieu deviendra plus importante.

3. Variation de l'induction magnétique et l'entrefer

La simulation du séparateur à deux pôles en 2D est représentée dans la figure IV.6 avec des différentes valeurs d'induction magnétique $B_r = 0.2\text{ T}$, $B_r = 1\text{ T}$ et pour un entrefer variable (présenté dans la figure par des lignes rouges, la distance par rapport au séparateur). Les résultats montrent une variation importante dans l'amplitude du vecteur potentiel magnétique.

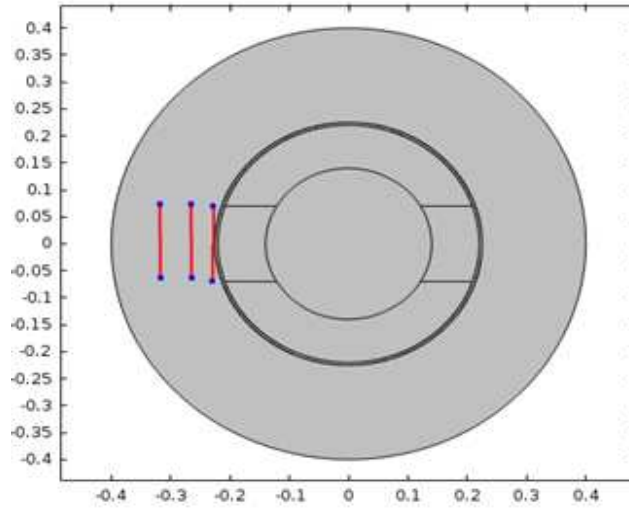
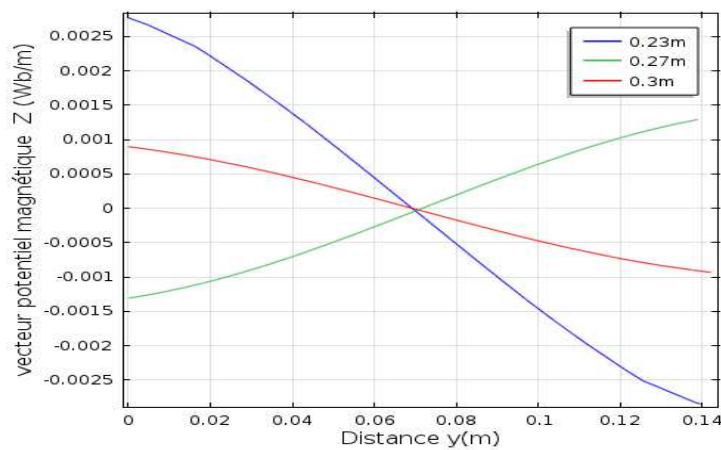
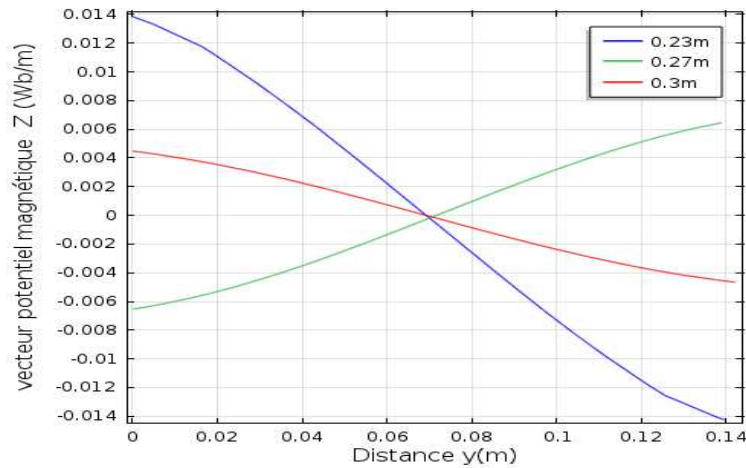


Figure IV.5 Calcul du vecteur potentiel magnétique en fonction de l'entrefer (lignes rouges)



a – Pour une aimantation $B_r = 0.2\text{ T}$



b –Pour une aimantation $B_r=1T$

Figure IV.6 Mesure du vecteur potentiel magnétique du séparateur à 2 pôles

Les trois couleurs signifient la variation d'épaisseur d'entrefer lorsqu'on s'éloigne du séparateur le vecteur potentiel magnétique et le champ magnétique diminueront.

Les mesures de vecteur potentiel magnétique autour du séparateur montrent deux alternances: une alternance positive et l'autre négative, à cause de la polarisation des aimants permanents qui sont alternés N-S. lorsque l'aimantation des aimants permanents augmente il y aura un vecteur potentiel magnétique important.

4. Simulation du séparateur en régime rotationnel:

Dans cette partie nous allons simuler le séparateur en régime rotationnel à une vitesse angulaire constante. Le séparateur produit un champ magnétique à une fréquence importante, ce dernier induit des courants dits les courants de Foucault dans les particules conductrices.

Les résultats de simulation représentés dans la figure IV.7 montrent la distribution des lignes de vecteur potentiel magnétique autour des séparateurs de différents nombres de paires de pôles. Une grande concentration des lignes du champ magnétique autour des aimants permanents, et une interaction entre les aimants de polarités inverses.

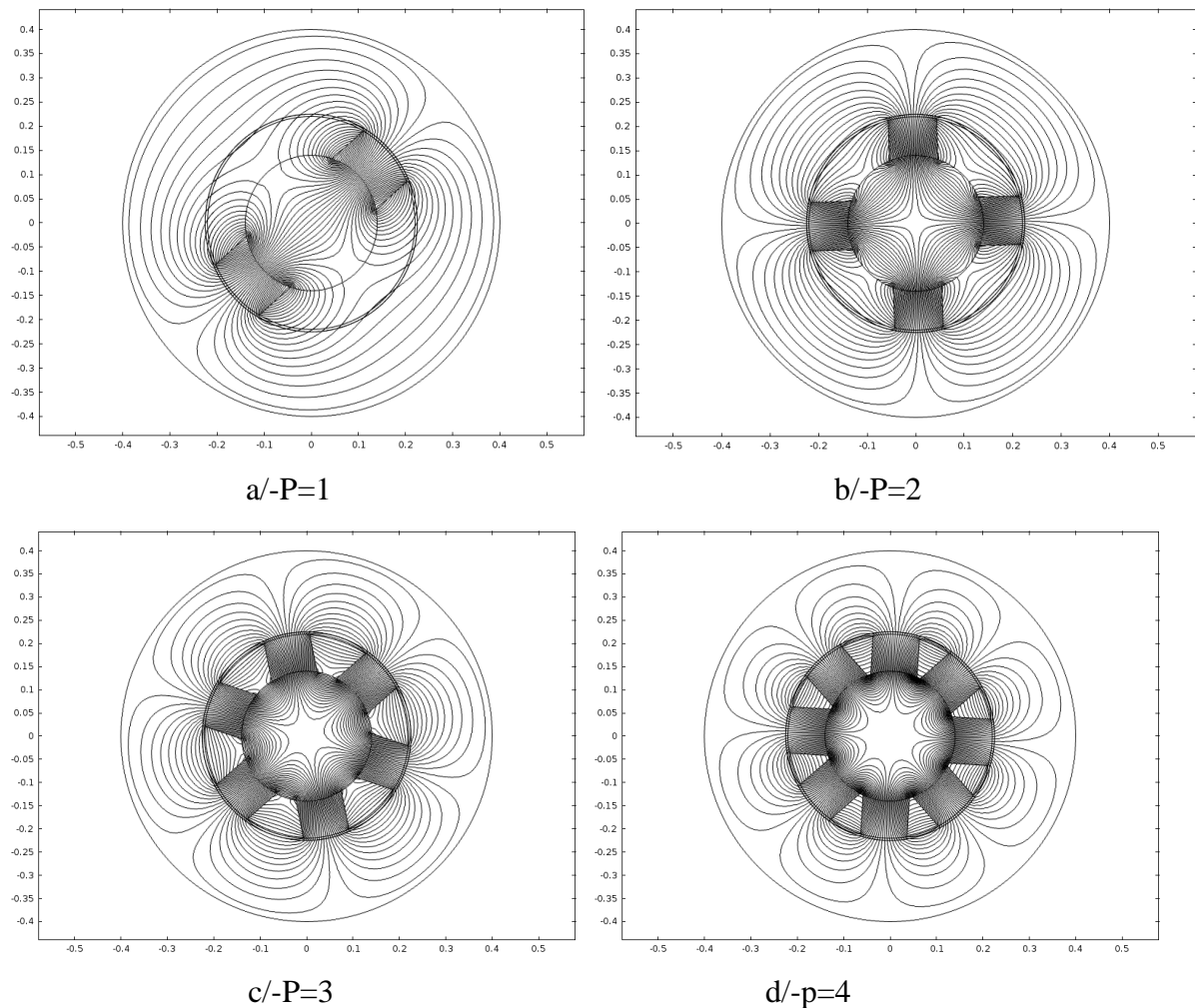
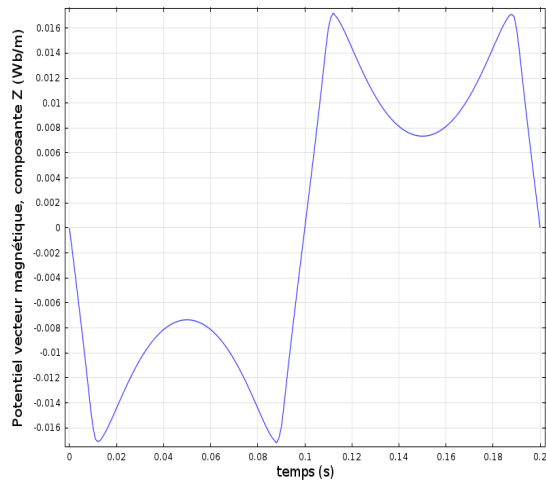


Figure IV.7 Représentation du vecteur potentiel magnétique en fonction du nombre de paires de pôles

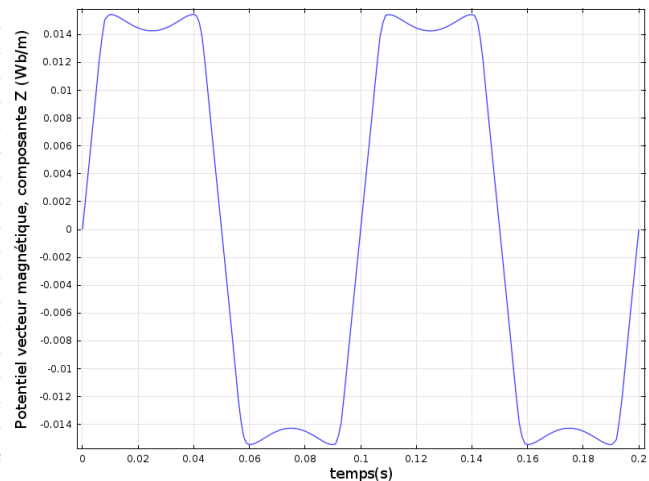
Ces figures montrent l'influence du nombre d'aimants permanents sur la répartition des lignes de vecteur potentiel magnétique. Lorsque le nombre des aimants permanents augmente la magnétisation du milieu devient plus grande et la force de séparation sera importante.

Les mesures du vecteur potentiel magnétique autour du séparateur à aimant permanent dans un point proche en fonction du temps sont représentées par la figure IV.8. Ces figures montrent une alternance positive et l'autre négative à cause de la polarisation des aimants permanents alternés N-S pour le cas à deux pôles [57,58].

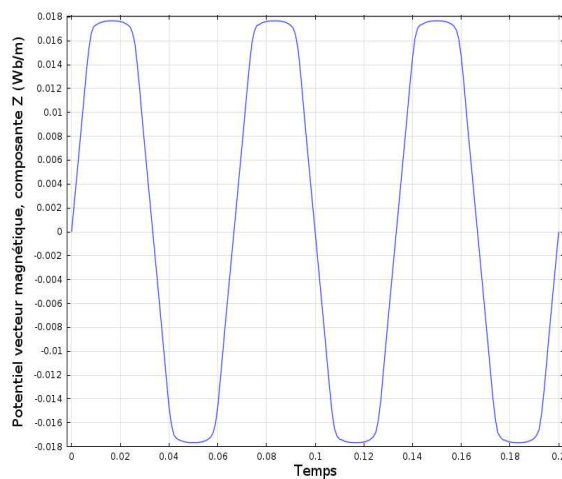
Nous avons calculé le vecteur potentiel magnétique produit dans les différents types du séparateur (2, 4, 6, 8). On constate par exemple pour $p=4$ paires de pôles, une production de quatre alternances de champ magnétique positif et quatre négatives.



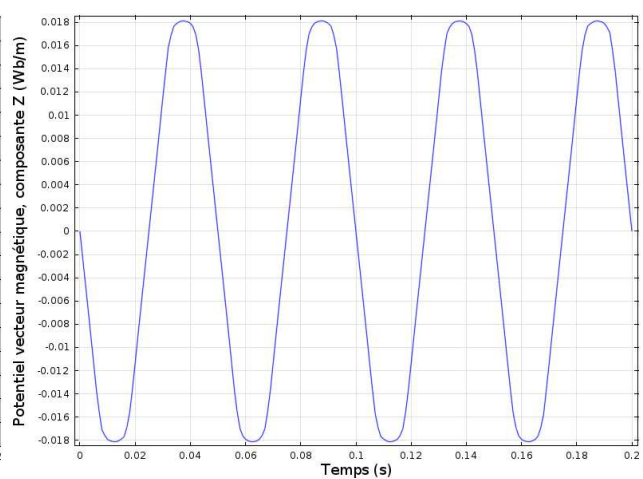
a/- 2 pole



b/- 4 pole



c/- 6 pole



d/- 8 pole

Figure IV.8 : Potentiel vecteur magnétique en fonction du temps

Les figures précédentes illustrent une variation dans la distribution du vecteur potentiel magnétique qui affectera la variation du champ magnétique produit. Ce dernier est lié à la force d'éjection magnétique. Cela montre l'influence du choix du nombre des aimants permanents sur la fréquence du champ généré. Ce choix a un rôle très important dans la séparation magnétique.

IV.5 Présence des particules proche du séparateur :

La présence des différentes particules ferreuses, non-ferreuses et isolantes proches du séparateur à courant de Foucault (fer, aluminium, plastique circulaire en 2D) sera étudiée dans cette partie. Nous allons représenter les lignes du vecteur potentiel magnétique et la densité de courant induit dans les différentes particules (fer, aluminium, plastique), afin de comparer et expliquer cette différence causée par leurs propriétés physiques et magnétiques.

1. Vecteur Potentiel Magnétique :

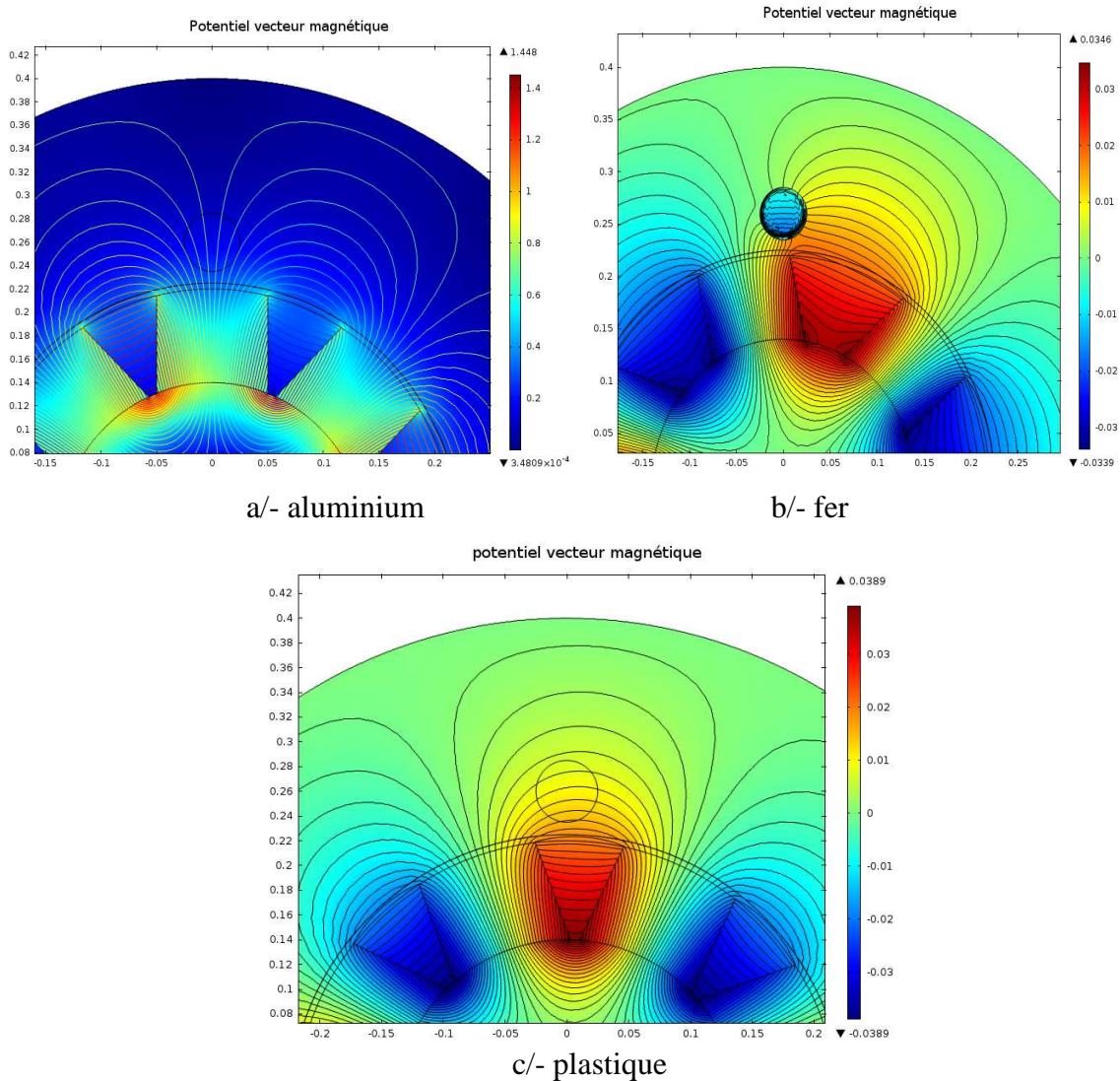


Figure IV.9 Simulation des lignes du vecteur potentiel magnétique à travers les particules

La figure IV.9 montre la distribution des lignes du vecteur potentiel magnétique à l'état statique. La particule d'aluminium ne sera pas affectée par les lignes du vecteur potentiel magnétique ainsi que la particule du plastique. Au contraire pour la particule de fer les lignes se canalisent dans la particule.

2. Densité de courant induit :

La figure IV. 10, montre que la particule d'aluminium contient des courants induits car c'est une particule non-ferreuse qui subit un champ à haute fréquence. Pour le fer, il contient des courants surfaciques grâce à la nature ferreuse, on peut l'expliquer par l'effet d'attraction avec l'aimant permanent. Par contre la particule de plastique ne contient pas des courants de Foucault à cause de sa nature [38].

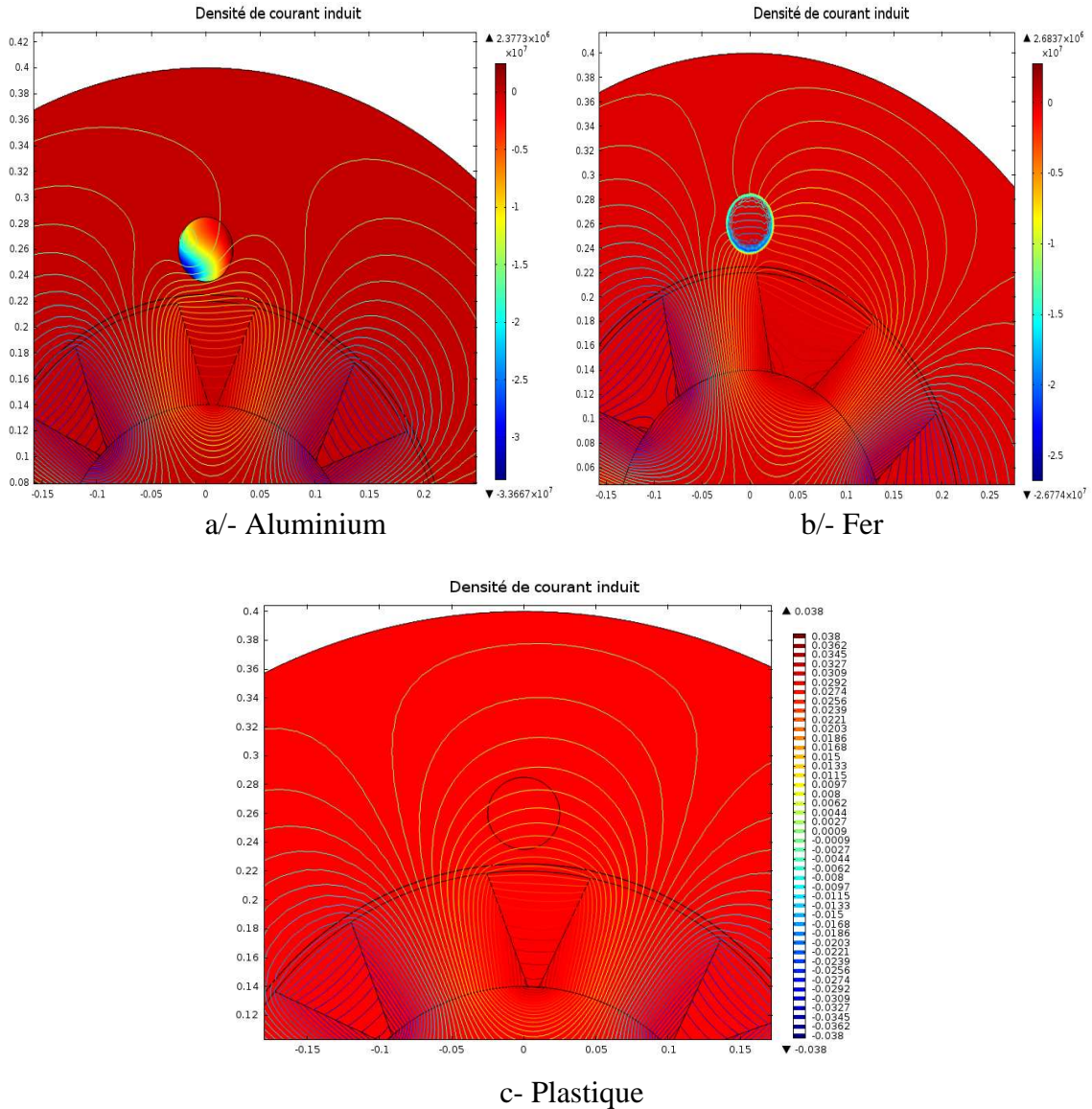


Figure IV.10 Simulation de densité de courant induit des différents types de particules

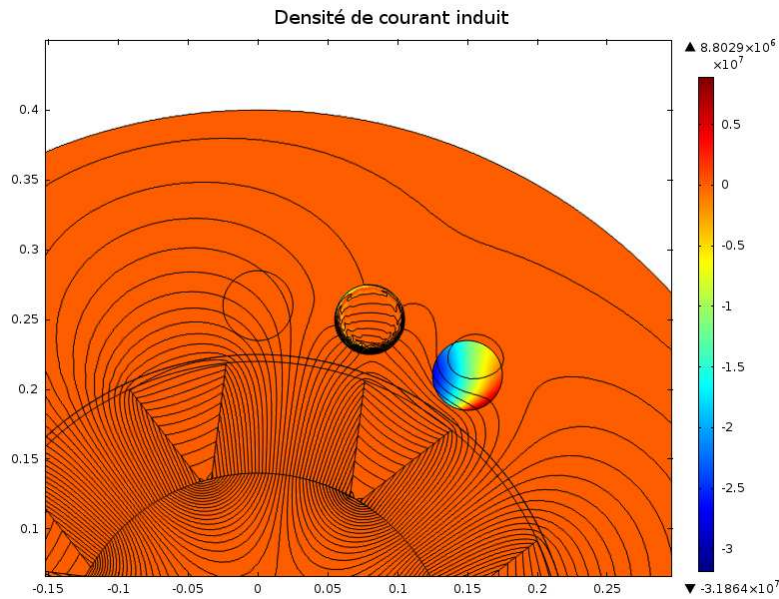
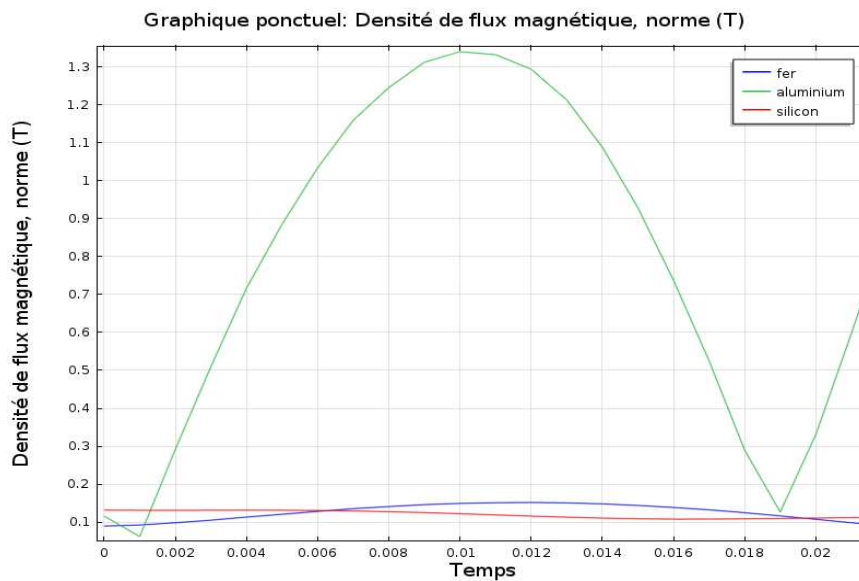


Figure IV.11 Présence des trois particules proches du séparateur en même temps

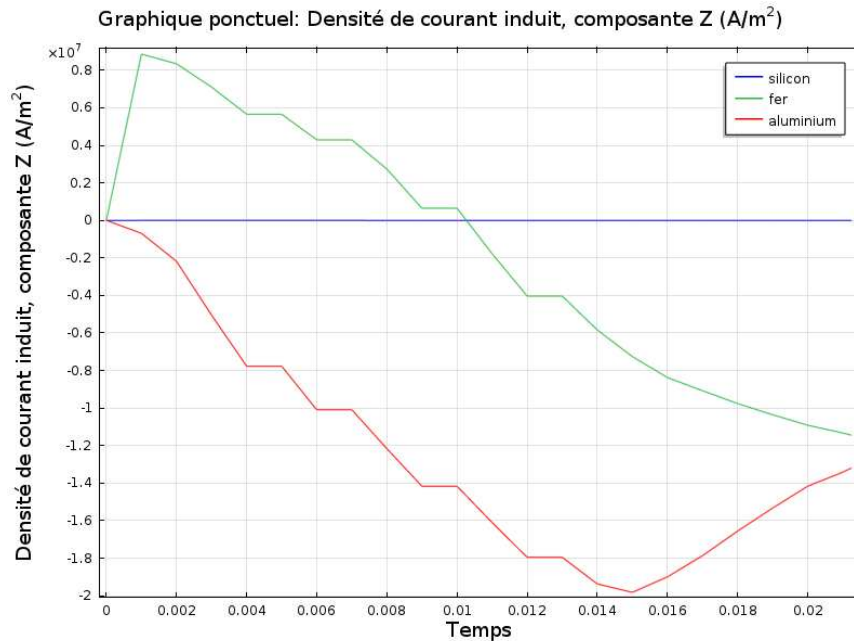
Le séparateur magnétique donnera des courants dans des particules avec une grande concentration pour les non ferreux, des valeurs moins pour le fer et aucun courant pour les structures non métalliques (plastique). Cela explique les forces exercées sur les trois particules afin de les trier, pour l'aluminium la force de répulsion de courant de Foucault, le fer la force d'attraction avec les aimants permanents et pour le plastique la force de gravité.

3. Calcul des champs et forces magnétiques autour des trois particules :

Le calcul de l'induction magnétique et le courant induit à la circonférence dans les trois périphériques des particules (fer, aluminium, plastique) autour des particules sont donnés dans la figure suivante:



a/- Densité de flux magnétique



b/-Densité du courant induit surfacique

Figure IV.12 Calcul du courant induit autour du séparateur en fonction du temps

Pour la particule du plastique il n'existe pas de courant induit et d'induction magnétique. Pour la particule d'aluminium on trouve des grandes valeurs pour les deux l'induction et le courant induit. Pour le fer des courants induits existant une petite valeur d'induction magnétique, tout cela est dû aux propriétés physiques de chaque particule.

4. Calcul de la force magnétique exercée sur une particule non ferreuse:

Pour le calcul de la force magnétique exercée sur une particule on a besoin des caractéristiques magnétiques et électriques de chaque milieu pour créer une liaison magnétique [45,47]. À travers les calculs obtenus par le logiciel COMSOL on peut calculer les composantes de la force magnétique de répulsion en fonction de:

- H est l'intensité du champ magnétique [A/m].
- f est la fréquence du champ magnétique [Hz].
- n est la vitesse de rotation du tambour magnétique [Tr/mn].
- p est le nombre de paires pôles magnétiques.
- m est la masse, [kg].
- σ est la conductivité [S/m].
- ρ est la densité volumique de la particule [kg/m^3].

Tableau IV.1 Force magnétique de répulsion en fonction de la masse de la particule

La particule en Al		
Tailles Cm3	Poids [g]	Force répulsive [mN]
0.5	5	20
1	10	22
1.5	15	25
2	20	29
2.5	25	35
3	30	60

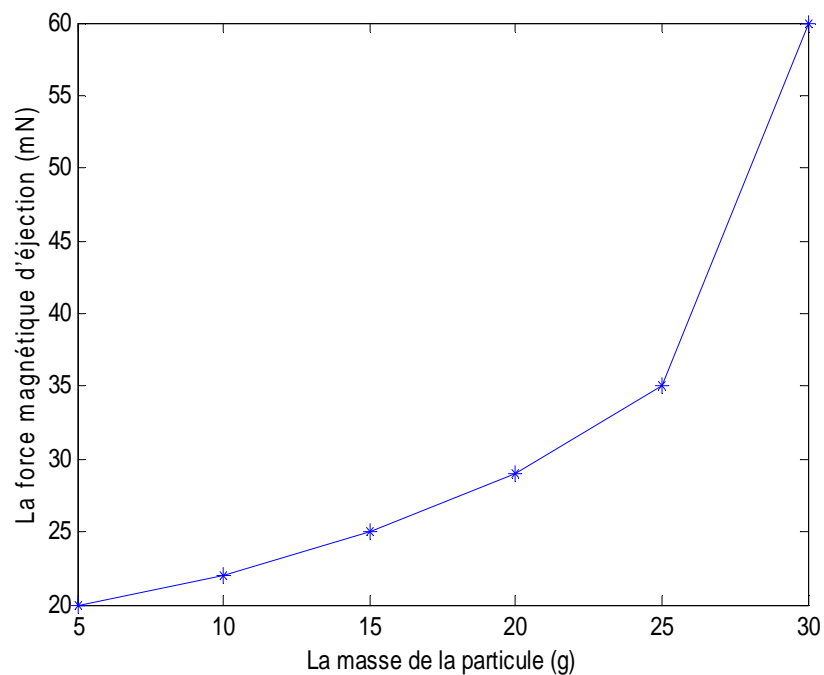


Figure IV.13 Calcul de la force magnétique d'éjection en fonction de la masse.

D'après les résultats précédents, on peut remarquer que la valeur de la force magnétique est proportionnelle à la taille de la particule non ferreuse. Lorsque la taille est importante, la densité volumique (le poids) devient grande et induira une grande quantité de courant de Foucault. Avec les paramètres suivants entrefer de $e=0.5$ Cm, induction rémanent des aimants permanents $B=0.84$ T, vitesse angulaire de $n=1000$ Tr/mn. Ces courants générant une force magnétique d'éjection suffisante et importante.

IV.6 Séparation entre les particules non ferreuses d'aluminium et de cuivre

La séparation par courant de Foucault dépend de plusieurs paramètres qui peuvent être ajustés pour une meilleure optimisation : le taux d'entrée du jet, la fréquence de rotation du tambour, la vitesse de circulation des particules, l'intensité du champ magnétique alternatif produit, le nombre des aimants permanents et la taille des déchets.

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de la vitesse de rotation du tambour sur le courant induit et la force de répulsion pour $e=4\text{ Cm}$, $B=0.84\text{T}$, $R=1\text{Cm}^3$. La vitesse angulaire de rotation est un facteur important à ajuster afin d'améliorer l'efficacité et la qualité de la séparation dans les séparateurs industriels.

Tableau IV.2 montre le courant de Foucault induit dans les particules non ferreuses en aluminium (paramagnétiques) et le cuivre (diamagnétique) en fonction de la vitesse angulaire.

Tableau IV.2 : Courant de Foucault induit dans les particules non ferreuses

Courant de Foucault induit (A/mm^2)	Vitesse angulaire (tr/mn)				
	1000	1500	2000	2500	3000
Aluminium	21	26	32	33	39
Cuivre	27	34	38	40	45

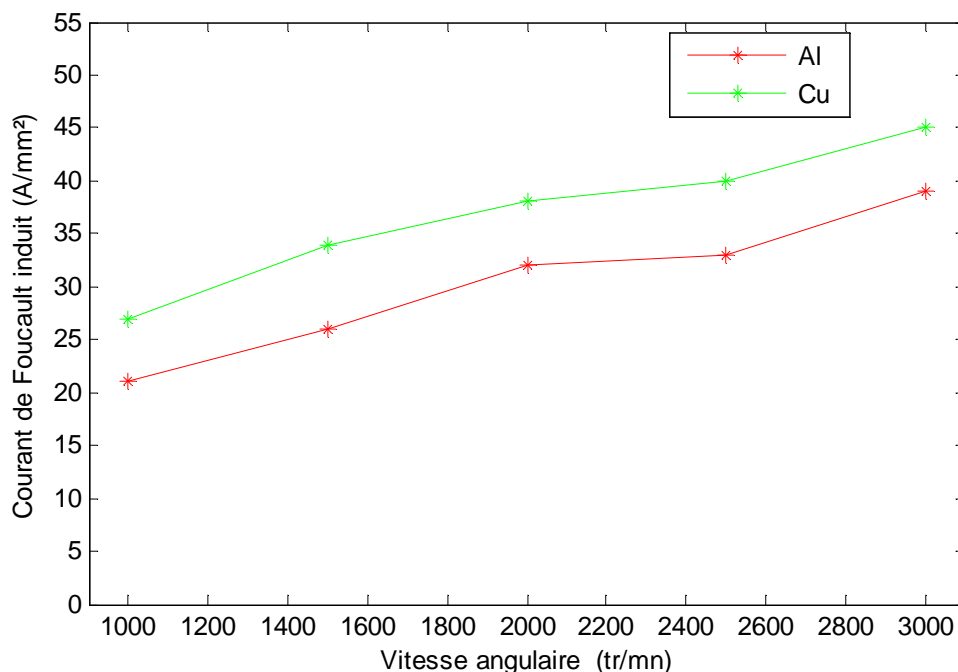


Figure IV.14– Courant de Foucault induit dans les particules

Les courants de Foucault induits sont très importants dans les particules de cuivre par rapport à la particule d'aluminium car la conductivité du cuivre est supérieure à celle de l'aluminium ($\sigma_{\text{Al}} = 27 \cdot 10^6 < \sigma_{\text{Cu}} = 56 \cdot 10^6$) figure. IV.14.

Le tableau IV. 3 montre la variation de la force d'éjection magnétique

Tableau IV.3 : Force répulsive des particules non ferreuses de 1 cm

Force de répulsion (mN)	Vitesse angulaire (tr/mn)				
	1000	1500	2000	2500	3000
Aluminium	6.5	8	9.5	11	13
Cuivre	7.5	11.5	13.5	15.6	17.3

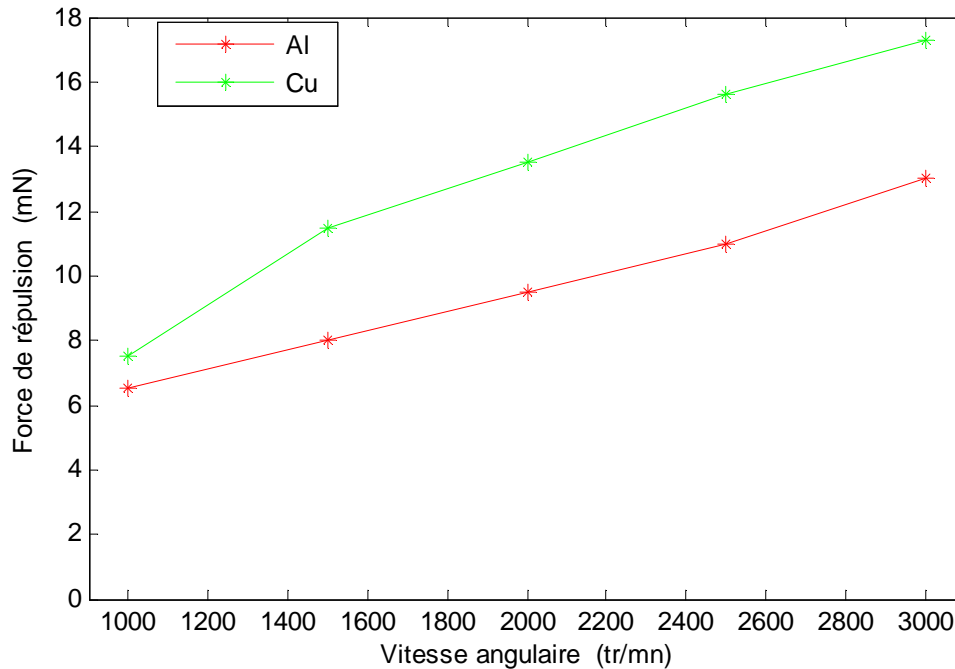


Figure IV.15 – Force de Lorentz

Les résultats obtenus précédemment montrent qu'il y aura des courants induits très importants et une forte force magnétique de répulsion quand la vitesse angulaire du tambour augmente, Cela montre l'influence de la variation de la fréquence du champ produit sur les courants induits dans figure. IV.15.

Les dimensions de la particule jouent un grand rôle en cours de la séparation, pour cette raison nous calculons que la force magnétique de répulsion, et la distance d'éjection pour les deux particules sont en fonction de la vitesse angulaire du tambour. Ces particules non ferreuses sont caractérisées par la même taille et la même forme.

Les résultats du tableau IV.3 illustrent que la force répulsive est très importante pour le cuivre par rapport à la particule d'aluminium à cause des courants induits qui sont importants dans la particule du cuivre.

La force magnétique d'éjection doit être plus grande que la somme des forces opposées (poids, friction...), pour avoir une séparation magnétique à courant de Foucault.

La condition de séparation magnétique est donnée par :

$$F_{magnetique} \geq F_{poids}$$

Tableau IV.4: Distance d'éjection selon x (mm) en fonction de la vitesse angulaire du séparateur à courant de Foucault.

Vitesse angulaire (tr/mn)	Distance d'éjection selon x (mm)	
	Cu	Al
300	13	24
400	19	31
500	22	34
600	23	38
700	27	41
800	29	44
900	31	45
1000	35	48

Le tableau IV.4 montre une grande force magnétique d'éjection pour le cuivre par rapport à l'aluminium, mais en réalité les particules en aluminium seront éjectées plus loin (dans le collecteur) que les particules de cuivre. Les particules de cuivre seront éjectées près du séparateur au collecteur (proche), parce que le poids (densité de masse) de chaque métal est différent. Cette éjection est différente car la force de la gravité est très importante dans les particules de cuivre par rapport à la particule d'aluminium.

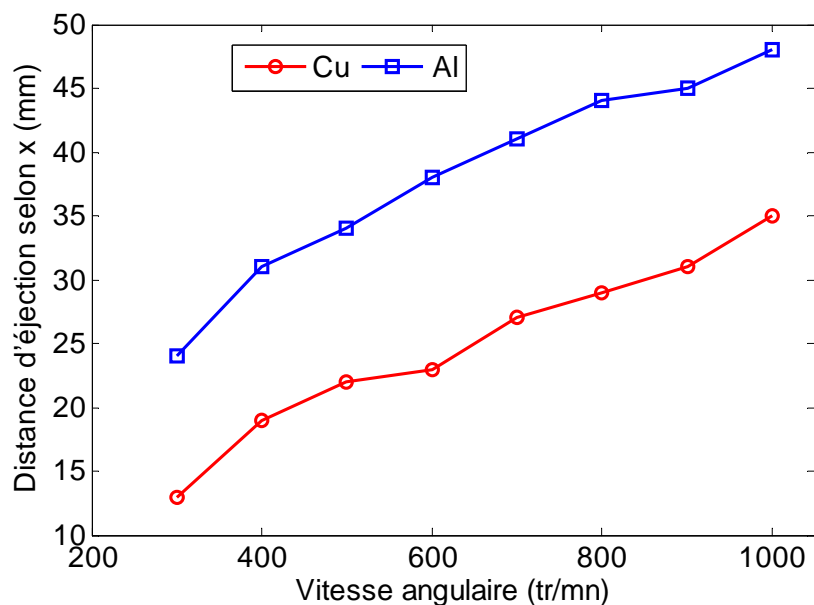


Figure IV.16. Distance d'éjection des particules non ferreuses

Ces paramètres causent une trajectoire différente pour chaque genre de particules non ferreuses.

Le séparateur à courant de Foucault donne une possibilité de trier un mélange de métaux non ferreux, avec une distance de répulsion différente qui varie entre 24 à 48 mm pour les particules en aluminium. Et une distance d'éjection de 13 à 35 mm pour les particules de cuivre, avec une grande pureté et une récupération très élevée.

IV.7 Séparation d'un mélange d'or et de sable

La séparation par courant de Foucault est efficace pour le procédé de tri des métaux non ferreux quelconque comme les particules électriquement conductrices d'or d'un mélange contenant de sable, ainsi que dans plusieurs autres types de déchets.

Cette technique de séparation est efficace pour séparer un mélange d'or et de sables. La première application de cette technique a été utilisée dans un fleuve en Californie par la société industrial arrowhead USA. Il est difficile de trier ces petites particules d'or de quelques millimètres sauf qu'avec le phénomène des courants de Foucault [37].

1. Variation du champ magnétique alternatif

La variation de l'induction magnétique B de 0,12 à 0,84T des aimants permanents $P = 4$, avec un entrefer $e = 2$ cm (figure IV.17).

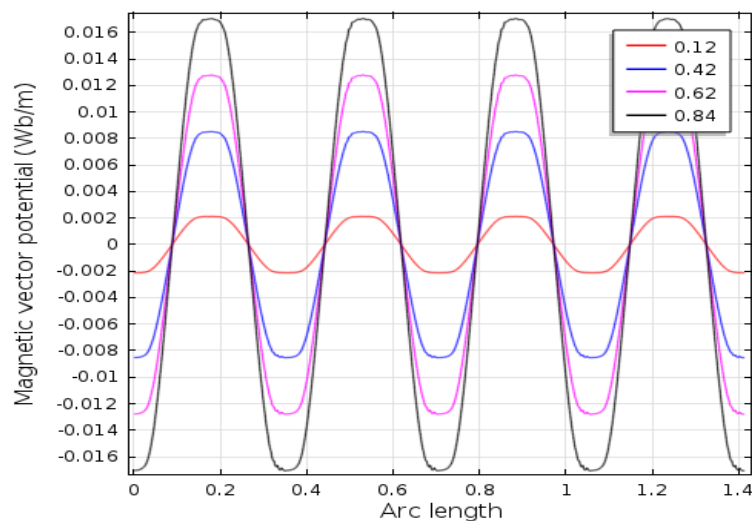


Figure IV.17 Calcul du potentiel vecteur magnétique autour du tambour

L'effet de la variation du champ magnétique alternatif du séparateur à courant de Foucault est assuré par le changement de l'aimantation de chaque aimant permanent de 0,12 à 0,84T.

La figure IV.17 représente le calcul du potentiel vecteur magnétique autour du séparateur (dans la zone active du champ de séparation des particules non ferreuses).

Lorsque l'induction magnétique des aimants permanents est grande le vecteur potentiel magnétique devient important.

2. Courants de Foucault induit dans les particules

Le courant de Foucault induit dans les particules d'or à trier est représenté sur la figure IV.18. Une grande densité des courants de Foucault est présente dans la particule et qui générant un champ magnétique qui s'oppose au champ primaire appliqué.

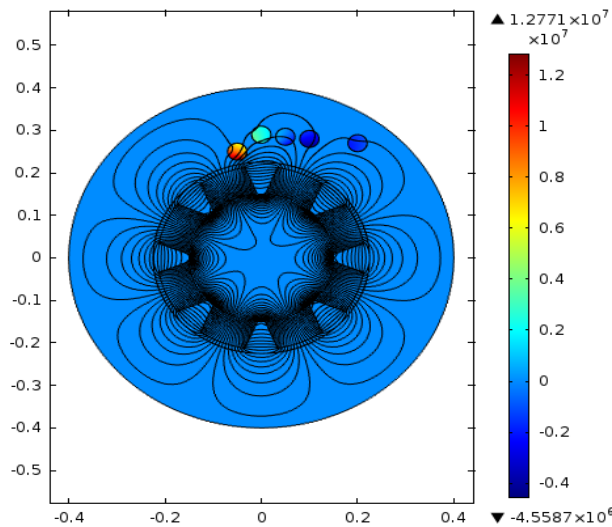


Figure IV.18 Courants de Foucault induit dans les particules non ferreuses rejetées [A / m²]

3. Variation de la densité de flux rémanent et le calcul de la force magnétique

Nous changeons la densité de flux rémanent de l'aimant permanent de 0,12 à 1T, lorsque l'aimantation B_r augmente la force magnétique d'éjection s'améliore. la taille de la particule en or est de l'ordre de 1Cm. Nous enregistrons les valeurs maximales des courants de Foucault et la force magnétique d'éjection des particules d'or en fonction de la vitesse angulaire de rotation du tambour égal à 300 tr/min (tableau IV.5) [37].

Tableau IV.5 Variation de la densité du flux rémanent.

La densité de flux rémanent [T]	Courants de Foucault de induits (A/mm^2)	La force magnétique (mN)
0.12	0.25	0.07
0.22	0.45	0.24
0.32	0.65	0.5
0.42	0.82	0.88
0.52	1.1	1.3
0.62	1.3	1.8
0.72	1.5	2.5
0.82	1.7	3.4
0.92	1.88	4.2
1	2	5

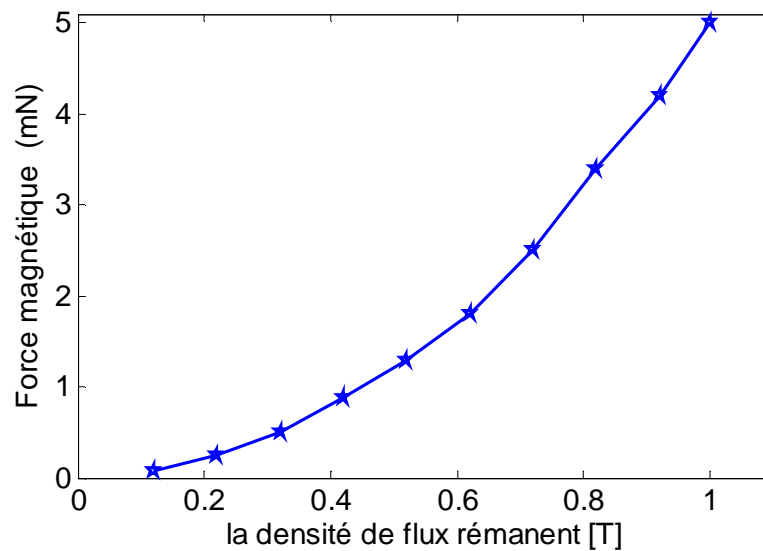


Figure IV.19. Force magnétique en fonction de la densité de flux rémanent de l'aimant permanent

On remarque une augmentation de la force de répulsion magnétique en fonction de la variation de la densité du flux rémanent. L'interaction magnétique entre les particules et le séparateur sera traduite par une très grande force répulsive de Lorentz (figure IV.19).

4. Distance de répulsion des particules d'or

On peut calculer les différentes distances d'éjection de petites particules d'or en fonction de la densité du flux rémanent ou en fonction de la force magnétique exercée sur les particules (figure IV.20). Les résultats montrent une répulsion très importante de la particule lorsque la densité de flux rémanent est élevée [37].

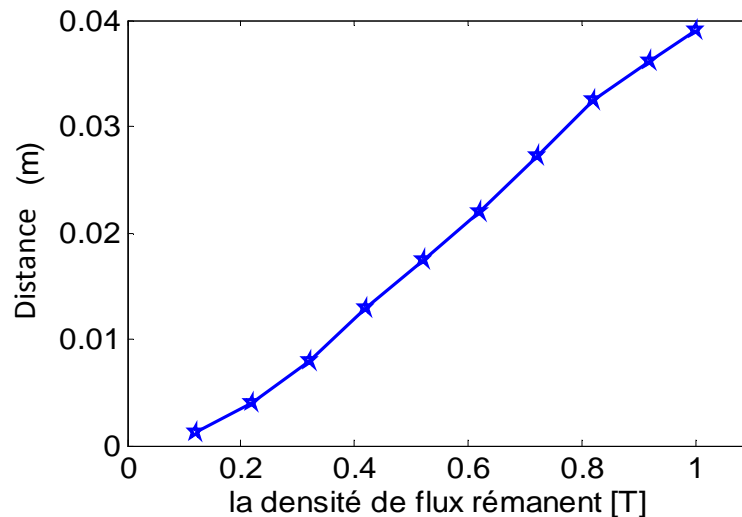


Figure IV. 20. Distance d'éjection des particules d'or en fonction du gradient de champ des aimants

5. Variation de l'entrefer du séparateur

Variation de la distance entre le séparateur (aimant permanent) et les particules pour calculer la force magnétique et les courants de Foucault induit dans les particules d'or (Au) en fonction de la taille $D = 1$ Cm (tableau IV.6).

Tableau IV.6 Variation de l'entrefer entre l'aimant permanent et les particules.

Entrefer Y [m]	Le courant induit (A/mm ²)	La force magnétique (mN)
0.005	2	4.5
0.01	1.6	3
0.02	1.3	2.1
0.03	1.1	1.45
0.04	0.95	1.05
0.05	0.8	0.7
0.06	0.7	0.5
0.07	0.6	0.37
0.08	0.52	0.26
0.09	0.5	0.19
0.1	0.42	0.13

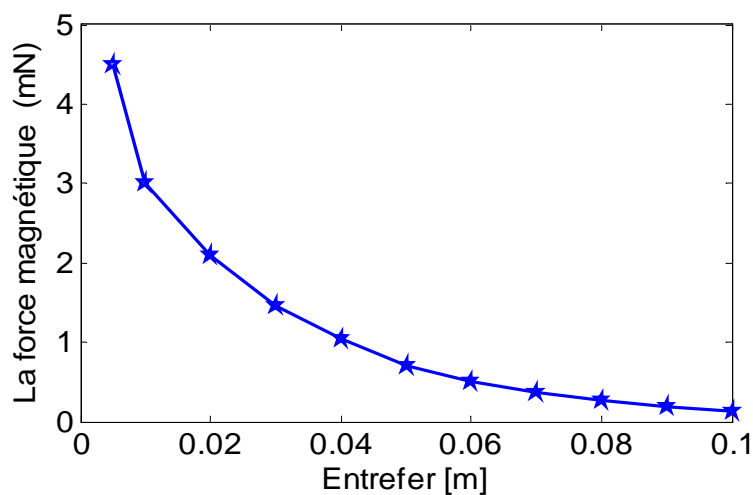


Figure IV.21. Force magnétique en fonction d'entrefer

À partir du tableau IV.6 la force magnétique dépend de l'intensité du champ magnétique. Lorsque la particule est loin du séparateur, l'entrefer est important et la force magnétique diminue, contrairement lorsque l'entrefer est petit, la force répulsive sera importante (figure IV. 21). Car la concentration du champ est très importante autour du séparateur.

6. Calcul de la distance d'éjection en fonction de l'entrefer

La distance de répulsion des particules d'or d'un mélange contenant du sable est en fonction de nombreux paramètres comme : l'intensité du champ, la taille des particules L'entrefer entre les particules et l'aimant de séparation joue un rôle important dans le processus de séparation des courants de Foucault, car la longueur d'onde magnétique du champ du séparateur et la force magnétique et la distance de déviation diminuent en fonction de la distance d'entrefer (figure IV.22).

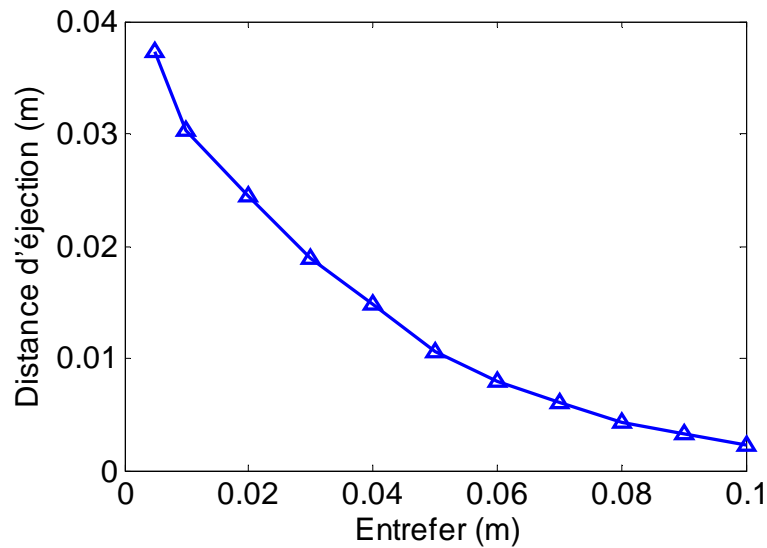


Figure IV.22. Distance d'éjection en fonction de l'entrefer

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé le séparateur à courant de Foucault à aimant permanent, avec une représentation de la distribution des paramètres magnétiques : le vecteur potentiel magnétique et l'induction magnétique.

À partir des résultats de simulation, on peut conclure que:

- Le choix du dimensionnement d'entrefer a une grande influence sur la magnétisation du milieu et des particules autour du rotor.
- Nous avons étudié l'influence du nombre de paires de pôles sur la distribution du vecteur potentiel magnétique autour du séparateur.
- Nous avons vu des différentes interactions magnétiques lors de la présence des particules de différentes natures proches du séparateur comme l'or le cuivre et l'aluminium.
- Nous avons montré la variation de la distance d'éjection en fonction de différentes particules et de différentes valeurs d'entrefer et même pour le changement de l'induction magnétique.
- Nous avons illustré l'influence de la conductivité et la densité volumique ou le poids des particules non ferreuses sur le courant induit et la force de répulsion.

Les résultats de simulation numérique expliquent l'influence du poids sur la force d'éjection des particules en aluminium. Plusieurs paramètres rentrent en jeu et influent sur l'amplitude de la force magnétique de séparation seront étudiés dans les prochains travaux.

Le dernier chapitre est consacré à une réalisation d'un séparateur magnétique rotationnel.

CHAPITRE -V-

Etude et réalisation d'un
séparateur magnétique
rotationnel

V.1 Introduction

Le choix des séparateurs magnétiques dépend de plusieurs caractéristiques en particulier : le rendement, le coût et le taux de séparation par heure. La pureté et la qualité de séparation des déchets mixtes sont traduites par une quantité de perte moins importante ou minimale de récupération. Ces facteurs sont très importants et qui influent sur la diminution des revenus générés et le cout. La séparation magnétique permet de trier plusieurs matériaux à la fois c'est-à-dire les matériaux ferreux et les matériaux isolants.

Dans notre travail nous allons développer un modèle de séparateur à tambour rotatif magnétique à aimants permanents placés à la circonférence du cylindre.

Une simulation est réalisée avec le logiciel COMSOL pour visualiser les lignes de champ et leur dispersion le long du tambour. Des expériences de séparation de déchets mixtes fer cuivre ont été effectuées par notre séparateur à tambour magnétique rotatif pour différentes vitesses de rotation et différentes tailles granulaires des particules à séparer [39].

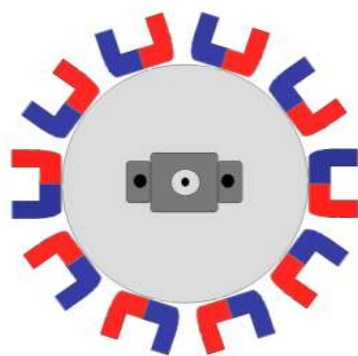
Notre objectif est d'avoir un rendement important dans la séparation des déchets mixtes ferreux (fer) et non ferreux (cuivre). L'amélioration du rendement dépend des caractéristiques physiques, mécaniques et magnétiques comme : la forme des aimants permanents, la vitesse de rotation du cylindre, la taille des particules, la conductivité et la perméabilité.

V.2 Présentation du tambour magnétique rotatif du séparateur

a-Aimants permanents

Les aimants permanents sont utilisés dans les séparateurs magnétiques à basse intensité destinée à la séparation des substances ferromagnétiques. L'utilisation des aimants permanents a des dispositions transversales, longitudinales ou radiales, fixées ou en mouvement dans le tambour. Ils sont des matériaux caractérisés par une induction rémanente (B_r) les rendant aptes à créer un champ magnétique sans dépenses d'énergie. Les aimants les plus couramment utilisés en acier aimanté.

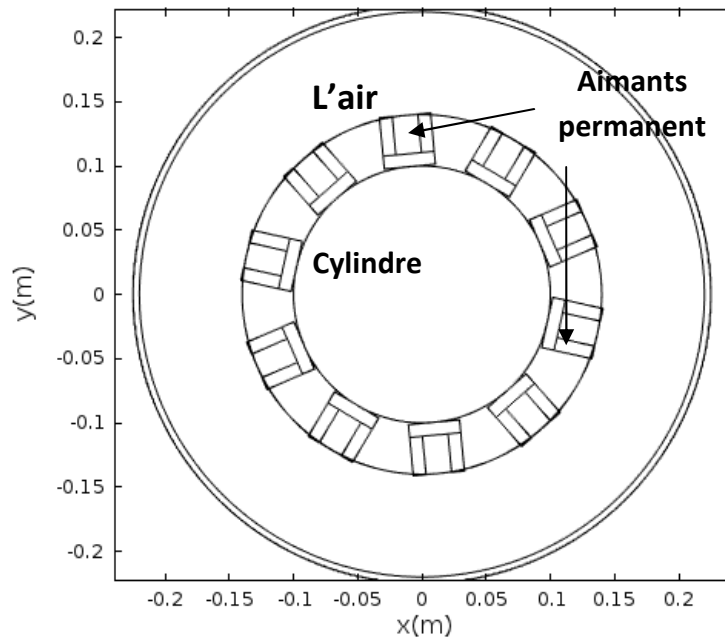
Le modèle utilisé dans notre travail est présenté dans la figure V-1. On a installé sur un disque en aluminium des aimants permanents d'une façon alternée (pôle sud/pôle nord) pour obtenir un champ magnétique alternatif [39].



a- Schéma structurel



b- Tambour à aimant permanent



c-Construction de la géométrie dans le logiciel Comsol 4.3 Multiphysics

Figure V-1: Séparateur rotationnel avec tambour à aimant permanent

b-Séparateur rotationnel

Le problème électromagnétique est un sujet dont la solution est régie par les équations de Maxwell avec certaines conditions aux limites, déjà vu dans le chapitre II.

La simulation des lignes de champ magnétique dans le plan 3D ou 2D, a pour objectif d'étudier les phénomènes magnétiques qui régissent notre modèle. Nous utilisons le module AC/DC du logiciel Comsol pour simuler le séparateur à tambour [26].

Notre modèle est constitué de trois sous-domaines comme suit :

- ✓ Le premier domaine est l'air, il a les paramètres physiques suivants :

$$\text{Perméabilité relative } \mu_r = 1$$

$$\text{Permittivité relative } \varepsilon = 1 \text{ epsilon}$$

$$\text{Conductivité électrique } \sigma = 0$$

- ✓ Le deuxième domaine est le cylindre en Aluminium avec les paramètres suivants:

$$\mu_r = 1, \quad \varepsilon = 1, \quad \sigma = 2.774e7 [\text{S/m}]$$

- ✓ Le troisième domaine est les aimants permanents, chaque aimant permanent est caractérisé par un flux rémanent de module égal à l'unité : $\|Br\| = 0.84 \text{ T}$.

Après avoir développé le modèle mathématique basé sur les équations différentielles partielles (PDE). Nous allons choisir le domaine d'étude « Magnetic fields no currents 'mfnc' » pour simuler nos aimants permanents afin de montrer et visualiser les lignes de champ produites par ces aimants dans l'étude magnétostatique [48].

V.3 Résultats de simulation

A- Aimant permanent en 2D

Les résultats de simulation obtenus par le logiciel COMSOL en de deux dimensions (2 D) d'un aimant permanent sont représentés dans la figure V.2.

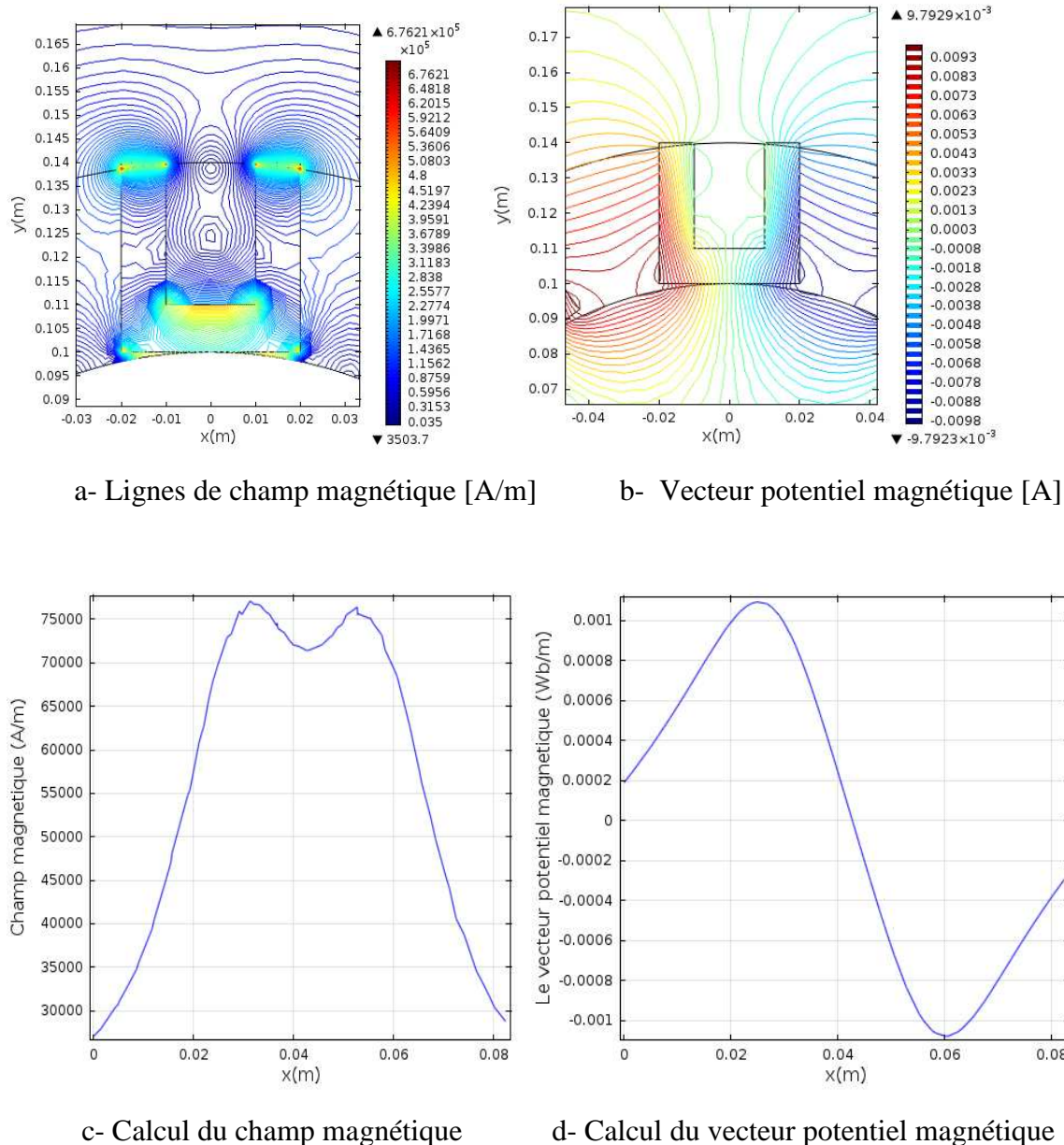


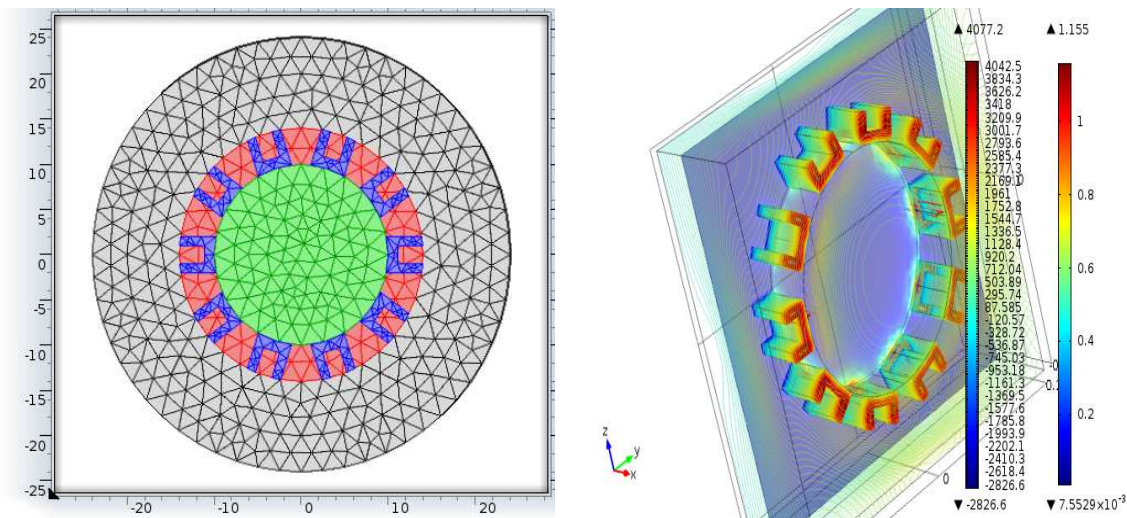
Figure V-2 Caractéristiques d'un aimant permanent.

Les figures V.2 représentent les caractéristiques magnétiques des deux extrémités d'un aimant permanent tel que le champ magnétique, et le vecteur potentiel magnétique avec deux polarités différentes. Les mesures de ces paramètres sont données sur le long d'une ligne de longueur de 8 cm sur l'axe x pour une distance entre l'aimant permanent de 0.2 cm.

B- Simulation du tambour rotatif à aimant permanent

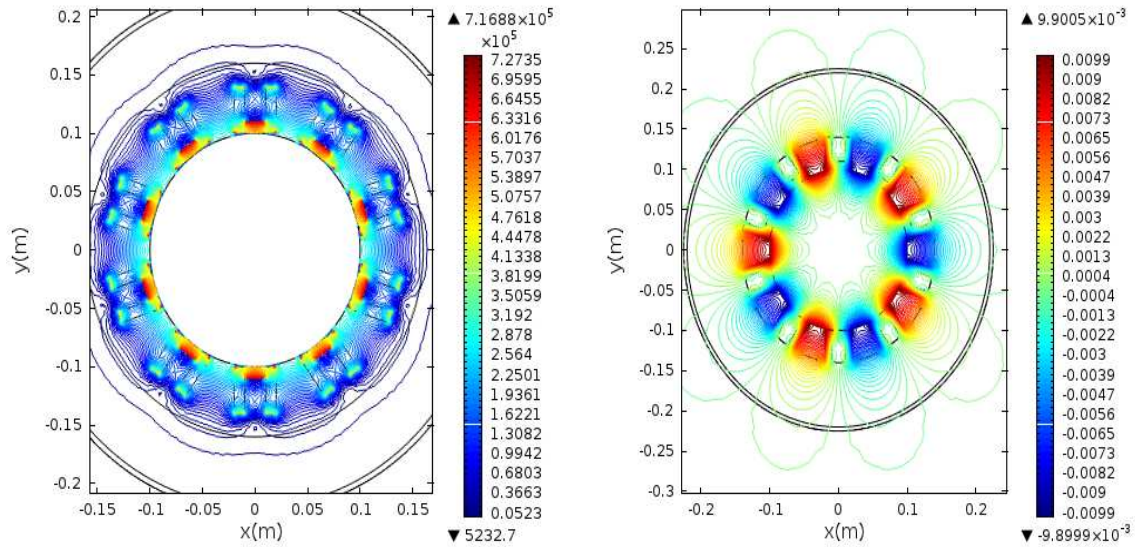
La figure V.3-a représente la géométrie du modèle dans le cas d'une étude bidimensionnelle, ce qui nous permet de ramener l'étude au plan (ox,y). Le maillage de notre système est d'une forme triangulaire générée par le logiciel COMSOL. Pour les conditions aux limites nous imposons le vecteur potentiel magnétique nul sur les frontières du domaine de résolution (conditions aux limites $A=0$ sur les frontières du domaine de résolution (condition de Dirichlet)) [48].

En appliquant un flux rémanent pour chaque aimant permanent et en utilisant le code de calcul adapté au modèle magnétostatique, nous obtenons les valeurs du vecteur potentiel magnétique A , a chaque nœud du maillage du domaine d'étude. La figure (V.3-b) représente la distribution de ce potentiel vecteur magnétique.



a- Maillage du domaine d'étude b- modèle du cylindre a aimant permanent en 3Dimensions

Figure V-3 Implémentation du séparateur magnétique dans le logiciel Comsol



A- Champ magnétique (A/m)

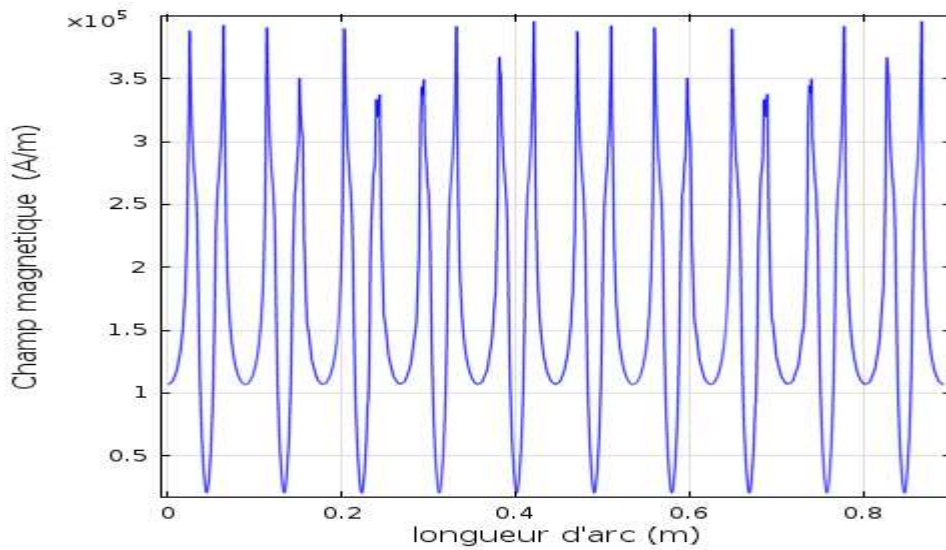
B- Vecteur potentiel magnétique (A)

Figure V-4 Lignes magnétiques autour du séparateur rotatif à dix aimants permanents.

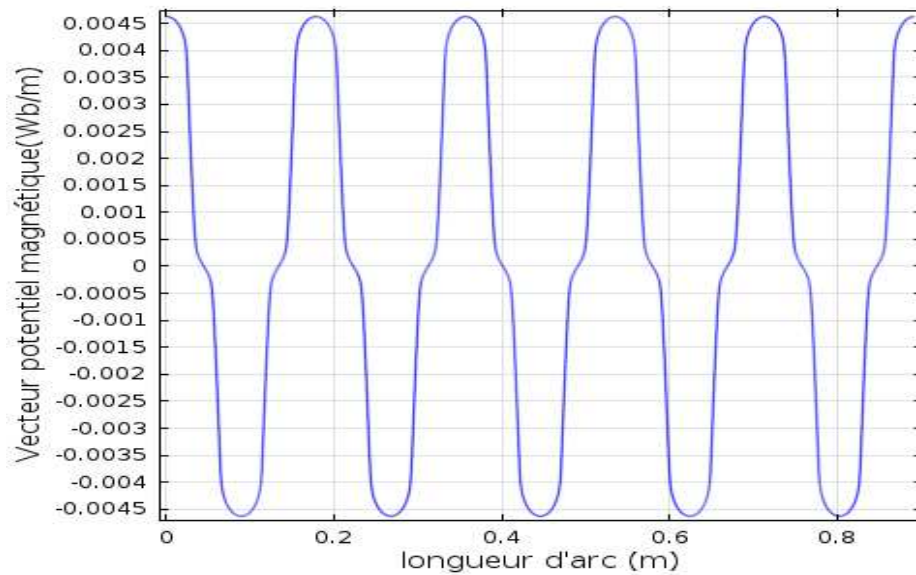
D'après les résultats de simulation, la figure V.4 montre une forte distribution de l'induction magnétique et du vecteur potentiel magnétique autour des aimants permanents, surtout dans la zone proche de la surface du séparateur [39].

C- Courbes des caractéristiques magnétiques du séparateur

Les figures ci-dessous représentent les mesures du champ magnétique autour du séparateur et l'induction magnétique. Ces mesures montrent l'influence de géométrie des aimants permanents sur la distribution des lignes magnétiques.



A- Champ magnétique (A/m)



B-Potentiel vecteur magnétique.

Figure V-5 : Courbes caractéristiques du séparateur rotatif

D- Influence de la variation d'entrefer

La variation de la distance d'entrefer entre les aimants permanents et le transporteur ou le convoyeur (la trajectoire des particules) montre un très important changement dans l'amplitude de l'intensité du champ magnétique, c'est grâce aux caractéristiques des aimants permanents.

Les mesures de simulation autour du tambour à dix aimants permanents sont montrées dans la figure suivante en fonction de l'entrefer. Les valeurs sont données respectivement comme suit (0.4, 1, 1.5, 2, 4 cm). La valeur du champ magnétique diminue quand la distance d'entrefer augmente, cela explique l'influence du champ sur la variation de la force d'attraction entre aimants et particules ferreuses.

Les résultats montrent un champ magnétique alternatif de forme répétitive, c'est un champ périodique fini. La gamme de la densité du champ magnétique est de $3 \cdot 10^3$ pour un entrefer de 4 cm et de l'ordre de $2.2 \cdot 10^5$ (A/m) pour un petit entrefer très proche de 0.4 cm, voir la figure V.6

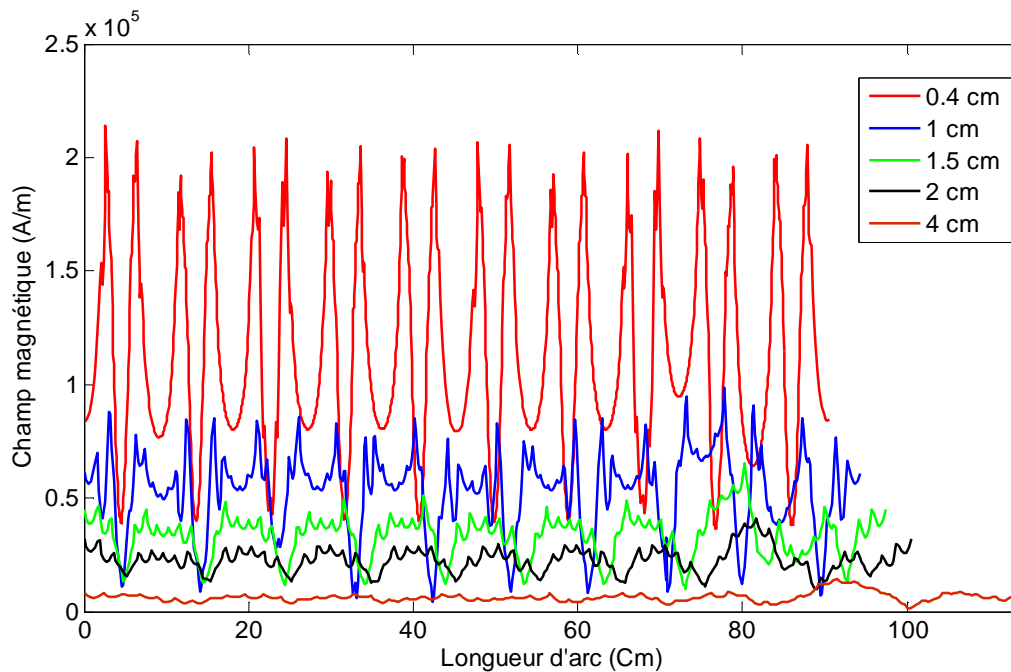


Figure V.6 Variation du champ magnétique en fonction de la distance d'entrefer

La figure V.7 montre la mesure du vecteur potentiel magnétique dans l'entrefer en fonction de la distance Y d'une droite de 11 cm. Lorsqu'on s'éloigne des aimants permanents il y aura une diminution très importante de l'amplitude du potentiel magnétique scalaire.

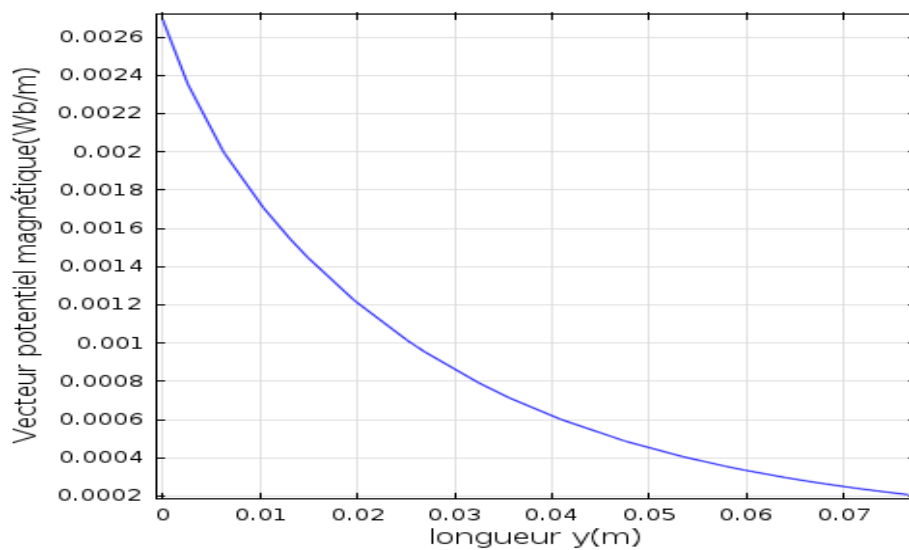


Figure V.7 Vecteur potentiel magnétique dans l'entrefer

La figure V.8 montre les composantes de l'induction magnétique à l'état rotationnel autour du séparateur produit par les aimants permanents en fonction d'entrefer. La vitesse angulaire de rotation du tambour est de l'ordre de 100 tr/min.

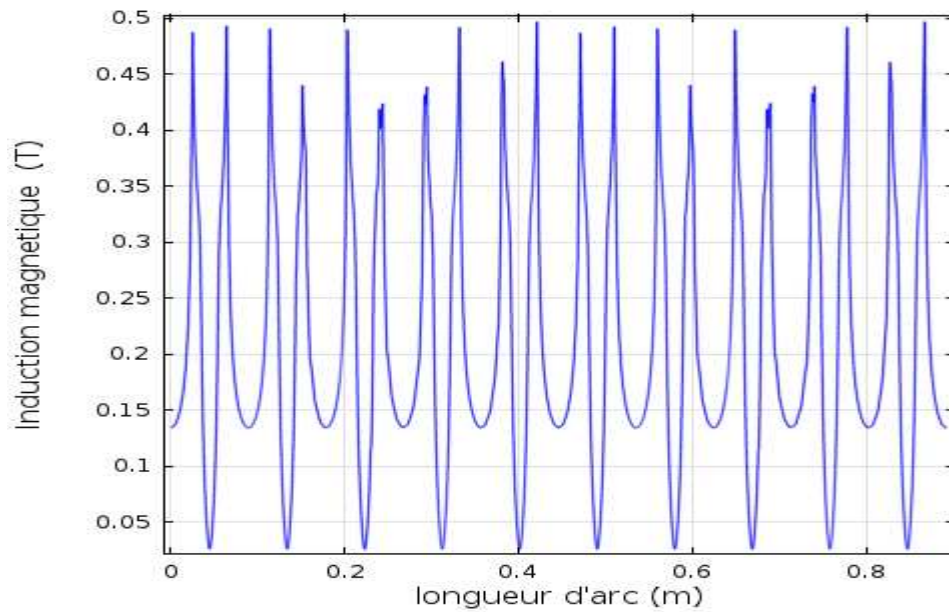


Figure. V.8 : L'induction magnétique

La figure V.9 représente la variation de l'induction magnétique en valeur absolue en fonction du temps dans une période de rotation, le long d'un entrefer de taille : 14.4 à 19 cm.

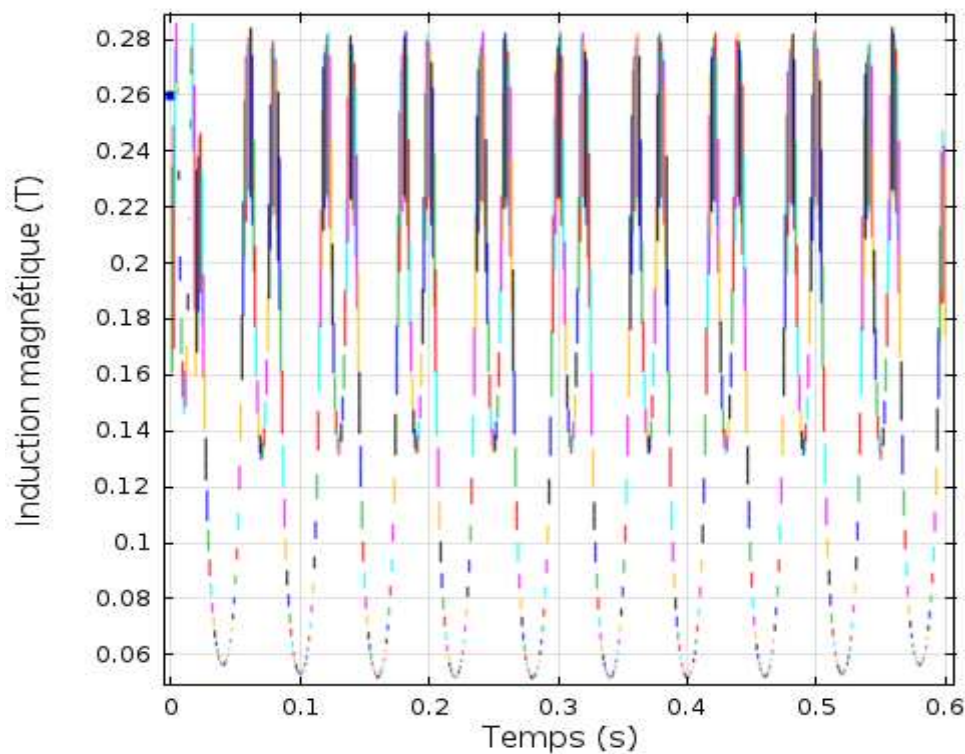


Figure V.9 Variation de l'induction magnétique en fonction du temps

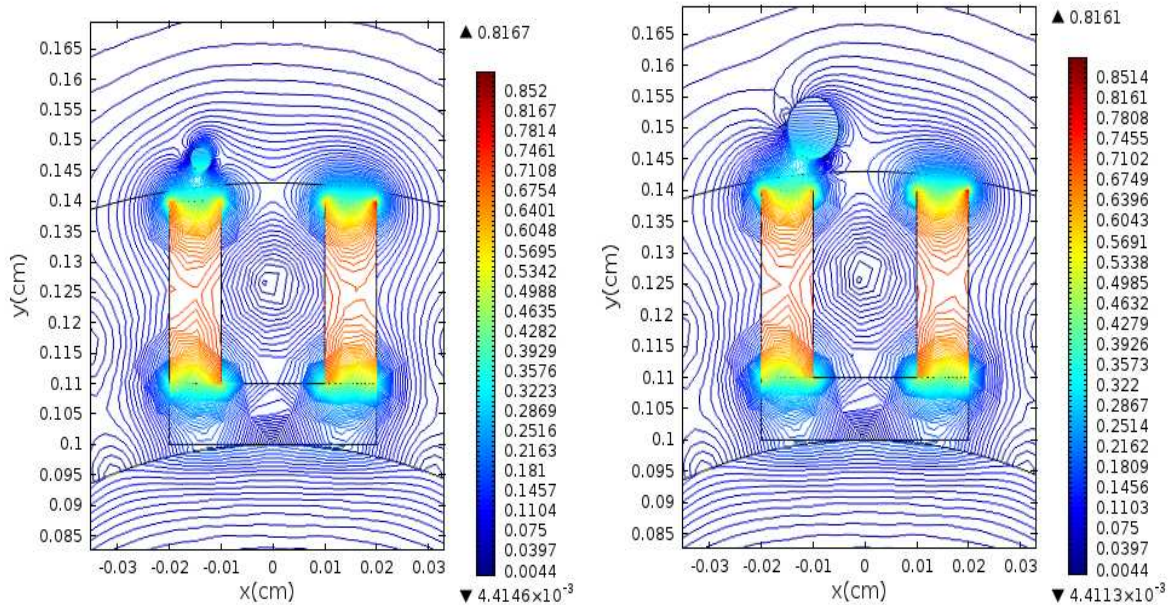
D'après les résultats temporels obtenus, on peut remarquer les fluctuations de l'induction magnétique dans l'entrefer dû à la rotation des dix aimants permanents. Avec dix cycles à double pic causé par la forme u d'aimant permanent qui contient deux pôles.

Le choix de la forme U montre la variation de la forme sur la distribution des caractéristiques magnétiques, en fonction du temps. Ces résultats indiquent que l'induction magnétique est un champ périodique et limité.

E- Présence des particules ferreuses autour du séparateur rotationnel

E-1 Petite taille

La figure V.10-A présente la distribution des lignes de l'induction magnétique autour de la particule du fer de petite taille. Cette figure montre une grande concentration autour d'elle grâce à la constitution et la nature structurale des métaux ferreux.



A- Petite taille

B- Grande taille

Figure V.10 Présence des particules ferreuses proches du séparateur

E-2 Grande taille

Pour les particules de grande taille, les résultats montrent l'influence de la taille des particules ferreuses sur la distribution des lignes du champ magnétique à l'extrémité surfacique de la particule. L'induction magnétique induite dans le volume de la particule avec une grande concentration est illustrée dans la figure V.10-B.

En fonction la distribution importante de la densité magnétique représentée dans les figures précédentes autour du séparateur, il y aura une force d'attraction importante qui sert à trier les déchets ferreux des non ferreux.

Pour mieux comprendre et expliquer cette distribution nous allons calculer les forces magnétiques exercées sur ces deux particules de différentes tailles dans différentes positions par rapport au tambour [39].

V.4 Calcul de la force magnétique du séparateur

Les grandeurs décrivant l'excitation magnétique sont le champ magnétique « H » et l'induction magnétique « B ». L'excitation magnétique c'est la somme de l'induction du champ magnétique extérieur et intérieur qui est en fonction de l'aimantation « M » propre au milieu aimanté. Le champ magnétique induit des moments dans les atomes constituant une matière et tend à les aligner dans une direction.

Le magnétisme des atomes résulte du mouvement des électrons qui induisent un moment magnétique dit orbital, associé à leur révolution autour du noyau dit de spin. Le moment magnétique total est la combinaison vectorielle des moments orbitaux et de spin, ainsi que la susceptibilité magnétique de la matrice. Ils font l'objet d'une séparation ou non, elle est présentée dans plusieurs relations avec l'intensité du champ, ou l'aimantation, M ($\vec{M} = \chi\vec{H}$), etc.

Quand les interactions entre les moments atomiques générés sont suffisantes pour accentuer l'alignement et générer une hystérésis. Il s'agit d'une matière ferromagnétique, les matières ferromagnétiques sont attirées vers le champ magnétique. Beaucoup de paramètres influent sur le champ magnétique de séparation tel que, l'aimantation, l'induction, et la susceptibilité magnétique.

V.4.1 Forces présentes dans le séparateur magnétique

La séparation magnétique s'effectue dans un espace où l'aimantation du milieu est directement proportionnelle au champ magnétique. Le champ magnétique agit de façon sélective sur les corps de volume « dV » qui présentent la plus grande aptitude à l'aimantation, voir l'annexe B.

a- Force magnétique

Pour les opérations de tri magnétique, la force d'attraction magnétique bipolaire agissant sur une particule paramagnétique dans le vide est donnée par (voir l'annexe B):

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V \text{ grad}(H^2) \quad (\text{V.1})$$

Pour calculer la force d'attraction magnétique applicable de cette particule. Cet aspect ainsi que le bilan des forces présentes dans un séparateur magnétique sont traités.

b- Forces mécaniques

La séparation magnétique d'une particule assimilée comme un dipôle signifie l'interaction d'une combinaison de force agissant dans différentes directions et dont les plus fréquemment rencontrées sont trois forces différentes : magnétique « fm », gravitationnelle « Fg », centrifuge « Fc », soit [51] (voir l'annexe B):

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V \text{ grad}(H^2) \quad (\text{V.2})$$

La force de gravité :

$$\vec{F}_g = m\vec{g} \quad (\text{V.3})$$

La force centrifuge :

$$\vec{F}_f = \rho V \omega^2 R \quad (\text{V.4})$$

R rayon du tambour (ou cylindre) de séparation,

\vec{g} Accélération due à la pesanteur,

ω vitesse angulaire de la particule,

Pour que la séparation ait lieu, il est nécessaire que la valeur de la force magnétique autour du séparateur soit supérieure à la somme des forces antagonistes, développées par le système, et les forces inters particules montées dans la figure V.11.

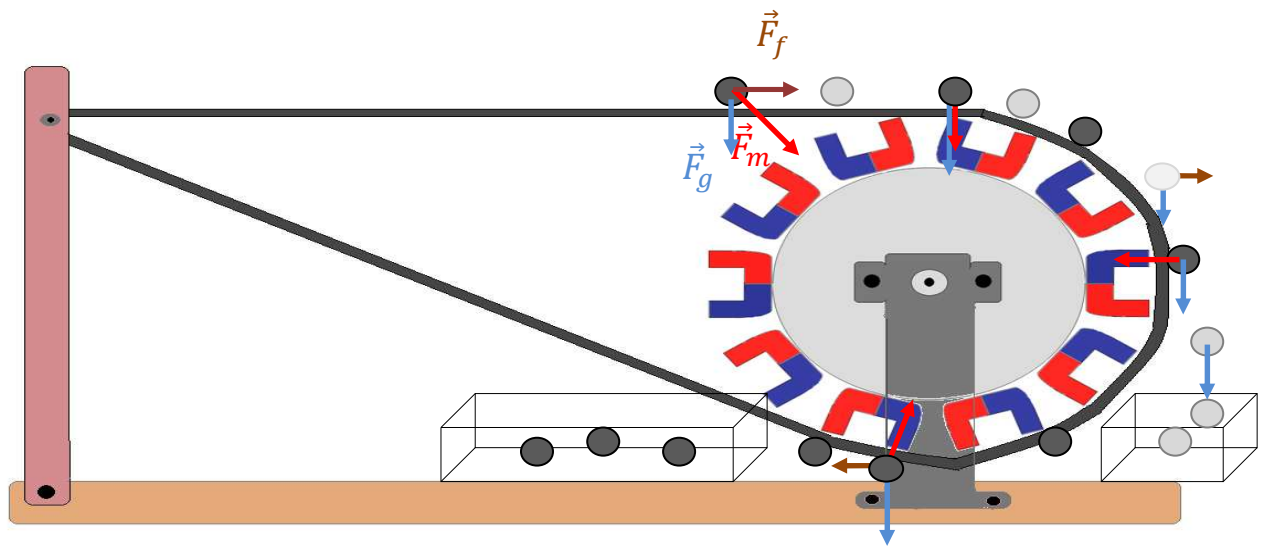
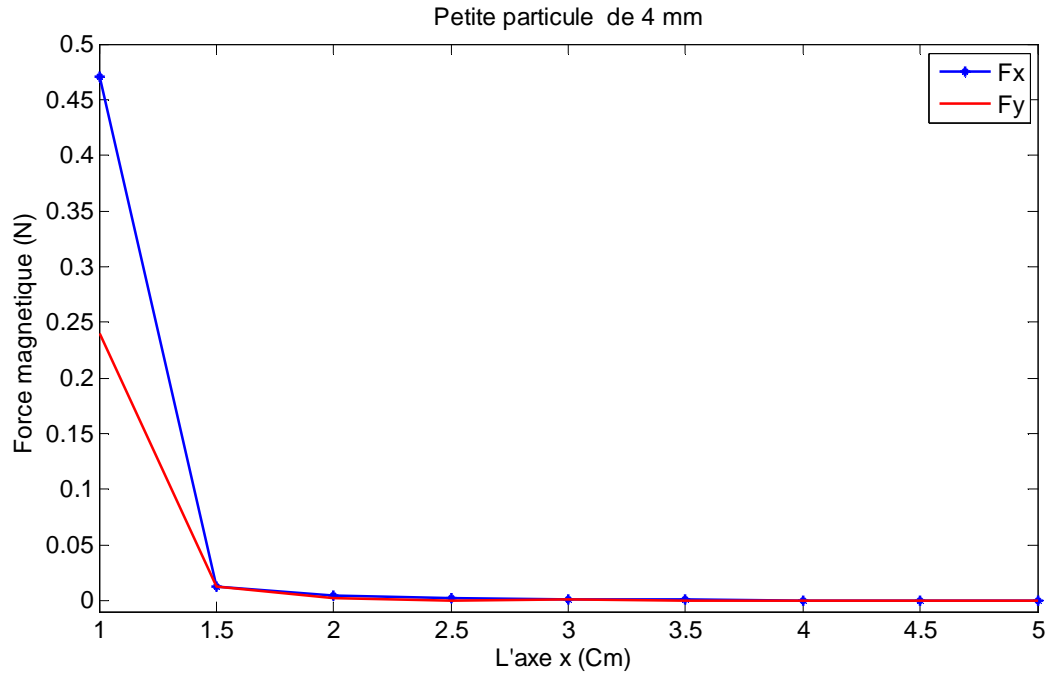


Figure V.11 Schéma de principe de séparation

La valeur du facteur de démagnétisation D dépend de la forme du corps et varie entre 0 et 1. Les valeurs de χ_f sont très faibles ($0,4 \times 10^{-6}$ pour l'air) et peuvent être négligées.

V.4.2 Calcul des forces magnétiques exercées sur les particules ferreuses

La figure V.12 montre l'influence de la distance horizontale x entre les particules et les aimants permanents lors du transport des particules par le convoyeur. Lorsqu'une particule s'approche du séparateur à aimant permanent. Il y aura un grand changement dans les amplitudes des composantes de ses forces qui sera traduit par une forte force d'attraction pour les particules de grande taille. Au contraire les forces seront moins importantes pour les particules de petite taille.



Fx : Composante de la force selon l'axe x, Fy : la composante de la force selon l'axe y

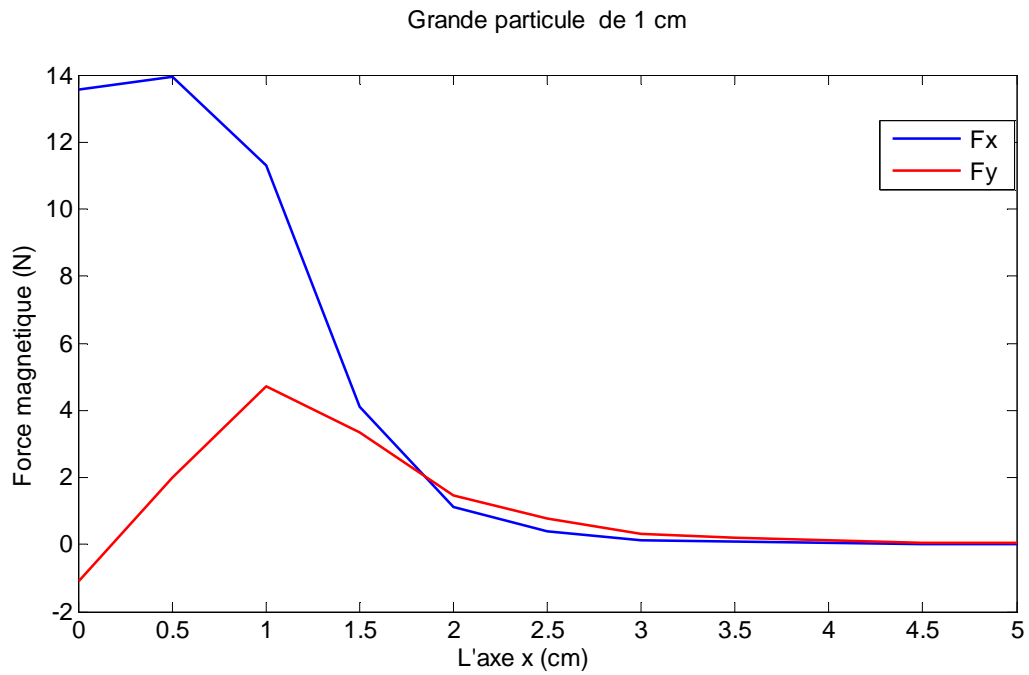
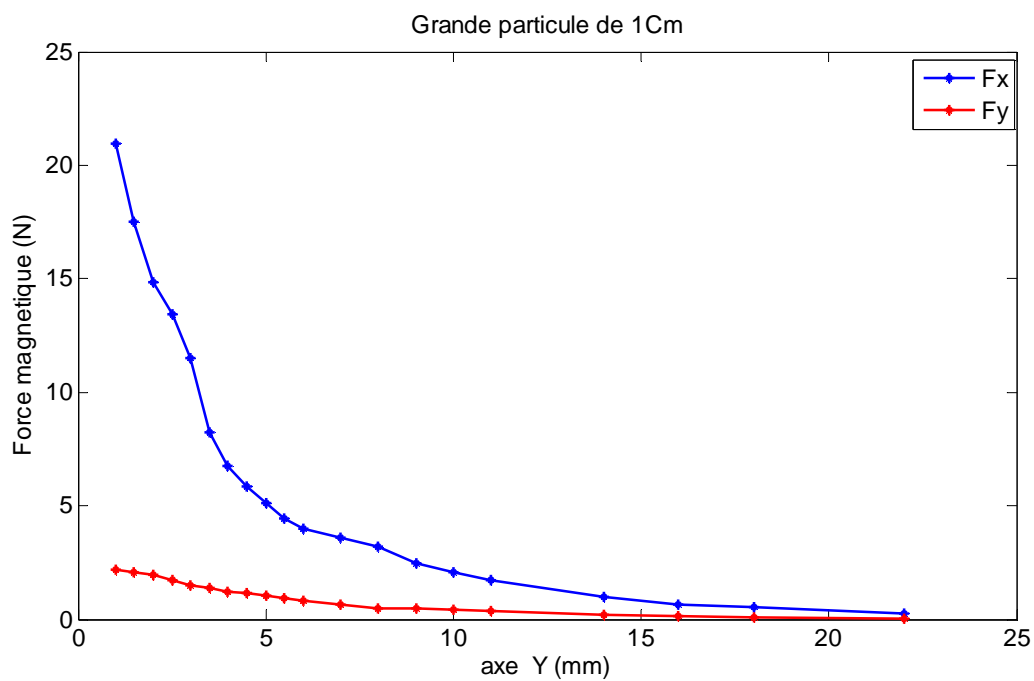
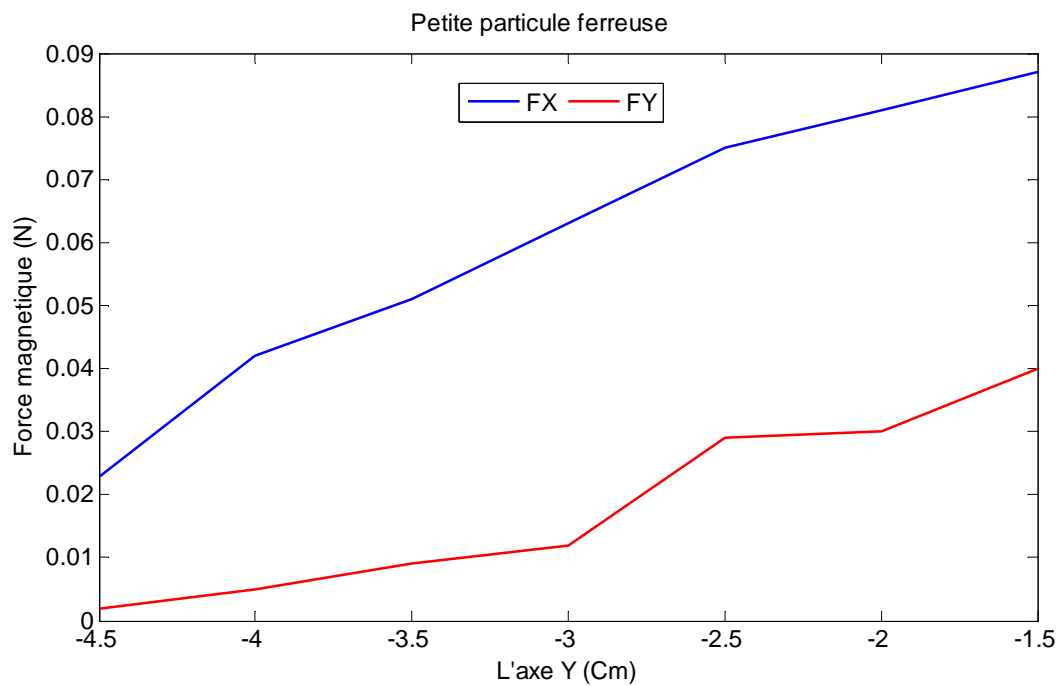


Figure V. 12 Déplacement suivant l'axe x

A- Déplacements suivant l'axe y d'une petite particule



B- Déplacements suivant l'axe y

Fx : Composante de la force selon l'axe x (horizontale),

Fy : Composante de la force selon l'axe y (verticale)

Figure V.13 Influence de la distance Y entre les particules et les aimants permanents

Les courbes de la figure V.13 expliquent le choix de la distance optimale, où les particules sont verticalement transportées par le convoyeur vers le tambour. D'une autre façon c'est le choix de la distance d'entrefer entre le transporteur en caoutchouc et les aimants permanents qui est importante, pour les deux types de particules ferreuses.

D'après les résultats précédents, on peut conclure que les forces deviennent très importantes et augmente lorsque la distance décroît pour les deux types, mais avec des grandes valeurs pour les particules de grande taille.

On constate que la dimension des particules ferreuses (le volume ou le diamètre) avait un impact très important sur les forces magnétiques du séparateur magnétique.

La chute libre des métaux non ferreux selon leur gravité (poids) peut être expliquée par le fait que la composition de l'aluminium ou le cuivre est différente car les forces magnétiques n'affectent pas les particules amagnétiques.

V.5 Réalisation d'un séparateur à tambour magnétique rotationnel

V.5.1 Description technique du banc d'essai

Dans cette partie nous allons présenter la conception du dispositif expérimental d'un séparateur rotationnel. Il est constitué de :

- Cylindre en aluminium
- Dix aimants permanents autour du cylindre.
- Transporteur en caoutchouc qui transporte les particules du jet
- Des supports pour la fixation
- Moteur d'entraînement
- Mandrin de raccordement
- Alimentation variable
- Particules ferreuses et non ferreuses
- Balance numérique

L'ensemble du matériel est représenté dans les figures suivantes :



a- Aimant permanent



b- Alimentation monophasée



c. Double alimentation



d- Photo du dispositif de séparation au laboratoire ICEPS

Figure V.14 : Banc d'essai expérimental d'un séparateur rotatif à aimant permanent

Le séparateur magnétique à tambour rotatif a un rayon de 10 cm, avec dix aimants permanents de 4 cm de longueur et 4 cm de largeur en forme de U placé sur le périphérique du cylindre au laboratoire ICEPS université de sidi bel abbes (Figure V.14).

Le tapis roulant mobile joue le rôle de transporteur. Il est utilisé pour assurer le mouvement des particules. Les particules roulent sur le tambour et tombent immédiatement par l'influence de leurs poids dans le premier collecteur.

Les particules ferromagnétiques sont attirées ou collées sur la surface du tapis. Lorsque le tapis s'éloigne des aimants, les particules sont acheminées vers l'autre extrémité, elles sont alors éjectées dans le deuxième collecteur figure V.16.

a- Préparation des échantillons :

Dans nos essais nous avons deux types de particules de tailles différentes à séparer.

- ✓ Le premier essai, l'échantillon contient des déchets domestiques composés de boulons, d'écrous ferreux et des morceaux en aluminium découpés dont la taille varie de 5 mm à 2 cm.
- ✓ Pour le deuxième essai, on a pris des métaux ferreux et non ferreux (aluminium/bronze) en poudre de petite taille (1 à 3 mm), figure V.15.



a : Grande taille (boulon)

b : Petite taille (poudre)

Figure V-15 : Échantillons des particules ferreuses et non ferreuses.



Figure V-16 : Séparateur à deux collecteurs

V.5.2 Étude expérimentale de la séparation

a-Mécanisme de la séparation

Le séparateur à induction magnétique est capable de trier les objets de grande taille (canettes d'aluminium ou boîtes en acier) et des particules broyées à une taille bien définie des déchets quelle que soit sa nature : ferreuse, non-ferreuse et non conductrice (matériaux isolants).

Pour notre application nous allons séparer un mélange de particules de fer et de cuivre en utilisant notre dispositif de séparation.

Les particules non ferreuses vont tomber du transporteur vers le collecteur II du cuivre (la figure V.16 et 17) à cause de leurs poids et la gravité, ainsi que la force de centrifuge.

V.5.3 Résultats expérimentaux

a- Séparation des particules de petite taille

Notre séparateur contient deux collecteurs de déchets à séparer, le premier pour les matériaux ferreux (fer) et le deuxième pour matériaux non ferreux montrés figure V.17.



a- Tri des particules de petite taille



b- Collecteur II (non ferreuses)



c- Collecteur I (ferreuses)

Figure V.17 : Collecteurs des particules du séparateur

Le tableau suivant résume les résultats de la séparation en fonction de la vitesse de rotation. Le tri des particules à petite taille pour une quantité mixte de 200g de mélange (100g de fer et 100g particule non ferreuses) les valeurs du taux de récupération sont montrées dans la figure V.18. Les mesures du taux de récupération de fer sont données dans le tableau suivant :

Tableau V .1 : Séparation des déchets de petite taille (poudre) en fonction de la vitesse du tambour

Vitesse tour/mn	Collecteur I (Fe) %	Collecteur II %
20	100	94
40	100	97
60	100	99
80	100	100
100	100	100
120	100	100
140	100	100
160	100	100
180	100	100
200	99	101
220	95	104
240	93	107
260	90	110
280	87	113
300	84	115

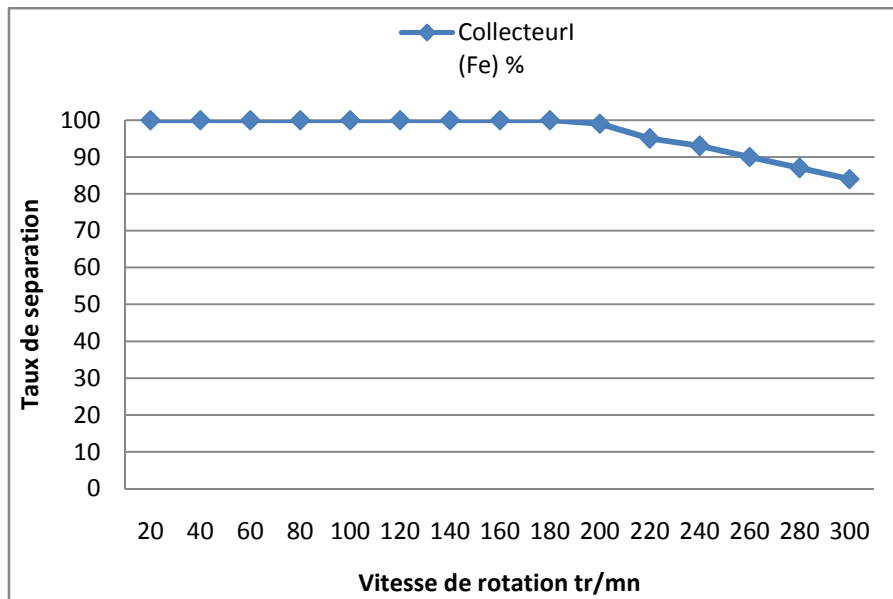


Figure V.18 : Séparation magnétique des particules de petite taille.

Les résultats de la séparation magnétique des particules de petite taille montrent l'influence de la variation de la vitesse sur la séparation. Lorsque la vitesse augmente le tri des métaux ferreux est moins efficace qui atteint 84 % pour 300tr/min, cela est expliqué par l'influence de la petite taille ou du volume de la particule.

Pour la grande vitesse la force cinétique obtenue sera plus importante que la force magnétique de séparation. Il est traduit par une présence des particules ferreuses dans le collecteur II des métaux non ferreux, cela va influencer sur la séparation des petites particules. La conclusion tirée de cette séparation montre que la vitesse moyenne entre 80 et 180 tr/min donne une séparation efficace pour un mélange de petites particules.

b- Séparation des particules de grande taille

Les figures V.19 suivantes présentent la séparation des particules de grande taille (ferreuses et non ferreuses).



a- Collecteurs des métaux ferreux et non ferreux

Figure V.19 : Séparation des particules de grande taille

Le tableau suivant montre les résultats de séparation entre des échantillons de grande taille. La quantité totale du mélange est de 100g (Masse Fe, = 100g, Masse non ferreux = 100g). Matériaux non ferreux (aluminium).

Tableau V .2 : Séparation des déchets de grande taille en fonction de la vitesse du tambour.

Vitesse tour/mn	Collecteur I (Fe) %	Collecteur II %
20	100	100
40	100	100
60	100	100
80	100	100
100	100	100
120	100	100
140	100	100
160	100	100
180	100	100
200	100	100
220	100	100
240	99	101
260	99	101
280	97	103
300	94	106

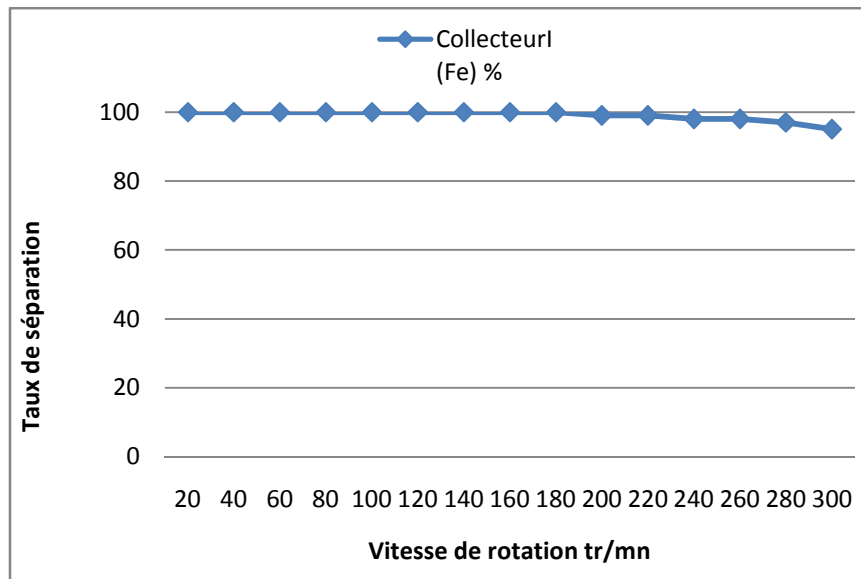


Figure V-20 : Séparation magnétique des particules de grandes tailles.

Après plusieurs essais avec différentes vitesses, nous avons constaté que la meilleure séparation est celle des boulons et des écrous c'est une séparation avec des échantillons de grandes particules. Le volume de la particule est important il y aura une bonne répartition de force magnétique sur la particule même à une vitesse grande. Mais pour les grandes vitesses la séparation diminue à cause de la force cinétique de rotation qui est très importante.

La séparation est efficace et nettement mieux que la séparation des échantillons en poudre figure V.20. Le taux de récupération (rétablissement) R des métaux ferreux après la séparation est calculé par la formule suivante:

$$R_{fe} = \frac{M_{fe}}{M_{fe\ totale}} \quad (V.5)$$

M_{fe} : masse de Fer récupéré.

La récupération de fer par rapport à celle de l'aluminium pour les particules de grande taille est presque totale elle est de 95% car la séparation ferromagnétique est facile et totale grâce à leurs propriétés magnétiques.

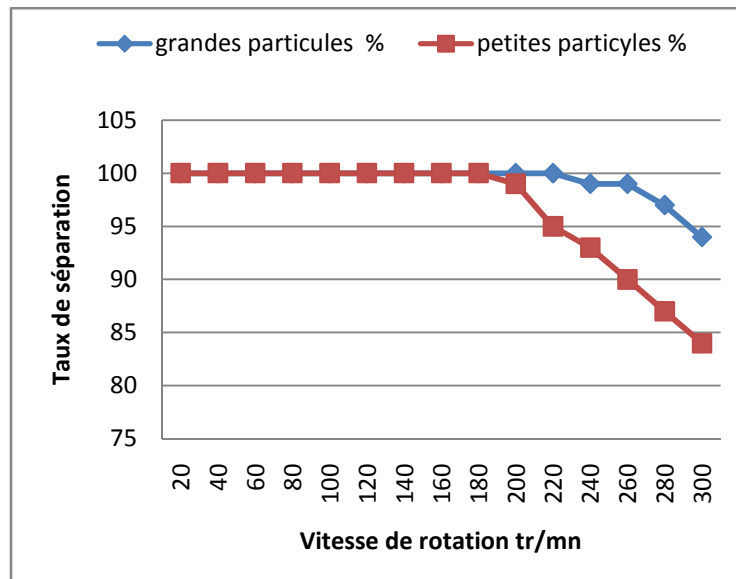


Figure V-21 : Influence de la granulométrie des particules sur le taux de séparation

En fonction de ces résultats expérimentaux nous pouvons constater que la granulométrie des particules et la vitesse du tambour jouent un rôle très important dans la séparation magnétique, surtout sur le taux de récupération des matériaux ferreux et non ferreux, représenté dans la figure V.21.

V. 6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre c'est d'expliquer le phénomène de séparation en faisant la liaison entre les résultats trouvés expérimentalement (taux de récupération, influence de la taille de la particule et la vitesse de rotation) et celle de la simulation (les forces magnétiques calculées et la distribution des lignes de champ magnétique).

Dans notre étude nous avons réalisé un séparateur magnétique rotationnel à aimant permanent. En fonction des résultats expérimentaux de séparation obtenus nous pouvons constater ce qui suit:

-L'influence de la taille des particules sur le rendement de notre séparateur est très importante. Le rendement augmente lorsque le volume augmente, et diminue lorsque la granulométrie des particules devient petite.

Le rendement du séparateur est proportionnel à la vitesse de rotation pour les petites particules par contre pour les grandes particules la vitesse n'influe pas sur la séparation. Il y a beaucoup de paramètres qui influent sur la séparation parmi lesquels on peut citer la force des aimants, la vitesse et la nature de la surface du transporteur qui génèrent des forces de frottements etc....

Enfin nous pouvons dire que dans l'avenir l'ajustement optimal de tous ces paramètres permettent d'obtenir de meilleurs résultats de séparation.

Conclusion générale

La séparation magnétique est un moyen efficace de récupération de métaux et des matériaux de différentes natures à partir des déchets industriels ou municipaux, à travers le champ magnétique comme les courants de Foucault, effet couronne, etc

Dans ce travail, nous avons vu plusieurs techniques de séparation à induction électromagnétique et particulièrement la séparation des métaux ferreux et non ferreux.

Dans un premier temps, nous avons donné une brève présentation des méthodes de séparation et de modélisation du phénomène magnétique. Après avoir eue le modèle mathématique de notre système nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour résoudre notre problème. Cette résolution a donné des bons résultats de simulation. Ce qui nous a permis de mieux comprendre les phénomènes physiques de la séparation. Cette compréhension nous a guidés à faire la conception de notre séparateur et s'assurer d'avoir une force de séparation efficace.

Les résultats de simulation d'un séparateur à électroaimant avec le logiciel Comsol Multiphysiques 4.3 montrent :

- Les caractéristiques magnétiques et mécaniques telles que la distribution du champ magnétique et les forces d'attraction autour des particules ferreuses et non ferreuses.

- Expliquent le phénomène d'interaction magnétique pour un électroaimant avec et sans entrefer.

Le modèle de séparation avec un électroaimant conçu nous a permis de séparer un jet de mélange en ferreux et non ferreux avec des taux très importants grâce à la variation des paramètres du dispositif, tel que : la taille de l'entrefer la tension d'alimentation ainsi que la taille et la nature des particules du jet.

Nous avons combiné et coordonné entre les résultats de simulation afin d'expliquer et justifier le taux de séparation expérimentale. Cela prouve l'efficacité de nos résultats de simulation pour ce type de séparation statique à induction magnétique. Les résultats de simulation et expérimentale étaient liés et complémentaires.

Concernant le séparateur à tambour rotatif magnétique à aimants permanents simulé et réalisé dans notre laboratoire IRECOM et ICEPS, pour séparer un déchet mixte de particules ferreuses et non ferreuses. D'après les résultats expérimentaux et de simulation obtenus, on peut constater ce qui suit :

Les résultats de simulation du tambour à aimants permanents pour visualiser les lignes de champ, ainsi que les caractéristiques magnétiques et mécaniques.

- L'influence de la granulométrie des particules et la vitesse de rotation sur le rendement de notre séparateur est très importante.

Il y a beaucoup de paramètres qui influent sur la séparation parmi lesquels on peut citer la force des aimants, la vitesse et la nature de la surface du transporteur qui génèrent des forces de frottements etc....

Conclusion générale

Le séparateur à courant de Foucault à aimant permanent a été simulé afin de représenter la distribution: du vecteur potentiel magnétique et l'induction magnétique autour du dispositif. D'après les résultats de simulation numérique, on a trouvé que:

- la variation d'entrefer à une grande influence sur la magnétisation du milieu et des particules telles que le champ produit autour du rotor.
- Nous avons montré l'influence du nombre de paires de pôles sur la distribution du vecteur potentiel magnétique autour du séparateur.
- nous avons vu des différentes interactions magnétiques lors de la présence des particules de différentes natures proches du séparateur.
- l'influence du poids sur la force d'éjection des particules en aluminium.

Ceci a été développé d'une manière numérique à l'aide du logiciel Comsol en 2D.

Enfin et en fonction de ce que nous avons réalisé, nous avons pu obtenir des résultats encourageants. Où future nous espérons développer notre séparateur pour avoir un taux de tri important en jouant sur plusieurs paramètres électriques, mécaniques et magnétiques afin d'avoir une pureté de recouvrement des matériaux non ferreux importante ce que veut dire s'approcher le plus possible aux exigences de l'industrie.

Par la suite et pour la séparation des mélanges granulaires plus complexes, il est essentiel de pouvoir assembler plusieurs techniques de séparation.

La conception d'un séparateur semi-industriel ou industriel de grande taille avec des aimants permanents très forts de genres néodyme pour la séparation des particules d'une taille millimétrique ou d'une grande taille.

L'optimisation de plusieurs facteurs et paramètres mise en jeu dans la séparation afin de trouver un modèle mathématique liant les différents paramètres de séparation.

Faire une étude dans l'axe de la compatibilité électromagnétique pour voir les interférences électromagnétiques conduites ou rayonnées produites par le séparateur sur les dispositifs adjacents comme les moteurs d'entraînements et les câbles de connexion.

Bibliographie

- [1] Sid-ali Addouche "Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage" Thèse l'Université de Franche-Comté 2003
- [2] Fabienne Benech "Etat de l'art des technologies de recyclage de certains DEEE " rapport final Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie France 2008
- [3] S. Bell , B. Davis , A. Javaid et E. Essadiqi "Rapport final sur la gestion de la ferraille, le tri et la classification de l'aluminium" laboratoire de la technologie des matériaux Ottawa 2003.
- [4] Alain Cornier " Développement d'un modèle d'enlèvement de matière par granulation utilisant le jet d'eau haute pression application au démantèlement de pneumatiques " Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Paris France thèse 2004
- [5] Mehdi Ouili " Modélisation du comportement d'une distribution aléatoire des particules métalliques dans un séparateur magnétique en voie humide " magister université Constantine 1 / Algérie 2013
- [6] Mehasni Rabia "Elaboration de modèles de calcul de dispositifs a induction électromagnétique : application a un système de séparation magnétique dans les milieux particuliers" these 2007 université Mentouri-Constantine
- [7] G. Gillet, "Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ", Techniques de l'ingénieur, Génie des procédés, Vol papier n° JB3, J3222, Mars 2004.
- [8] Bouzid Halima " Etude et Réalisation d'un séparateur à induction magnétique " mémoire de master université de sidi bel Abbes 2012.
- [9] Christian Delavelle "Etat de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets" cahier technique 2010.
- [10] Harini Naidu "Electrodynamic separation of metallic granules from mixed waste stream " Master of Science University of Utah May 2010.
- [11] Swadhin Saurabh " High frequency eddy-current separation of metallic granules from foundry sands, e-scrap and other waste streams " Master of Science The University of Utah 2009.
- [12] Carl Bertrand "Modélisation de la séparation magnétique de basse intensité sur tambours rotatifs" université Laval Québec thèse de doctorat 2010.
- [13] John S. Campbell "The research and development of an air separation conveyor for obsolete electronic products recycling "these USA Faculty of Texas May, 2003.
- [14] GILLET (G.). " La séparation magnétique sous champs intenses en minéralurgie " Thèse de Doctorat d'État, INPL, Nancy, oct. 1988.

- [15] Gérard GILLET “ Séparation magnétique théorie et modélisation” Institut national polytechnique de Lorraine document technique de l’ingénieur j3220 2003
- [16] Gérard GILLET “Séparation magnétique à basse et haute Intensité “ Institut national polytechnique de Lorraine document technique de l’ingénieur j3221 2003
- [17] Gérard GILLET “ Séparation magnétique : économie et applications particulières” Institut national polytechnique de Lorraine document technique de l’ingénieur j3223 2004
- [18] VINCENT .V MAILFERT .A “Magnetic percolation phenomom in high field high gradient separators (HGMS)” IEEE Transaction on Magnetics. Vol. 36, No 6, nov. 2000.
- [19] PC. REM “ eddy current separator” book delft university of technology, edition Eburon Netherland 1999.
- [20] A. Young and Gerald H. Luttrell “Separation technologies for minerals” book <http://books.google.dz/uy> New View Book Synopsis. ISBN 13: 9781681174952 2012
- [21] Ayad A.N.E.I “Etude et modélisation d’un capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif “ ingéniorat 2009 université de sidi bel abbes Algérie.
- [22] Tamer Bécherrawy «Électromagnétisme : équations de Maxwell propagation et émission » UNIMARC | BibTeX | RIS2012
- [23] Theory for the Magnetic Fields, No Currents Interface User’s Guide magnetostatic equation AC/DC Module May 2012 COMSOL 4.3pdf www.comsol.com.
- [24] Ryma Delimi “méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique application aux paliers magnétiques “ magister Université Mentouri – Constantine Algérie 2008 .
- [25] Nehal Ouassila “Etude et modélisation des paliers planaires“ magister Université Mentouri – Constantine Algérie 2010.
- [26] Chaib Abd slam “étude de l’enrichissement du gres par classification gravimétrique et séparation magnétique“ magister université badji Mokhtar Annaba 2011.
- [27] Stephen J. Chapman “Electric Machinery and Power System Fundamentals” Instructor’s Manual First Edition BAE SYSTEMS Australia 2001
- [28] Pol Grasland-Mongrain “Applications de la force de Lorentz en acoustique médicale “ thèse de doctorat université de Lyon 2013.
- [29]Vladimir Saveliev, Almaty, Kazakhstan “System and method for sorting electrically conductive particles“ United States Patent Number 6,095,337 university of Utah 1998.
- [30] David Alejandro Pineda Osorio “Modelo para la gestión de reciclaje de residuos electrónicos“ These Université de Chile 2012.

- [31] Christopher E Hull “ Crosscutting technology development at the center for advanced separation “ rapport final University Blacksburg, Virginia Issue November 23, 2010.
- [32] Khebbab Mohamed “Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif “ Université Mentouri de Constantine Algérie Magistère en Electrotechnique 2007
- [33] Bennecib Nedjouda “contribution a l’étude d’une machine MHD a conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique” thèse de doctorat en électrotechnique université de Batna Algérie 2010.
- [34] Sonia Naceur “Contribution à la modélisation numérique d’une pompe MHD en tenant compte de la nature des matériaux des électrodes et du fluide” université de Batna mémoire de magister en électrotechnique 2007
- [35] Hocini Farid “association de la commande pour l’étude par éléments finis des phénomènes magnéto élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques” thèse de doctorat université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 2013.
- [36] Ayad Ahmed Nour El Islam¹, AyadAbdelgani², Ramdani Youcef¹, Yann Le Bihan³, Guillaume Krebs³, Dey Zouaoui² “Simulations and Experiments on Electromagnetic Induction Separator by excitation variation”, article Djillali Liabes University, Sidi Bel Abbes, Algeria AJBAS ISSN 1991-8178, 2014.
- [37] Ayad Ahmed Nour El Islam, AyadAbdelgani, Ramdani Youcef¹ "Simulation of Eddy Current Separation of Gold Particles from Sands", article Djillali Liabes University, Sidi Bel Abbes, Algeria 2016. International Journal of Engineering and Manufacturing(IJEM), Vol.6, No.5, pp.30-37, 2016.DOI: 10.5815/ijem.2016.05.04
- [38] Ayad Ahmed Nour El Islam «simulation of high frequency eddy current separator»International Conference on engineering of Industrial Safety and Environment (ICISE'14) 26-27 Jan, 2014 - Oran, Algeria.
- [39] Ayad Ahmed Nour El Islam " Séparation rotationnelle à aimant permanent". Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle (CIMS'I'13) Novembre 28-29, 2013 Skikda (Algérie)
- [40] Ayad Ahmed Nour El Islam et al «Simulations and experiments on electromagnetic induction separator". Second Euro-Mediterranean Meeting on Functionalized Materials 28 MARS EMM-FM 2013 Tunisia.
- [41] Fabiano Maraspina, Paolo Bevilacqua, Peter Remb, «Modelling the throw of metals and nonmetals in eddy current separations» Int. J. Miner. Process. 73 1 – 112004 Elsevier B.V. doi:10.1016/S0301-7516(03)00081-4, Italy 2004.

- [42] Jia Li, Yiqun Jiang, Zhenming X “Eddy current separation technology for recycling printed circuit boards from crushed cell phones” *Journal of Cleaner Production* 141 (2017) 1316e1323 China 2016.
- [43] Veerendra Singh, Samik Nag, Sunil Kumar Tripathy “ Particle flow modeling of dry induced roll magnetic separator” *Powder Technology* 244 85–92 <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec>. India (2013).
- [44] 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*, Algeria 2016
- [45] Ahmet Fenercio·glu and Hamit Barutcu ”Finite Element Analysis of Separation Force on Non-ferrous Metals Induced by Eddy Current Separator” *Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6/9, 2015*
- [46] Ahmet Fenercioğlu, Hamit Barutcu “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 (Turkey 2015)*
- [47] Ahmet Fenercioğlu1, Ali Kartal “Determination Of Recycling Performance Of Some Non-Ferrous Metals Via Prototype Eddy Current Separator” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University Vol 30, No 2, 155-161, 2015*
- [48] Permanent Magnet In 3dimension Solved with COMSOL Multiphysics 4.3a www.comsol.com helps 2015.
- [49] Motors and Drives Models : Generator Solved with COMSOL Multiphysics 4.3a www.comsol.com helps 2015.
- [50] Mehdi OUILI «Modélisation du comportement d’une distribution aléatoire des particules métalliques dans un séparateur magnétique en voie humide » Université de Constantine Magister en Electrotechnique 2013.
- [51] Carl Bertrand « modélisation de la séparation magnétique de basse intensité sur tambours rotatifs enrichissement du minerai havre saint-pierre de rio tinto, fer et titane » thèse université laval québec 2010
- [52] Ronald Peter King “ Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems” book Elsevier, <http://books.google.dz/> edition Melbourne ISBN 0080511848, New delhi 2001
- [53] Richard Gerber, Robert R. Birss “High gradient magnetic separation” book 1983 <http://books.google.dz/> ISBN-10: 0471901628; 1983
- [54] S.R. Ramachandra Rao “Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes” book <http://books.google.dz/> waste management VOL 7 ISBN 0080463207New York 2011
- [55] Jack Watson “Separation Methods for Waste and Environmental Applications” BOOK <http://books.google.dz/> new York BASEL ISBN 9780824799434 1999

- [56] Jacques Fortin “Comprendre le climat et l'environnement” book Québec Amérique, 2001
<http://books.google.dz/> isbn=2764411677 2001
- [57] Habi_Meriem, Khengaoui *Bouchra* « Etude et simulation d'un séparateur rotationnel »
Master II *Université Kasdi Merbah Ouargla* Algérie 2014/2015 .
- [58] Iflah samira « Simulation d'un séparateur rotationnel à courant de Foucault» Master
II *Universite Kasdi Merbah Ouargla* Algérie 2015/2016.
- [59] Mihai Lungu «Separation of small nonferrous particles using a two successive steps
eddy-current separator with permanent magnets» *Int. J. Miner. Process.* 93 (2009) 172–178,
Romania.
- [60] Shunli Zhang , Eric Forsberg , Bo Arvidson, William Moss «Separation mechanisms
and criteria of a rotating eddy-current separator operation »*Resources, Conservation and
Recycling* 25 (1999) 215–232.
- [61] Z. Schlett, F. Claici, I. Mihalca, M. Lungu «A new static separator for metallic particles
from metal–plastic mixtures, using eddy currents» *Minerals Engineering* 15 (2002) 111–113
- [62] R. Meier-Staude a, Z. Schlett b, M. Lungu b, D. Baltateanu « A new possibility in Eddy-
Current separation» *Minerals Engineering* 15 287–291, Germany (2002)
- [63] H.J.L. Van Der Valk, B.C. Braam And W.L. Dalmijn« eddy-current separation by
permanent magnets» *resources and conservation*, 12 233-252 elsevier science publishers b.v.,
amsterdam - printed in the Netherlands (1986)
- [64] Huifen Zhang¹, a, Luzheng Chen «Eddy-current induced magnetic separation of
nonferrous metals from solid wastes » Department of Land Resource Engineering, Yunnan
Tin College of Vocation and Technology, Gejiu 661000, China 2014
- [65] Gordan Bedeković , Branko Salopek , Ivan Sobota Efficiency of metal scrap separation
in eddy current separator *UDK 628.44:621.928 6, 10000* Vol. 20 Zagreb, 2008.
- [66] Faouzia Ababsa « Seuls 5% recyclés en Algérie » un article des statistiques du journal
eco news <http://www.leconews.com/fr/> Algérie 12 janvier 2014.

Annexe A

II. 1 Tenseur de Maxwell

Cette méthode fondée sur l'analyse tensorielle est un formalisme mathématique particulièrement essentiel pour étudier une large variété de systèmes physiques, son nom arrive du fait qu'elle utilise la divergence du tenseur de Maxwell et procure une force qui est celle que subit un volume élémentaire plongé dans un champ magnétique.

$$\vec{F} = \text{div}(\vec{T}) \quad (1)$$

Le tenseur de Maxwell permettra de calculer la force globale exercée sur le matériau est calculée sur la surface qui entoure ce dernier, en connaissant seulement la répartition de champ aux différents points d'une surface fermé entourant le volume à étudier. L'ensemble du système peut contenir des matériaux magnétiques des conducteurs inducteurs caractérisés par une densité de courant uniforme.

Les méthodes basées sur le tenseur de Maxwell sont de deux types : la première repose sur une approche d'intégration surfacique est la plus habituellement utilisée, la deuxième approche se base sur une intégration volumique.

II. 1 .1 Tenseur de Maxwell avec intégration surfacique

Nous commençons par le principe de la formulation par les tenseurs en prenant comme exemple le cas de la force s'exerçant sur un conducteur électrique amagnétique. Après nous généraliserons cette formulation au calcul des forces s'exerçant sur une particule magnétique.

La formule (2) de la force exercée sur un conducteur électrique amagnétique donnée par l'équation de Laplace dépend des équations de Maxwell. Elle donne l'expression de la force s'exerçant sur un conducteur idéal placé dans un champ d'induction magnétique.

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (2)$$

On peut transformer équation sous forme locale par :

$$\vec{f} = \frac{d\vec{F}}{dV} = \frac{i d\vec{l} \wedge \vec{B}}{dV} = \frac{i d\vec{l} \wedge \vec{B}}{sdl} \quad (3)$$

Soit \vec{f} la force par unité de volume

Avec

$$d\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (4)$$

Cette force globale est donnée par:

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV = \int_V (\vec{j} \wedge \vec{B}) dV \quad (5)$$

V est le volume du conducteur ou la particule. En utilisant les équations de la magnétostatique:

$$\text{rot}(H) = J \quad (6)$$

$$\text{div}(B) = 0 \quad (7)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (8)$$

Remplaçant les équations précédentes dans (5), on obtient:

$$\vec{f} = \mu_0 (\text{rot}(\vec{H})) \wedge \vec{H} = \mu_0 (\vec{\nabla}(\vec{H})) \wedge \vec{H} = \mu_0 \left[(\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} - \left(\frac{1}{2} \cdot \vec{\nabla}(\vec{H}^2) \right) \right] \quad (9)$$

En peut développer l'équation (9) sous une forme matricielle suivante :

$$f = \mu_0 \begin{bmatrix} H_x \cdot \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \cdot \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{1}{2} [H_x^2 + H_y^2 + H_z^2] \\ H_x \cdot \frac{\partial H_y}{\partial x} + H_y \cdot \frac{\partial H_y}{\partial y} + H_z \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{1}{2} [H_x^2 + H_y^2 + H_z^2] \\ H_x \cdot \frac{\partial H_z}{\partial x} + H_y \cdot \frac{\partial H_z}{\partial y} + H_z \cdot \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{1}{2} [H_x^2 + H_y^2 + H_z^2] \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pour chacune des coordonnées cylindriques x, y, z la formule devient en notation condensée :

$$f_m = \mu_0 \left[\sum_{n=1}^3 \left(H_n \frac{\partial H_m}{\partial x_n} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_m} (\vec{H}^2) \right] \quad (11)$$

Avec: (m, n)=x, y, z

Pour cette expression, la grandeur de la variable \vec{H}^2 est écrite sous la forme suivante :

$$\vec{H}^2 = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 \quad (12)$$

On fait appel a le coefficient de Kronecker δ_{mn} défini par :

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 1 \text{ si } m = n \\ 0 \text{ si } m \neq n \end{cases} \quad (13)$$

La forme de la force devient :

$$f_m = \mu_0 \sum_{n=1}^3 \left[\frac{\partial}{\partial x_n} \left(H_n H_m - \frac{1}{2} \delta_{mn} (\vec{H}^2) \right) - H_m \frac{\partial H_n}{\partial x_n} \right] \quad (14)$$

Le dernier terme de cette formule peut s'écrire :

$$\mu_0 \sum_{n=1}^3 \left[H_m \frac{\partial H_n}{\partial x_n} \right] = \sum_{n=1}^3 \left[H_m \frac{\partial (\mu_0 H_n)}{\partial x_n} \right] = H_m \text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (15)$$

L'expression de la composante générale de la force s'abrège alors comme suit :

$$f_m = \mu_0 \sum_{n=1}^3 \left[\frac{\partial}{\partial x_n} \left(H_n H_m - \frac{1}{2} \delta_{mn} (\vec{H}^2) \right) \right] \quad (16)$$

Le tenseur de maxwell \vec{T} est présenté par l'équation suivante :

$$\vec{T}_{m,n} = \mu_0 \left(H_n H_m - \frac{1}{2} \delta_{mn} (\vec{H}^2) \right)_{m,n=x,y,z} \quad (17)$$

$$f_m = \text{div} (\vec{T}_{m,n}) \quad (18)$$

Le vecteur \vec{T}_m est formé de trois composantes du tenseur de maxwell :

$$\vec{T}_m = \tau_{m1} \vec{i} + \tau_{m2} \vec{j} + \tau_{m3} \vec{k} \quad (19)$$

Et puis le tenseur de maxwell prend la forme suivante :

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Les forces globales s'exerçant sur un volume V sont calculées par :

$$\vec{F}_m = \int_V \vec{f}_m dV = \int_V \text{div}(\vec{T}_m) dV \quad (21)$$

On introduisant le théorème de divergence, on aura :

$$\vec{F}_m = \oint_S \vec{T}_m ds = \oint_S (\vec{T}_{m,n} \vec{n}) ds \quad (22)$$

La force globale est décrite par l'expression suivante:

$$\vec{f} = \mu_0 \oint_S \left((\vec{H} \cdot \vec{n}) \vec{H} - \frac{1}{2} (\vec{H}^2) \vec{n} \right) dS \quad (23)$$

Le passage d'une intégrale de volume à une intégrale de surface à travers le théorème de divergence, peut être possible dans le cas d'un calcul numérique et résulte un gain de temps de calcul important [24,25].

Annexe B

Forces magnétique d'attraction dans le séparateur magnétique rotationnel

$$\vec{F}_m = \vec{\nabla} \int_V \vec{J} \cdot \vec{H} dV \quad (1)$$

\vec{H} Champ magnétique V le volume de la particule \vec{J} Représente la polarisation magnétique.

L'intensité d'aimantation ou la polarisation magnétique est connue par la formule suivante:

$$\vec{J} = \frac{\chi}{1+D\chi} + \mu_0 \vec{H} \quad (2)$$

Avec D le coefficient de démagnétisation des particules.

μ_0 : Perméabilité de vide. $4\pi 10^{-7}$

$\vec{\nabla}$ est l'opérateur gradient agissant sur un scalaire H donné par la forme suivante:

$$\vec{\nabla} H = \text{grad } H = \frac{\delta H}{\delta x} \vec{i} + \frac{\delta H}{\delta y} \vec{j} + \frac{\delta H}{\delta z} \vec{k} \quad (3)$$

Avec $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ vecteurs unitaires dans les directions x, y, z .

L'intégration se fait sur le volume de la particule. Si celui-ci est petit, elle peut être assimilée à un dipôle magnétique de moment $\vec{m} = V \vec{M}$. La force sur le dipôle est alors :

$$\vec{F}_m = (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} \quad (4)$$

En combinant, pour une particule sphérique ($D = 1/3$), l'équation (IV.11) avec l'expression de \vec{J} on obtient :

$$\vec{F}_m = \frac{\mu_0 \chi V}{1+(\chi/3)} (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} \quad (5)$$

Et comme $\chi \leq 1$, on peut écrire :

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V \vec{\nabla} (H^2) \quad (6)$$

Pour les opérations de tri magnétique, la force d'attraction magnétique bipolaire agissant sur une particule paramagnétique dans le vide est donnée par :

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V \text{ grad}(H^2) \quad (7)$$

Résumé

Le travail présenté est consacré à la simulation et à la réalisation d'un séparateur à induction magnétique utilisée pour le recyclage et la récupération des matériaux ferreux et non ferreux. Les simulations par la méthode des éléments finis en 2D et 3D de différents séparateurs statique, rotationnel, ou à courant de Foucault ont montré l'influence de plusieurs paramètres magnétiques, mécaniques, taille de particule et champ magnétique des aimants permanents qui entrent en jeu dans le processus de séparation. Cela nous a permis de faire une réalisation du séparateur magnétique à induction et ajuster ces paramètres afin d'avoir un taux important et rentable avec une force d'éjections importantes.

Mots clés: Séparateur à Courant de Foucault, Particules non ferreuses, Déchet, Recyclage, aimants permanents.

Abstract

The work presented is devoted to the simulation and realization of a magnetic induction separator used for the recycling and recovery of ferrous and non-ferrous materials. The 2D and 3D finite element simulations of various separators static, rotary, or eddy current have shown the influence of several magnetic, mechanical, particle size and magnetic field parameters of the permanent magnets that come into play in the separation process. This allowed us to make a realization of the induced magnetic separator and adjust these parameters in order to have a high rate and profitable with a force of large ejections.

Key word: Eddy-current separator, Non-ferrous particle, Wastes, Recycles, permanent magnets.

ملخص

العمل المقدم مكرس للمحاكاة وتحقيق فاصل الحث المغناطيسي المستخدم لجمع وإعادة تدوير المواد الحديدية وغير الحديدية. وقد أظهرت المحاكاة للعناصر المحدودة D2 و D3 من مختلف الفواصل الثابتة، التناوب، أو الدوامة حالية التأثير المغناطيسي والميكانيكية، وحجم الجسيمات والمجال المغناطيسي المنتج من مغناطيس دائم تلعب دورا هاما في عملية الفصل. هذا يسمح لنا بجعل تحقيق فاصل المغناطيسي المستحث وضبط هذه العوامل من أجل الحصول على نسبة عالية ومربحة مع قوة من الكتل الكبيرة.

الكلمات الأساسية: دوامة الفاصل الحالي، والمعادن غير الحديدية، النفايات وإعادة تدويرها والقوة المغناطيسية.