

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique

جامعة كاسدي مرباح ورقلة

Université Kasdi Merbah Ouargla



Mémoire  
MASTER ACADEMIQUE  
Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Machine électrique  
Présenté par :  
Sebaa Abd el Kader  
Thème:

# Simulation d'un séparateur magnétique à aimants permanents avec ANSYS

Soutenu publiquement

Le : 14 / 06 / 2023

Devant le jury :

M <sup>d</sup> Naceur Sonia	MCA	Président	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> Ayad Ahmed Nour el islam	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> Khalifa moussa	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma source de tendresse, l'être la plus chère dans le monde,*

*La femme la plus patiente, ma très chère mère*

*, et tous*

*Leurs sacrifices*

*Mes frères.*

*Toute ma famille*

*Tous les amis*

## *REMERCIEMENTS*

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant, de m'avoir permis d'arriver à ce niveau d'études, et aussi pour m'avoir donné beaucoup de patience et de courage.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon Encadreur et co-encadreur (Ayad*

*Ahmed Nour Islam et Kadri Nadjib),*

*pour m'avoir constamment guidé tout long de mon projet et pour les précieux conseil qu'il m'ont donné*

*Je tiens à remercier, le président de jury et les examinateur pour*

*l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.*

*J'adresse aussi mes sincères reconnaissances à tous les enseignants de*

*l'Université Kasdi Merbah Ouargla pour leurs aides, soutiens et leurs*

*conseils,*

*sans oublier tout le personnel administratif du département*

## SOMMAIRE

Liste de Figure.....	
Liste de Tableau.....	
Liste des Symboles.....	
Introduction Général.....	1
<b>Chapitre 1 : Classification des séparateurs magnétiques</b>	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Classification des séparateurs magnétiques.....	4
1.2.1 Séparateurs magnétiques à base des aimants permanents.....	4
1.2.1.1 Système à double aimant.....	4
1.2.1.2 Séparateur magnétique à rampe coulissante (à table inclinée).....	5
1.2.1.3 séparateurs magnétiques à plaque magnétique.....	5
1.2.1.4 Séparateurs à courant de Foucault.....	6
a) Séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal.....	6
b) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS) ..	7
c) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour Vertical.....	7
1.2.2 Séparateurs magnétiques à tambours.....	8
1.2.3 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI).....	9
1.2.3.1 Séparateurs magnétiques sec à basse intensité.....	9
a) Poulies magnétiques.....	9
b) Séparateurs magnétiques à tambour.....	11
1.2.3.2 Séparateurs magnétiques humides à basse intensité.....	12
a) Séparateurs magnétiques humides à tambour à basse intensité.....	12
i. Réservoir simultané.....	13
ii. Réservoir à contre-rotation.....	13
iii. Réservoir à contre-courant.....	14
1.2.4 Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI).....	14
1.2.4.1 Séparateur magnétique à rouleaux induits.....	15
1.2.4.2 Séparateur magnétique à bande croisée.....	16
1.2.5 Séparateurs magnétiques à haute gradient de champ (SMHG).....	17
1.3 Les Aimants permanents.....	17
1.3.1 Aimants en Ferrite.....	18
1.3.1.1 Caractéristiques principale.....	18
1.3.2 Aimants en Alnico.....	18

1.3.2.1	Caractéristiques principale.....	18
1.3.3	Aimants Terre-Rares .....	19
1.3.3.1	Caractéristiques principale.....	19
1.4	Avantages liés à l'utilisation de Séparation Magnétique .....	20
1.4.1	séparateurs magnétiques à tambours.....	20
1.4.2	séparateurs magnétiques à aimants permanents .....	21
1.4.3	Séparateurs magnétiques à courants de Foucault .....	21
1.4.4	Séparateurs magnétiques à Poulies .....	21
1.5	Conclusion.....	22
	<b>Chapitre 2 : Simulation d'un séparateur magnétique dans le logiciel ANSYS .....</b>	<b>23</b>
2.1	Introduction .....	24
2.2	Modélisation du problème de séparation du tambour magnétique.....	24
2.2.1	Modèle mathématique régissant le problème magnétique .....	24
2.2.1.1	Champ magnétique appliqué et équation du modèle .....	24
2.1.2	Forces d'origines magnétiques appliquées aux particules .....	27
2.1.2.1	Force appliquée à la particule magnétique .....	27
2.1.2.2	Force inter particulaires (Dipôle-Dipôle) entre particules.....	28
2.1.2.3	Force appliquée à la particule conductrice .....	29
2.3	Différentes méthodes pour résoudre les équations aux dérivées partielles.....	29
2.3.1	La méthode des éléments finis (FEM) .....	30
2.3.1.1	Principe de la méthode des éléments finis.....	30
2.4	Conditions limites.....	31
2.4.1	analyse numérique .....	31
2.5	Modélisation finie des aimants permanents .....	32
2.5.1	modèles mathématiques .....	33
2.6	Implementation du modèle dans l'ansys .....	34
2.6.1	Ansyes maxwell.....	34
2.6.2	Maxwell Designs .....	35
2.6.2.1	Types de Maxwell Designs.....	35
2.6.3	Maxwell GUI (Graphical user interface) .....	35
2.6.4	Solvers in Maxwell .....	38
2.6.4.1	Type de solveur.....	38
2.6.5	Maxwell Geometry .....	40
2.6.6	Maxwell maillage .....	43
2.7	Conclusion.....	44

<b>Chapitre 3 : Résultats de simulation de séparateur magnétique en présence des particules</b>	45
3.1 Introduction	46
3.2 Structure du modèle Dans l'ANSYS	46
3.2.1 Géométrie du modelé	46
3.2.1.1 Disque	46
3.2.1.2 Aimant permanent	46
3.3 Implémentation du modèle par les élément finis	47
3.4 Résultats de simulation	47
3.4.1 Modèle Magnétostatique	47
3.4.2 Modèle Magnétodynamique	49
3.4.2.1 Essais Magnétodynamique	49
3.4.2.2 Mesure densité du courant magnétique	50
3.4.2.3 Mesure de Force de Lorentz sur différente position des particules	51
3.5 Conclusion	55
Conclusion général	56

# Liste de Figure

## Chapitre 1 : Classification des séparateurs magnétiques

Figure 1.1 Séparateur magnétique double aimant.....	4
Figure 1.2 Séparateur magnétique à rampe coulissante .....	5
Figure 1.3 Séparateurs à courant de Foucault à disque tournant .....	5
Figure 1.4 Séparateur à courants de Foucault à tambour horizontal .....	6
Figure 1.5 Séparateur à courants de Foucault à tambour incliné.....	7
Figure 1.6 Séparateur à courants de Foucault à tambour vertical.....	8
Figure 1.7 Séparateurs magnétiques à tambours.....	8
Figure 1.8 Fonctionnement de Séparateurs magnétiques à tambours .....	9
Figure 1.9 Poulies magnétiques.....	10
Figure 1.10 Principe de fonctionnement Poulies magnétiques .....	10
Figure 1.11 Opération de Poulies magnétiques.....	10
Figure 1.12 Un schéma du flux magnétique autour d'un tambour magnétique .....	11
Figure 1.13 Séparateur magnétique à tambour sec avec alimentation par le haut .....	12
Figure 1.14 Fonctionnement d'un séparateur magnétique à tambour sec .....	12
Figure 1.15 séparateur magnétique à tambour humide.....	13
Figure 1.16 Réservoir simultané .....	13
Figure 1.17 Réservoir à contre-rotation .....	14
Figure 1.18 Réservoir à contre-courant .....	14
Figure 1.19 Principe de la séparation magnétique SMHI des particules diamagnétiques et paramagnétiques.....	15
Figure 1.20 séparateur à rouleau magnétique induit.....	16
Figure 1.21 séparateur à rouleaux magnétiques induits .....	16
Figure 1.22 Séparateur magnétique à bande croisée.....	17
Figure 1.23 Séparateurs magnétiques à haute gradient de champ.....	17
Figure 1.24 Courbe B (H) des différents types des aimants permanents .....	18
Figure 1.25 Aimants permanents, (a) Alinco (Samarium-Cobalt (Sm-Co)), (b) Ferrite (Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)), (c) Terre-Rares... ..	19
<b>Chapitre 2 : simulation magnétique d'un séparateur dans le logiciel ANSYS</b>	
Figure 2.1 Système de deux particules sphériques aimantées voisines.....	28

Figure 2.2	Discrétisation du domaine d'étude (maillage).....	31
Figure 2.3	Organigramme de l'élément fini général.....	35
Figure 2.4	Interface de ansys maxwell .....	36
Figure 2.5	Interface de (Project manager) .....	37
Figure 2.6	Interface de Arbre historique (History Tree) .....	37
Figure 2.7	Les coordonnées.....	38
Figure 2.8	Type de Solution .....	39
Figure 2.9	Une géométrie .....	41
Figure 2.10	Géométrie UI Operations .....	41
Figure 2.11	Création de coordonnées de systèmes .....	41
Figure 2.12	Création de géométrie à partir de primitives .....	42
Figure 2.13	Commande de balayage .....	42
Figure 2.14	Création d'une région de simulation .....	43
Figure 2.15	Sélection de Maillage .....	44

### **Chapitre 3 : résultats de simulation de séparateur magnétique en présence des particules**

Figure 3.1	Structure du disque.....	46
Figure 3.2	Structure de l'aimant permanent .....	47
Figure 3.3	Maillage du modèle sur l'ANSYS.....	47
Figure 3.4	Caractéristiques magnétiques sur la magnétostatique.....	48
Figure 3.5	Caractéristiques magnétiques sur le magnétodynamique.....	49
Figure 3.6	distribution de densité de courant autour les particules (a-) cas de vitesse 300(tr/min), (b-) cas de 600,(c-),cas de 1200(tr/min),(d-) cas de 3000(tr/min).....	51
Figure 3.7	Différente position de particule.....	52
Figure 3.8	Variation de force en fonction du temps au première position, (a-) cas de 300 (tr/min),(b-) cas de 600 (tr/min),(c-) cas de 1200(tr/min),(d-) cas de 3000 (tr/min).....	53

# Liste De Tableau

## Chapitre 1

Tableau 1.1 Vitesse standard de la bande pour l'opération de la poulie magnétique.....	10
Tableau 1.2. Diamètres recommandés des poulies magnétiques.....	11
Tableau 1.3 Résumé des caractéristiques pour l'aimants en ferrite .....	18
Tableau 1.4 Résumé des caractéristiques pour aimants Terres-Rares.....	20

## Chapitre 3

Tableau 3.1 Variation de force en fonction du temps au (2/3/4) position, (a-) cas de 300 (tr/min) , (b-) cas de 600 (tr/min),(c-) cas de 1200(tr/min),(d-) cas de 3000 (tr/min)...	54
--	----

## Liste des symboles

$\sigma$ : Conductivité électrique (107 S/m)

$\rho$ : Densité de masse (kg/m<sup>3</sup>)

E: Champ électrique [V/m]

H: Champ magnétique [A/m]

J: Densité de courant [A/m<sup>2</sup>]

$\rho$ : Charge volumique [C/m<sup>3</sup>]

D: Induction magnétique [C/m<sup>2</sup>]

B: Induction magnétique (Tesla)

$\epsilon$ : Permittivité [F/m]

$\mu$ : Perméabilité magnétique [H/m]

$\sigma$ : Conductivité [S/m]

$\nu$ : Reluctivité magnétique [1/ $\mu$ ]

## **Introduction Général**

Dans le domaine de la séparation des matériaux, les séparateurs magnétiques jouent un rôle essentiel en permettant la séparation efficace de substances magnétiques et non magnétiques. Ces dispositifs sont largement utilisés dans diverses industries telles que l'exploitation minière, la métallurgie, le recyclage et bien d'autres. Nous sommes intéressés à la modélisation et à la simulation de séparation magnétique [1].

Pour atteindre ces objectifs, nous avons adopté une approche méthodique. Nous avons commencé par une revue approfondie de la littérature scientifique et technique pour comprendre les principes fondamentaux de la séparation magnétique et les travaux de recherche existants dans ce domaine. Ensuite, nous avons développé un modèle mathématique basé sur les équations fondamentales de la physique pour décrire le comportement du séparateur magnétique [1].

Notre objectif est de simuler le séparateur a disque magnétique d'aimants permanents alternatifs avec la présence de particules non ferreuses de différentes positions et de différentes d'vitesse de rotation avec une forme constante [1].

Le but du présent travail est de caractériser les performances magnétiques et les paramètres du séparateur, la densité de flux magnétique, le courant induit et la force répulsive sur un mélange des positions et des vitesses par la méthode des éléments finis a été présenté dans ce travail [1].

Notre travaille se devise de trois chapitres. Le premier chapitre concerne un état de l'art sur la séparation magnétique et le principe de fonctionnement, les différentes applications et les différents types des séparateurs magnétiques, Dans le même chapitre nous allons présenter une simple vue sur les aimants permanents où nous avons cité les différents types et structures des aimants permanents ainsi que les différentes applications des aimants permanents dans divers domaines.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation mathématique du comportement des particules magnétiques et conductrices.

Dans le troisième chapitre nous allons donner une brève initiation sur l'utilisation du logiciel Maxwell ANSYS ou même chapitre nous avons présenté une simulation sur le séparateur magnétique a disque sur une particule non ferreurs, analyse, et mesure de force

et des paramètres magnétiques qui consiste l'induction de champ magnétique, densité de flux, densité de courant.

# Chapitre 1

## 1.1 Introduction

Au cours des deux dernières décennies, les performances de la séparation magnétique ont été améliorées et cette technique s'est développée dans la valorisation des matières premières. Cela a été dû, d'une part, à la mise au point d'aimants permanents céramiques à grande énergie spécifique, qui ont trouvé des applications en **séparation basse et haute intensité** en voie sèche, mais aussi à l'apparition de séparateurs qui utilisent une matrice d'extraction ferromagnétique placée dans le champ intense produit par un bobinage en cuivre ou supraconducteur. Les matériaux à traiter sont alors soumis, dans la matrice, à des gradients d'énergie magnétique suffisants pour séparer des particules de faible susceptibilité magnétique, et de faible granulométrie. On parle alors de **séparation magnétique à haut gradient (HGMS)** et la séparation s'effectue en voie humide. Le liquide vecteur des particules solides est très généralement l'eau [5].

## 1.2 Classification des séparateurs magnétiques

Il existe plusieurs types de séparateurs magnétiques, chacun ayant ses propres caractéristiques et utilisations. Voici quelques-uns des types de séparateurs magnétiques les plus courants :

### 1.2.1 Séparateurs magnétiques à base des aimants permanents

Ces séparateurs utilisent des aimants permanents pour générer un champ magnétique et séparer les matériaux ferromagnétiques des matériaux non magnétiques. Ils sont couramment utilisés dans l'industrie minière et de la construction pour séparer les métaux ferreux des autres matériaux [7].

#### 1.2.1.1 Système à double aimant

Le séparateur magnétique à double aimant est composé d'un convoyeur avec deux paires d'aimants permanents placés au-dessus et au-dessous du tapis roulants (Figure 1.1). Lorsque le matériau à traiter traverse la zone active (paires d'aimants), les matériaux conducteurs sont poussés vers les bords du tapis et le reste du matériau passe par le centre [1]

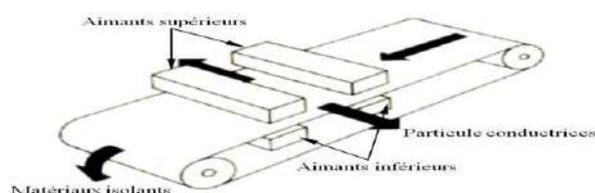


Figure 1.1 Séparateur magnétique double aimant

### 1.2.1.2 Séparateur magnétique à rampe coulissante (à table inclinée)

Dans ce dispositif à courants de Foucault, des aimants permanents avec une polarité alternée sont intégrés à la surface d'une rampe inclinée par rapport à l'horizontal (Figure 1.2). Les particules non conductrices glissent directement sur la rampe, tandis que les particules conductrices sont déviées latéralement. La déviation des particules conductrices est fonction de la longueur et de l'inclinaison de la rampe, l'intensité du champ des aimants à la surface de la rampe, la conductivité, la densité, la forme, la taille et la vitesse initiale des particules, et le coefficient de frottement de glissement entre les particules et la rampe. [1]

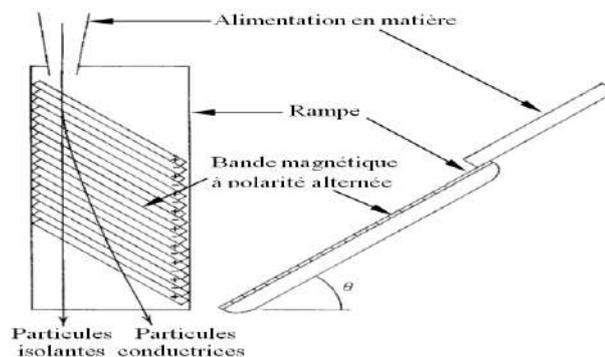


Figure 1.2 Séparateur magnétique à rampe coulissante

### 1.2.1.3 séparateurs magnétiques à plaque magnétique

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 1.3) [2].

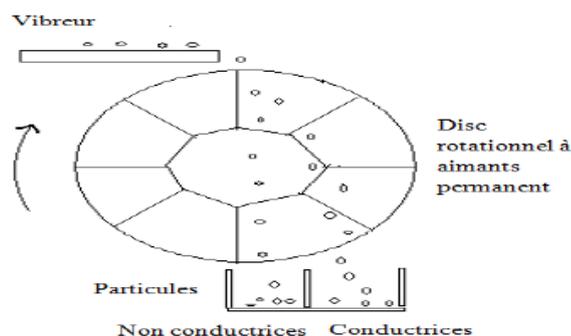


Figure 1.3 Séparateurs à courant de Foucault à disque tournant

### 1.2.1.4 Séparateurs à courant de Foucault

Le principe des courants de Foucault est de générer des champs magnétiques répulsifs pour les métaux non ferreux à l'aide de courants électriques eux-mêmes induits par un champ magnétique variable. Ces champs répulsifs provoquent l'éjection des métaux non ferreux. [3]

La fraction « éjectée » des métaux non ferreux (aluminium souvent, mais aussi cuivre, plomb et laiton) et la fraction des autres matériaux qui chute en bout de convoyeur (métaux ferreux, papiers, cartons, plastiques, verres, ...), sont dirigées vers deux dispositifs de récupération distincts ; cette séparation peut être favorisée par l'utilisation d'une plaque de division qui évite le mélange des deux fractions [3].

#### a) Séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal

Le séparateur à courants de Foucault à tambour horizontal (HDECS) est constitué par un cylindre doté d'une succession d'aimants permanents de polarité alternée placé à une extrémité du séparateur. Ce rotor tourne à très grande vitesse afin de générer un champ magnétique dynamique intense. Le flux d'alimentation est introduit à travers un tapis roulant. Lorsque les particules conductrices arrivent au voisinage du champ magnétique, elles sont propulsées à l'extérieur de la machine, tandis que les matériaux inertes tombent par gravité suivant la trajectoire normale dans un autre récipient de collecte. Les particules ferromagnétiques sont quant à elles attirées par le champ magnétique et déchargées en dessous du séparateur, afin d'être ensuite récupérées. Le désavantage majeur de ce séparateur réside dans son coût élevée l'incapacité de séparer des particules de dimension caractéristique inférieure à 5mm [1].

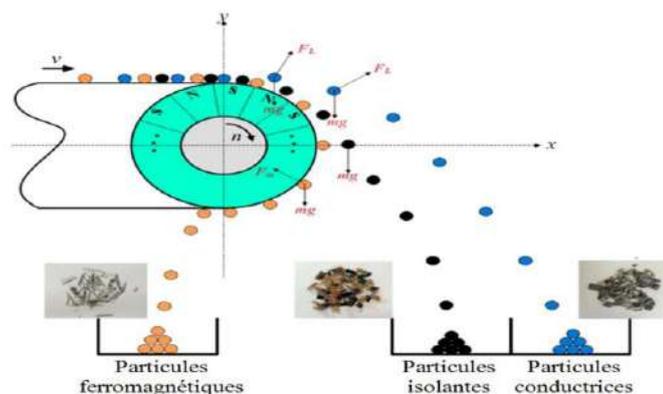


Figure 1.4 Séparateur à courants de Foucault à tambour horizontal

### b) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS)

Le séparateur à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS) consiste en un tambour rotatif vertical incliné doté d'une succession d'aimants permanents, alternativement polarisé N – S et S – N, directement fixés sur l'axe d'un moteur électrique. Les particules à séparer sont amenées dans le champ sur une trajectoire oblique, frappent le tambour et sont déviées dans le champ variable sous l'effet des interactions électrodynamiques et mécaniques. En fonction de leur conductivité électrique, les particules fortement conductrices et faiblement conductrices adoptent des trajectoires différentes, ce qui conduit à leur séparation. L'avantages de IDECS réside dans son coût d'équipement qui est inférieur et il peut séparer des particules de petites tailles (<5mm) [1].

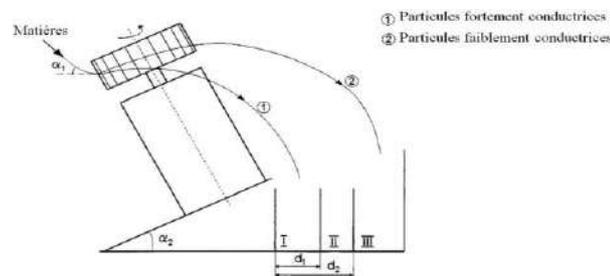


Figure 1.5 Séparateur à courants de Foucault à tambour incliné.

### c) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour Vertical

Le tambour du séparateur vertical à courant de Foucault tourne autour d'un axe vertical. 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. [2]

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 [2].

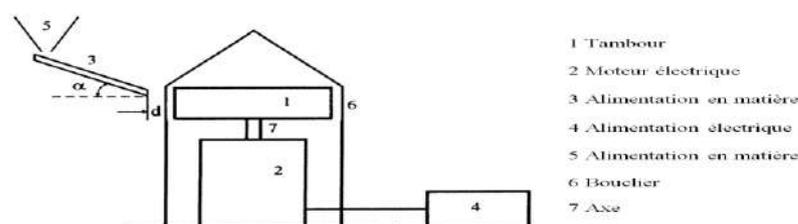


Figure 1.6 Séparateur à courants de Foucault à tambour vertical.

### 1.2.2 Séparateurs magnétiques à tambours

Plusieurs versions sont disponibles pour les différentes tâches de séparation – pour la séparation de matériaux grossiers à fins inférieurs à 1 mm. Les séparateurs à tambours magnétiques avec aimants permanents sont généralement utilisés pour la séparation du fer des matières en vrac de taille moyenne à fine. La disposition et le système magnétique intégré sont alors choisis en fonction du traitement souhaité. [4].

Le mode d'alimentation par le haut convient tout particulièrement si vous souhaitez récupérer un maximum de fer car le matériau à trier se rapproche le plus du champ magnétique vous pouvez voir sur la ( figure 1.7) Pour un effet de séparation optimal, il est d'autre part important que des forces magnétiques particulièrement élevées soient présentes sur la surface de l'enveloppe du tambour La génération de ces forces d'attraction puissantes avec un système à aimants radiaux qui applique la même polarité dans le sens de rotation. Les pôles radiaux sont disposés en demi-cercles, axialement, les uns à côté des autres. Ils génèrent ainsi un champ magnétique homogène avec des forces d'attraction élevées le long de l'enveloppe du tambour dans le sens du transport. De manière générale, pour un tambour avec alimentation par le bas on peut le voir sur la (figure 1.8) le diamètre du tambour magnétique est sélectionné en fonction des granulométries à trier, alors que la largeur de travail dépend du débit requis.[4].



Figure 1.7 Séparateurs magnétiques à tambours



Figure 1.8 Fonctionnement de Séparateurs magnétiques à tambours

### **1.2.3 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)**

Les séparateurs à basse intensité sont principalement utilisés pour la manipulation de matériaux ferromagnétiques ou de matériaux paramagnétiques de forte susceptibilité magnétique et/ou de taille de particule suffisamment grande [13], et développe une densité de force magnétique allant de  $2 \times 10^4$  à  $2 \times 10^6$  N/m<sup>3</sup>. Ce sont en général des séparateurs à construction simple. Ces séparateurs peuvent fonctionner soit en mode sec, soit en mode humide [1]

#### **1.2.3.1 Séparateurs magnétiques sec à basse intensité**

Les séparateurs magnétiques à basse intensité à sec sont couramment utilisés dans l'industrie pour éliminer le fer de récupération, concentrer les minerais de fer grossiers fortement magnétiques et récupérer les valeurs de fer à partir de scories de haut fourneau et d'aciéries. Ils permettent également de retirer les impuretés fortement magnétiques de divers matériaux. Ces séparateurs sont particulièrement utilisés pour protéger les équipements de manutention et de traitement tels que les concasseurs et les pulvérisateurs. Ils sont généralement adaptés aux matériaux secs ou présentant seulement de l'humidité de surface [13].

##### **a) Poulies magnétiques**

Les poulies magnétiques sont des séparateurs magnétiques utilisés pour trier les matériaux ferromagnétiques, tels que les aciers inoxydables. Elles fonctionnent en attirant les matériaux magnétiques sur la surface du tambour à l'aide de forces magnétiques puissantes, tandis que les matériaux non magnétiques suivent une trajectoire différente. Cela permet une séparation efficace des matériaux lors du processus de tri [4]

Conception pôles axiaux : uniformité champ magnétique sur largeur bande. Aimants ferrite strontium dans poulies magnétiques. Poulies électromagnétiques pour contrôle précis. Diamètres poulies : 500 mm à 1250 mm. Largeur poulie selon bande. Débits poulies selon dimensions (Tableau 1.1). Vitesses bande standard (Tableau 1.2). Bandes inclinées : contact supplémentaire, capacités plus élevées [13].



Figure 1.9 Poulies magnétiques

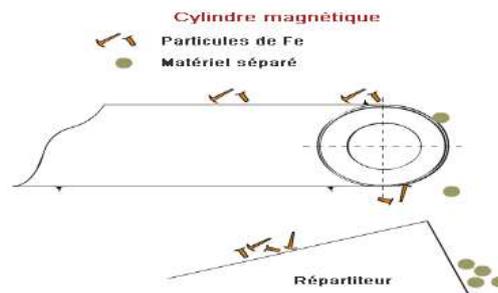


Figure 1.10 Principe de fonctionnement Poulies magnétiques



Figure 1.11 Opération de Poulies magnétiques

Diamètre des poulies[mm]	vitesse de bande[m/s]
500	1.1
630	1.45
800	1.7
1000	2
1250	2.2

Tableau 1.1 Vitesse standard de la bande pour l'opération de la poulie magnétique [13].

Taille d'alimentation [mm]	Diamètre des poulies[mm]	Productivité[t/h/m]
50-100	750-900	250-400
25-50	450-600	165-250
6-25	300-450	75-135

Tableau 1.2. Diamètres recommandés des poulies magnétiques [13].

### b) Séparateurs magnétiques à tambour

Les séparateurs magnétiques à tambour ont une conception de base similaire. Ils utilisent des aimants permanents disposés à l'intérieur d'un tambour rotatif non magnétique comme les tambours peuvent avoir différentes configurations en fonction de l'application. Les aimants sont arrangés de manière à alterner leur polarité sur la largeur du tambour, couvrant un angle de 90° à 120°. Cela permet d'éliminer le fer de rebut allongé ou de concentrer des particules grossières avec un taux de récupération élevé [13].

Le paragraphe souligne que l'amélioration des matériaux d'aimant permanent a augmenté l'induction magnétique des tambours des séparateurs magnétiques. Les tambours à base de ferrite conventionnelle génèrent environ 0,22 T sur leur surface, tandis que les tambours à base de NdFeB peuvent atteindre jusqu'à 1 T la (Figure 1.12) montre le flux magnétique autour d'un tambour magnétique. Ces tambours sont disponibles dans différentes tailles, avec des diamètres allant de 600 mm à 1500 mm pour les tambours en ferrite et de 380 mm à 1000 mm pour ceux à base de terres rares. La largeur la plus courante est de 1500 mm, mais des tambours de 3000 mm de largeur sont également disponibles [13].

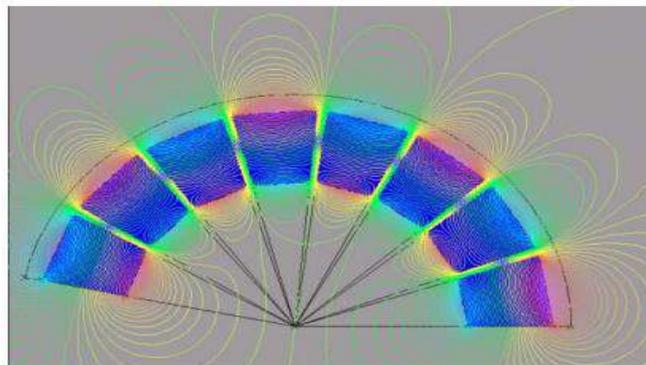


Figure 1.12 Un schéma du flux magnétique autour d'un tambour magnétique

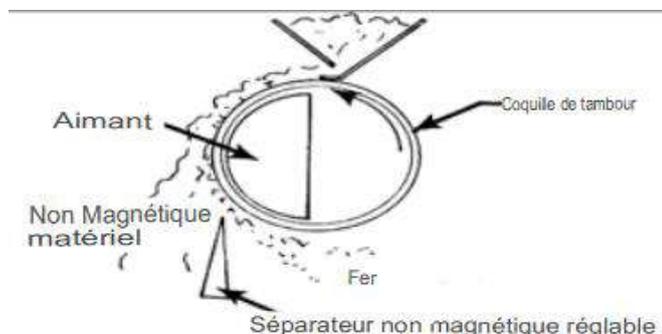


Figure 1.13 Séparateur magnétique à tambour sec avec alimentation par le haut



Figure 1.14 Fonctionnement d'un séparateur magnétique à tambour sec

### 1.2.3.2 Séparateurs magnétiques humides à basse intensité

Que ce soit pour le traitement de grands volumes de minerai de fer ou l'élimination des contaminants micronisés ferreux ou paramagnétiques contenus dans un minerai noble, des séparateurs magnétiques ont été spécialement développés pour l'industrie minière pour améliorer les rendements des broyeurs à boulets grâce à l'élimination des pièces métalliques générées par l'usure du matériel ou en les utilisant comme protection anti-usure [6].

#### a) Séparateurs magnétiques humides à tambour à basse intensité

Les séparateurs magnétiques à tambour humide sont utilisés pour récupérer des solides ferromagnétiques à partir d'une alimentation en suspension. Le tambour est partiellement immergé dans un réservoir d'eau et transporte le matériau à traiter à travers le système magnétique et le concentré magnétique hors du réservoir. La taille de l'alimentation traitée dans ces séparateurs ne dépasse que rarement 6 mm, tandis que la taille inférieure de l'alimentation peut être aussi petite que 20  $\mu\text{m}$ . La conception des réservoirs pour le séparateur à tambour est très importante et est déterminée par les objectifs du processus de séparation. Il existe trois conceptions de réservoirs de base. [13].



Figure 1.15 séparateur magnétique à tambour humide.

#### i. Réservoir simultané

La conception du réservoir concurrent est montrée schématiquement dans la (figure 1.16) Le matériau est introduit à une extrémité du séparateur par le bâti d'alimentation et s'écoule dans le sens de rotation du tambour. Le matériau magnétique est capté par

l'aimant et le matériau non magnétique est évacué en bas par l'ouverture de décharge des résidus. Les particules magnétiques continuent d'adhérer à la surface du tambour et passent à travers une ouverture entre la coque du tambour et la paroi du réservoir. La fraction magnétique est ensuite évacuée par la lèvre de décharge.

La conception concurrente du réservoir est utilisée principalement pour le traitement de matériaux plus grossiers dans la plage de taille de 5 mm et en dessous. Un débit élevé et une haute qualité du concentré magnétique sont des caractéristiques typiques de cette conception [13].

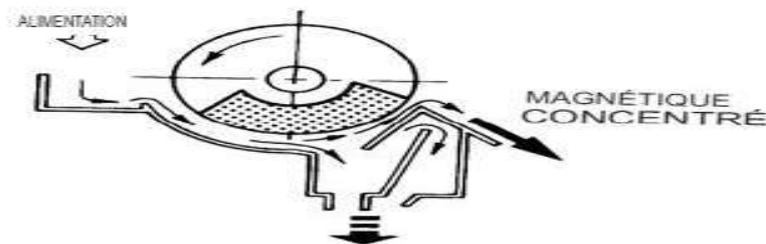


Figure 1.16 Réservoir simultané

## ii. Réservoir à contre-rotation

Dans la conception de réservoir en contre-rotation (Figure.1.17) l'alimentation est introduite à travers une boîte d'alimentation spéciale vers le tambour, qui tourne dans le sens opposé à l'écoulement de la boue. Le matériau magnétique est capté par le tambour et déchargé presque immédiatement. Étant donné que les résidus s'écoulent le long de tout l'arc magnétique du tambour avant d'être déchargés, les pertes sont minimales. Cette conception de réservoir est utilisée principalement lorsque des augmentations de débit sont rencontrées, impliquant éventuellement une forte teneur en matériau magnétique. Des récupérations très élevées peuvent ainsi être obtenues avec cette conception, tandis que la qualité du concentré est d'une importance secondaire seulement. La taille des particules peut atteindre 4 mm, mais est de préférence inférieure à 0,5 mm [13].

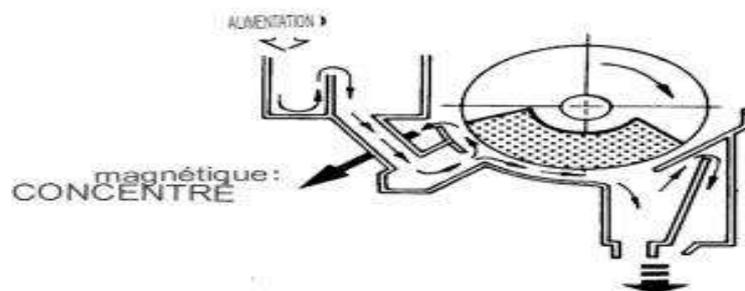


Figure 1.17 Réservoir à contre-rotation [13].

### iii. Réservoir à contre-courant

Le design de la cuve à contre-courant (Figure 1.18) est principalement utilisé pour les finitions où un nettoyage très complet est requis. Le terme "contre-courant" fait référence au fait que les résidus doivent s'écouler à contre-courant de la rotation du tambour lorsqu'ils quittent le séparateur. L'alimentation est introduite près du fond du tambour et agitée par des jets d'eau de lavage. Les résidus s'écoulent à l'extrémité opposée de la cuve par un débordement de décharge des résidus, qui sert également de contrôle du niveau de la pulpe. Cela garantit une haute récupération du matériau magnétique et une haute qualité du concentré. Ces cuves conviennent le mieux aux matériaux finement broyés de 100  $\mu\text{m}$  et moins [13].

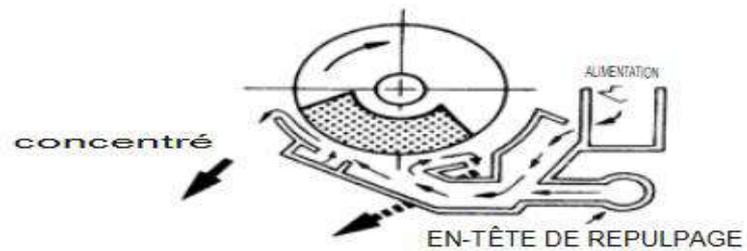


Figure 1.18 Réservoir à contre-courant [13].

### 1.2.4 Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI)

Ces types de séparateurs sont utilisés pour la purification ou la concentration des matériaux faiblement magnétiques (paramagnétiques et diamagnétiques) qui nécessitent un champ magnétique puissant. Le générateur du champ magnétique est un électroaimant ou un aimant permanent céramique [13]., et développe une densité de force magnétique allant  $2 \times 10^7$  à  $4 \times 10^9 \text{ N/m}^3$  [1].

Les particules diamagnétiques sont évacuées sous l'effet de la force centrifuge et de répulsion tandis que les paramagnétiques restent collées au rotor et en sont détachées à l'aide de ballais. Pour la séparation des particules non ferreuses préalablement débarrassés de ses composants ferreux, des séparateurs à tambours à aimants permanents fonctionnant sur la base des courants de Foucault sont utilisés [3].

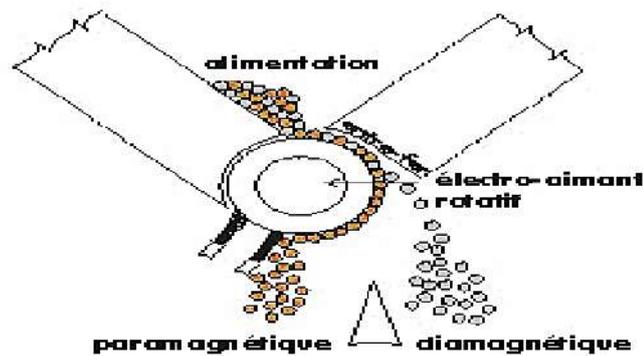


Figure 1.19 Principe de la séparation magnétique SMHI des particules diamagnétiques et paramagnétiques [13].

#### 1.2.4.1 Séparateur magnétique à rouleaux induits

Le séparateur à rouleaux magnétiques induits (IMR) illustré dans les (figures 1.20 et 1.21) se compose d'un rouleau laminé en rotation formé de disques magnétisables et non magnétiques alternés. Le rouleau est placé entre des pièces polaires façonnées d'un électroaimant. L'électroaimant induit un champ magnétique dans la stratification magnétique du rouleau et génère des régions de fort gradient de champ magnétique. Le matériau à traiter est alimenté en un flux mince et contrôlé par un alimentateur vibrant sur le dessus du rouleau. Lorsque le rouleau tourne, le matériau passe à travers un étroit espace entre le pôle de l'aimant et le rouleau. Les particules non magnétiques sont déchargées du rouleau tandis que les particules magnétiques sont attirées par le rouleau et se rapportent dans une goulotte séparée lorsqu'elles entrent dans une région en dehors de la sphère d'influence de l'aimant. Le matériau ferromagnétique doit être enlevé avec un scalpeur magnétique séparé avant l'alimentation en IMR, pour éviter le colmatage de l'espace [13].

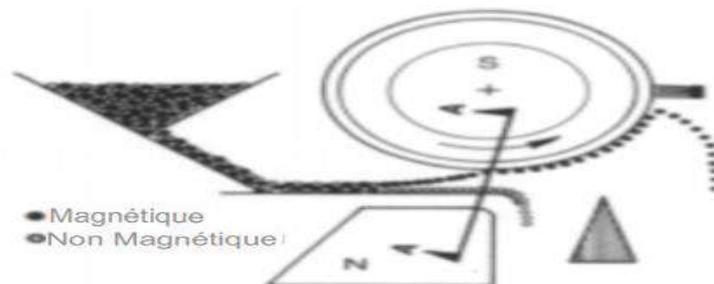


Figure 1.20 séparateur à rouleau magnétique induit [13].



Figure 1.21 séparateur à rouleaux magnétiques induits

### 1.2.4.2 Séparateur magnétique à bande croisée

Le séparateur magnétique à bande croisée est l'un des plus anciens types de séparateurs utilisés pour concentrer des minerais modérément magnétiques. Le principe de fonctionnement est illustré à la (Figure 1.22) Le matériau sec est alimenté en couche unique sur un convoyeur à bande et est transporté entre les pôles du système magnétique. La bande, avec sa charge, passe entre les pôles de deux ou plusieurs électroaimants. Les pôles inférieurs sont plats et immobiles, tandis que les pôles supérieurs correspondants sont profilés et peuvent être relevés ou abaissés selon les besoins du matériau en cours de traitement. Une bande transversale sans fin passe autour d'une série de poulies et traverse chaque surface supérieure de pôle à angle droit par rapport à la bande transporteuse. Au fur et à mesure que le matériau passe, les particules magnétiques sont attirées vers la bande transversale, transportées avec elle vers le côté de décharge et tombent dans une benne [13].

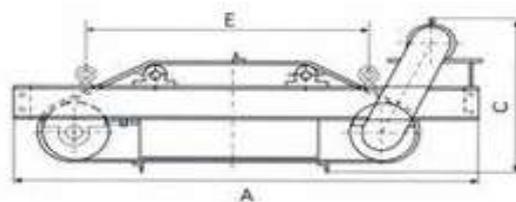


Figure 1.22 Séparateur magnétique à bande croisée

### 1.2.5 Séparateurs magnétiques à haute gradient de champ (SMHG)

Le séparateur magnétique haut gradient (SMHG) à bobinage de cuivre fonctionne à température ambiante et nécessite un système de réfrigération par eau d'ionisée. Le séparateur à bobinage supraconducteur utilise quant à lui, un système cryostatique pour le refroidissement de la bobine à la température de l'hélium liquide. Quelque soit la configuration de champ retenue, la séparation supraconductrice nécessite toujours un réservoir cryostatique rempli d'hélium liquide, destiné à refroidir le bobinage en alliage supraconducteur. Vous pouvez le voir sur la (figure 1.23) Ces séparateurs



Figure 1.23 Séparateurs magnétiques à haute gradient de champ

permettent le traitement des matériaux paramagnétiques faibles et de très petites granulométries (ex. les ultrafines dispersées dans un fluide) [3].

### 1.3 Les Aimants permanents

Un aimant permanent ou un aimant permanent est un matériau d'où émane toujours une force magnétique. Un tel aimant permanent peut attirer des substances ferromagnétiques (par exemple du fer ou du cobalt). De plus, les pôles du même nom de deux aimants permanents se repoussent. Un aimant permanent peut être démagnétisé par un puissant champ magnétique externe qui neutralise le champ magnétique de l'aimant permanent. Une aimantation est également possible par une force mécanique élevée ou en atteignant une température supérieure à la température de Curie [9].

Il existe essentiellement trois différents types d'aimants permanents:

- aimants en ferrites
- aimants Alnicos ((aluminium+(nickel) +(cobalt))
- aimants terres rares.

Les deux figures (1.24 et 1.25) présentent les caractéristiques de ces trois types

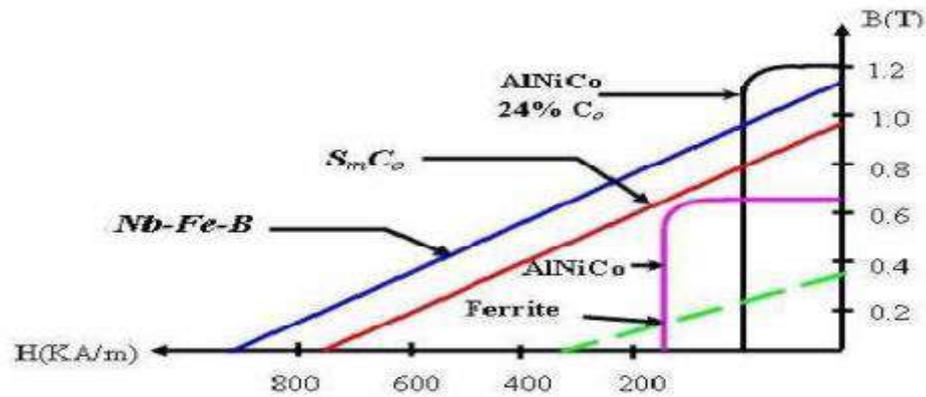


Figure 1.24 Courbe B (H) des différents types des aimants permanents [2].

### 1.3.1 Aimants en Ferrite

Les aimants en ferrite sont les aimants les moins chers pour des applications simples. Par rapport aux aimants en néodyme, cependant, ils sont également nettement plus faibles. Ils résistent à des températures allant jusqu'à 250°C, sont résistants à la rouille et donc adaptés à une utilisation en extérieur [9].

#### 1.3.1.1 Caractéristiques principale

Le Tableau ci-dessous illustrant différent caractéristiques d'aimant en ferrite :

Paramètre	Ferrites
Induction rémanente $B_r$ (à 20°C) [T]	0.2 – 0.41
Champ coercitif intrinsèque $H_{ci}$ (à 20°C) [A/m]	200 – 350
Densité d'énergie volumique (BH)max [kJ/m <sup>3</sup> ]	10 – 40
Perméabilité magnétique relative $\mu_m$	1.05 – 1.2
Résistivité électrique $\rho_m$ [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	100
Température de Curie [°C]	450
Température maximale de fonctionnement [°C]	250
Coefficient de température pour $B_r$ [%/°C]	-0.18 ~ -0.2
Coefficient de température pour $H_{ci}$ [%/°C]	+0.2 ~ +0.5
Densité volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	3500 – 5000

Tableau 1.3 Résumé des caractéristiques pour l'aimants en ferrite

### 1.3.2 Aimants en Alnico

L'alnico se compose principalement d'aluminium, nickel et cobalt. Ce type d'aimant possède une induction rémanente élevée mais une faible coercitivité. Ils présentent une grande stabilité aux températures extrêmes et conservent leurs caractéristiques magnétiques à des températures comprises entre -250 °C et 550 °C [10].

#### 1.3.2.1 Caractéristiques principale

- Ils restent parmi les matériaux présentant la plus forte induction rémanente
- Les alnicos présentent une perméabilité magnétique de recul élevée par rapport à tous les autres aimants.

- L'aimant alinco peuvent ainsi être utilisé jusqu'à 500 – 550°C sans perte significative
- Une variation d'aimantation standard de 0.02%/°C qui peut être amélioré à seulement quelques PPM/°C
- L'aimant alinco une excellente stabilité chimique. Ainsi si de l'oxydation rouge peut se développer en surface de l'aimant et en présence d'humidité
- L'alliage peut être attaqué par des solutions à PH > 7. [10]

### 1.3.3 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 [2]. On peut trouver trois types :

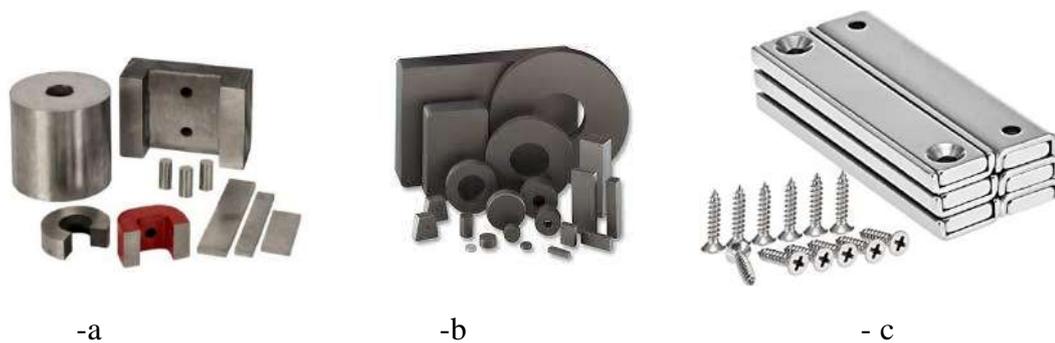


Figure 1.25 Aimants permanents, (a) Alinco (Samarium-Cobalt (Sm-Co)), (b) Ferrite (Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)), (c) Terre-Rares.

#### 1.3.3.1 Caractéristiques principale

- Un choix de dimensions.
- Très haute coercivité (résistance à la démagnétisation).
- Haute énergie magnétique (capacité à stocker de l'énergie).
- Résistance à la corrosion.
- Fragilité (risque de casse en raison de leur nature cristalline) [11].

Paramètre	NdFeB	SmCo
Induction rémanente Br (à 20°C) [T]	1.02 – 1.47	0.9 – 1.12
Champ coercitif intrinsèque Hci (à 20°C) [A/m]	750 – 3250	500 – 1500
Densité d'énergie volumique (BH)max [kJ/m <sup>3</sup> ]	200 – 415	140 – 250
Perméabilité magnétique relative $\mu_m$	1.02 – 1.2	1.03 – 1.1
Résistivité électrique $\rho_m$ [ $\mu\Omega m$ ]	1.4 – 1.6	0.5 – 0.9
Température de Curie [°C]	310 – 370	700 – 800
Température maximale de fonctionnement [°C]	80 – 240	350
Coefficient de température pour Br [%/°C]	-0.12 ~ -0.08	-0.05 ~ -0.03
Coefficient de température pour Hci [%/°C]	-0.8 ~ -0.4	-0.25 ~ -0.15
Densité volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	7200 – 7500	8200 – 8500

Tableau 1.4 Résumé des caractéristiques pour aimants Terres-Rares

### 1.3.4 Domaine D'application des aimants permanents :

#### a) Ferrite :

- Les moteur électrique DC
- Les haut-parleurs
- Les relais reed

#### b) Alinco :

- L'industrie automobile
- L'industrie pétrolière et gazière
- Fabrication de moteurs électriques et de générateurs
- 1.4. Avantages liés à l'utilisation de Séparation Magnétique

#### c) Terres-Rares

- La fabrication d'accessoires d'atelier.
- De boutons magnétiques pour le frigo ou de loquets d'armoire.
- Utilisées dans les batteries des autos hybrides et électriques.
- On trouve aussi des terres rares légères dans les catalyseurs des pots d'échappement.
- Les piles de vos appareils électroniques en consomment à leur petit niveau : dans une batterie AAA, la masse de terres rares est de 1 g [12]

## 1.4 Avantages liés à l'utilisation de Séparation Magnétique

### 1.4.1 séparateurs magnétiques à tambours

- Protection de la technologie située en aval (broyeurs, presses, convoyeurs à vis sans fin, etc.) contre les détériorations dues aux objets ferromagnétiques (débris de machines, vis, écrous, bouts de fils, etc.)
- Séparation des particules magnétiques de 0,5 mm

- Séparation des contaminants ferromagnétiques
- Nettoyage automatique – aucune intervention des opérateurs [8]

#### **1.4.2 séparateurs magnétiques à aimants permanents**

- La matière à traiter est nettoyée des contaminants ferromagnétiques.
- Protection permanente des équipements technologiques.
- Production fluide, il n'est pas nécessaire d'interrompre le flux de matière pour pouvoir nettoyer le séparateur.
- Réduction des frais de personnel et du risque d'erreur [8].

#### **1.4.3 Séparateurs magnétiques à courants de Foucault**

La technique de la séparation magnétique à courants de Foucault est utilisée dans différentes industries du recyclage pour récupérer les métaux ferromagnétiques et conducteurs des flux de déchets industriels. Elle est principalement utilisée pour:

- **Effectivité:** Le séparateur à courants de Foucault est très efficace pour séparer les matières métalliques qui se trouvent dans les déchets. Il est capable d'éliminer jusqu'à 99 % des matières métalliques présentes dans les déchets.
- **Automatisation:** Le séparateur à courants de Foucault peut être facilement intégré dans des processus automatisés et il rend le tri des matières plus rapide et plus efficace.
- **Respectueux de l'environnement :** Vu que le séparateur à courants de Foucault réduit la quantité des déchets et celle des déchets déposés en décharge, il contribue à la protection de l'environnement.
- **Capacité élevée:** Le séparateur à courants de Foucault est capable de traiter d'importantes quantités de matières en très peu de temps. Cela signifie donc qu'il est idéal pour être utilisé dans l'industrie. [8]
- **Le recyclage des circuits électroniques imprimés des téléphones mobiles usagés contenant des matériaux de valeurs.** Après le broyage, le séparateur à courants de Foucault sert à séparer les circuits imprimés de la matière plastique (les carcasses et le verre des écrans) [1]

#### **1.4.4 Séparateurs magnétiques à Poulies**

- Remplace avec un minimum de modifications, la poulie de tête d'un convoyeur à bande
- Différentes configurations pour largeurs de bandes et hauteurs de couches diverses

- Idéal pour l'élimination des métaux situés proches du fond de l'auge de la bande [6]

## **1.5 Conclusion**

En conclusion, les séparateurs magnétiques jouent un rôle crucial dans diverses applications industrielles et environnementales. Ils permettent la séparation efficace des matériaux ferromagnétiques des autres matériaux, offrant ainsi des avantages tels que la purification des minéraux, le recyclage des déchets, la séparation des métaux dans les processus de production et la protection des équipements sensibles contre les contaminants magnétiques.

Les aimants permanents jouent un rôle essentiel dans de nombreuses applications modernes, allant des technologies de communication et de stockage de données aux dispositifs médicaux, en passant par les moteurs électriques et les générateurs. Ils offrent des propriétés magnétiques stables et durables qui permettent une utilisation à long terme sans besoin d'alimentation externe.

# Chapitre 2

## 2.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'établissement d'un modèle mathématique de la structure d'un séparateur qui décrit les processus physiques de conception d'un séparateur magnétique en modélisant, sur la base des équations de Maxwell, qui est un modèle d'équation aux dérivées partielles locales, formé par la combinaison du théorème d'Ampère et de la loi de Faraday en électromagnétisme. Les formes et intensités des aimants permanents, ainsi que les caractéristiques géométriques, sont nécessaires pour la modélisation de tout dispositif de séparation magnétique. La solution de ces équations, qui sont liées aux règles du comportement magnétique du séparateur en, est obtenue à l'aide de la méthode des éléments finis pour calculer et visualiser la distribution des propriétés de forme et de magnitude magnétiques entourant un séparateur magnétique, dans des états statiques et rotatifs, et d'autres paramètres, avec ou sans présence de particules non ferreuses.

## 2.2 Modélisation du problème de séparation du tambour magnétique

### 2.2.1 Modèle mathématique régissant le problème magnétique

#### 2.2.1.1 Champ magnétique appliqué et équation du modèle

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$\vec{H}$  est le champ d'excitation magnétique,  $\vec{J}$  est la densité de courant..  $\vec{E}$  est le champ électrique et  $\vec{B}$  est la densité de flux magnétique,  $\vec{D}$  est l'induction électrique  $\rho$  est la densité volumique de charge électrique.

le système d'équations de Maxwell ((2.2) - (2.4)) est indéterminé, il est nécessaire d'incorporer aux équations les relations qui expriment les propriétés des matériaux, connues sous le nom de relations constitutives ou lois de comportement ce sont [1] :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

$\mu$  est la perméabilité magnétique  $\epsilon$  et  $\sigma$  sont respectivement la permittivité et la conductivité électrique.

Dans notre travail, afin de permettre la séparation simultanée de particules conductrices et magnétiques, il est nécessaire d'appliquer un champ magnétique dynamique. Pour le générer, nous avons utilisé un tambour d'aimant permanent entraîné par un moteur électrique. Dans l'approximation quasi-stationnaire ou dans l'approximation du génie électrique, cette configuration a été employée ( $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$ ).

Le système d'équation Maxwell réduite liée à notre application est donné comme suit :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (2.8)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

Les lois de comportement associées à ce système sont données par :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} = -\sigma(\vec{E} - \vec{v}_p \wedge \vec{B}) \quad (2.11)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.12)$$

$\vec{J}_{ind}$  est la densité de courants induits  $\vec{v}_p$  est la vitesse de la particule et  $\vec{B}$  est la densité de flux magnétique rémanente.

La relation de conservation du flux magnétique (2.10) implique qu'il existe un potentiel vectoriel magnétique  $\vec{A}$  que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (2.13)$$

En transportant l'équation (2.13) dans (2.9), nous obtenons :

$$\vec{\nabla} \wedge \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (2.14)$$

L'équation (II.14) implique qu'il existe un potentiel scalaire électrique  $V$  tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (2.15)$$

Il s'ensuit que [2,21] :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.16)$$

La substitution des équations (2.11) et (2.12) dans l'équation (2.8), en tenant compte des équations (2.13) et (2.16), conduit à une formulation A - V de l'équation aux dérivées partielles (PDE) donnée par le système suivant :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V \right) - \sigma \left( \vec{v}_p \wedge \left( \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) \right) = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r \\ \vec{\nabla} \cdot \left( \varepsilon \vec{\nabla} V \right) + \vec{\nabla} \cdot \left( \varepsilon \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Le système (2.17) n'a pas de solution unique si  $\vec{A}$  est une solution, tout champ de la forme  $\vec{A} + \vec{\nabla} f$  où  $f$  est une fonction scalaire, est également une solution de (2.17). Pour assurer l'unicité de la solution, il est nécessaire d'ajouter une équation scalaire, appelée condition de jauge [1]. Les jauges couramment utilisées sont la jauge de Coulomb  $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$  et la jauge de Lorentz  $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = -\mu\sigma V$

Pour résoudre le système l'équation(2.17), on associe des conditions aux limites qui peuvent être de type Dirichlet ou Newman ou bien mixtes.

Dirichlet homogène :  $A = 0$

Dirichlet non homogène :  $A = Cte$

Newman homogène :  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$

Newman non homogène :  $\frac{\partial A}{\partial n} = Cte$

Dirichlet-Newman (Robin) :  $aA + b \frac{\partial A}{\partial n} = g$

$a$  et  $b$  sont des constants

Sur une limite de séparation entre deux milieux 1 et 2 les champs électromagnétiques pourraient être discontinus et ne sont par conséquent pas différentiables. Cependant, il est possible de dériver des conditions dites de passage ou de transmission permettant d'exprimer les relations entre deux grandeurs sur les frontières des deux milieux [1], La continuité de la composante normale de l'induction magnétique.

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (2.18)$$

La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = \vec{0} \quad (2.19)$$

La Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique.

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (2.20)$$

$\vec{n}$  est le vecteur normal à la surface,  $\rho_s$  et  $\vec{J}$  sont respectivement les densités de charges et de courants surfaciques.

## 2.1.2 Forces d'origines magnétiques appliquées aux particules

### 2.1.2.1 Force appliquée à la particule magnétique

Lorsqu'une particule ferromagnétique est soumise à un champ magnétique extérieur elle s'aimante, l'interaction entre cette aimantation et le champ magnétique appliqué résulte en une force de nature attractive qui oblige la particule magnétique de dévier et de se rapprocher vers la source du champ.

Pour une particule ferromagnétique solide de volume  $V_p$  la force magnétique appliquée est donnée par [1] :

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} \quad (2.21)$$

Pour une configuration tridimensionnelle, et dans un système de coordonnées cartésiennes, la force appliquée sur une particule magnétique est donnée par [1] :

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p \left( M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) (H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k}) \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} \vec{F}_{mx} = \mu_0 V_p \left( M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \\ \vec{F}_{my} = \mu_0 V_p \left( M_x \frac{\partial H_y}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \\ \vec{F}_{mz} = \mu_0 V_p \left( M_x \frac{\partial H_z}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_z}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2.23)$$

Ici  $\vec{M}$  représente l'aimantation volumique de la particule, elle est donnée par [1] :

$$\vec{M} = \left( \frac{B_x}{1+\chi n_1}, \frac{B_y}{1+\chi n_2}, \frac{B_z}{1+\chi n_3} \right) \quad (2.24)$$

$\chi$  est la susceptibilité magnétique, elle est donnée par :

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (2.25)$$

$n_1, n_2, n_3$  sont appelés les facteurs de démagnétisation. Ils dépendent de la forme géométrique de la particule. Pour une particule sphérique,  $n_1 = n_2 = n_3 = \frac{1}{3}$ . Par substitution dans l'équation (2.24) et la prise en compte de l'équation (2.26) on trouve :

$$\begin{cases} M_x = \frac{3\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+2)} H_x \\ M_y = \frac{3\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+2)} H_y \\ M_z = \frac{3\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+2)} H_z \end{cases} \quad (2.26)$$

Pour une particule cylindrique,  $n_1 = 0$ ,  $n_2 = n_3 = \frac{1}{2}$  Après simplification on obtient

$$\begin{cases} M_x = \mu_r(\mu_r - 1) H_x \\ M_y = \frac{2\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+1)} H_y \\ M_z = \frac{2\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+1)} H_z \end{cases} \quad (2.29)$$

### 2.1.2.2 Force inter particulaires (Dipôle-Dipôle) entre particules

En absence de champ magnétique, les particules magnétiques sont constituées de mono-domaines avec des moments magnétiques orientés aléatoirement, ce qui annule le moment magnétique total de la particule. Cependant, en présence d'un champ magnétique externe, les moments magnétiques des mono-domaines s'alignent dans la direction du champ, créant un moment magnétique global pour la particule. Les particules magnétisées agissent comme des dipôles magnétiques et génèrent une force d'interaction magnétique attractive avec les dipôles voisins [1]

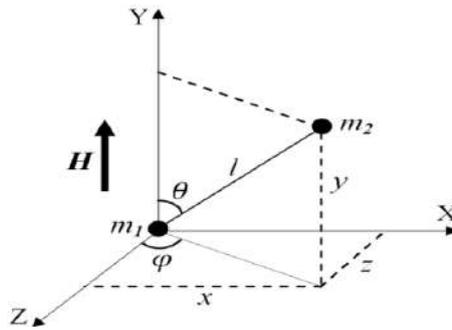


Figure 2.1 Système de deux particules sphériques aimantées voisines [1]

Les trois composantes de la force d'interaction entre particules sont données par [1] :

$$\begin{cases} F_{DDx} = \frac{|m_x'|^2}{4\pi\mu} \frac{3(5 \cos^2 \theta - 1) \sin \theta \sin \varphi}{l^4} \\ F_{DDy} = \frac{|m_y'|^2}{4\pi\mu} \frac{3(5 \cos^2 \theta - 3) \cos \theta}{l^4} \\ F_{DDz} = \frac{|m_z'|^2}{4\pi\mu} \frac{3(5 \cos^2 \theta - 1) \sin \theta \cos \varphi}{l^4} \end{cases} \quad (2.30)$$

$m_x'$ ,  $m_y'$ ,  $m_z'$  sont les moments des dipôles magnétiques, ils sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} m'_x = \frac{12\mu\pi xy\beta^2 r^6 H}{(l^2+r^2)^{\frac{5}{2}}(1-4\pi\mu\beta r^3)} \\ m'_y = \frac{4\mu\pi xy\beta r^3 H}{(1-4\pi\mu\beta r^3)} \\ m'_z = \frac{12\mu\pi xy\beta^2 r^6 H}{(l^2+r^2)^{\frac{5}{2}}(1-4\pi\mu\beta r^2)} \end{array} \right. \quad (2.31)$$

$\mu$  représente la perméabilité magnétique du milieu  $\beta = \frac{\mu_k - \mu_r}{\mu_k + 2\mu_r}$ ,  $\mu_k$  Et  $\mu_r$  sont respectivement les perméabilités magnétique relatives des particules et du milieu,  $r$  est le rayon du dipôle magnétique  $H$  et représente l'intensité du champ magnétique appliqué.

### 2.1.2.3 Force appliquée à la particule conductrice

Lorsqu'une particule conductrice est soumise à un champ magnétique variable dans le temps, elle sera le siège d'une force électromotrice, ce qui conduit à la création des courants induits dans la particule. L'interaction entre la densité de ces courants et le champ magnétique dynamique appliqué résulte en une force magnétique de nature répulsive appelée force de Lorentz qui oblige la particule de s'éloigner de la source de champ. Pour une particule solide de volume  $V_p$  la force de Lorentz est donnée par [16] :

$$\vec{F}_L = (\vec{J} \wedge \vec{B}) \cdot V_p \quad (2.32)$$

Pour une configuration tridimensionnelle, la force de Lorentz est exprimée par:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Lx} = V_p (J_y B_z - J_z B_y) \\ F_{Ly} = V_p (J_z B_x - J_x B_z) \\ F_{Lz} = V_p (J_x B_y - J_y B_x) \end{array} \right. \quad (2.33)$$

## 2.3 Différentes méthodes pour résoudre les équations aux dérivées partielles

L'objectif de l'application des méthodes de discrétisation numérique est de simplifier la résolution d'un système d'équations différentielles dans un domaine d'étude en un système d'équations algébriques dont la solution permet de déterminer les champs électromagnétiques et les déplacements. Nous mentionnerons quelques-unes des différentes techniques utilisées pour résoudre un système d'équations aux dérivées partielles.

### 2.3.1 La méthode des éléments finis (FEM)

Pour résoudre le problème mathématique proposé, nous utilisons le logiciel Maxwell Ansys Multiphysics basé sur la méthode des éléments finis (MEF) numérique pour trouver des solutions approximatives des équations aux dérivées partielles du domaine magnétique.

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique de calcul sophistiquée pour résoudre des équations différentielles et intégrales dans divers domaines de l'ingénierie et des sciences appliquées [17].

Cette méthode consiste à diviser le domaine d'intérêt en éléments finis et à utiliser des fonctions d'interpolation pour approcher l'inconnue dans chaque élément. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange du premier ou du second degré. L'interpolation dans un élément se fait en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnue aux interfaces de l'élément

#### 2.3.1.1 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe de la méthode des éléments finis réside dans la division du domaine élémentaire de dimensions finies en sous-domaines appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme d'ordre variable selon l'application.

Les principales étapes de construction d'une méthode des éléments finis sont les suivantes :

**There are different types of elements:**

- Discrétisation de l'environnement continu, représentant le domaine d'études dans le sous-domaine (élément).
- Construction de l'approximation nodale par sous-domaine.
- Calcule des matrices élémentaires (pour chaque élément) correspondant à l'intégrale du problème.
- Assemblage de matrices élémentaires en tenant compte des conditions limites
- Résoudre le système d'équation.
- résoudre le système d'équation.
- Élément linéaire (1D).
- Élément de surface (2D).

- Élément de volume (3D) [2]

Dans notre cas, pour le domaine d'étude qui est bidimensionnel, nous utilisons souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques. Afin d'obtenir une solution plus précise, nous procédons à un affinement du maillage en peut le voir sur la figure 2.2 :

- **Problème unidimensionnel (élément droit) :**

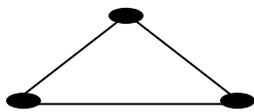


a- Linéaire (02 nœuds)

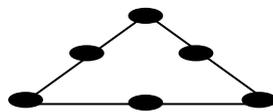
b- quadratique (03 nœuds)

c- cubique (04 nœuds)

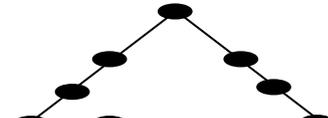
- **Problème bidimensionnel (triangle ou quadrilatéral) :**



a- Élément linéaire (03 nœuds)

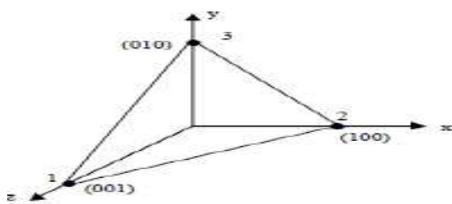


b- quadratique (06 nœuds)

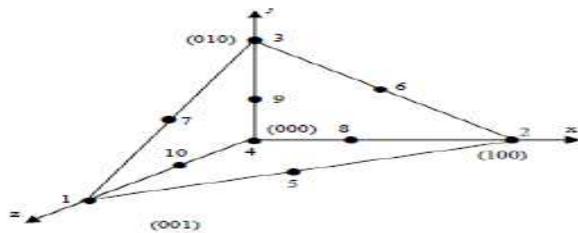


c- cubique (09 nœuds)

- **Problème tridimensionnel :**



a- Élément linéaire (04 nœuds)



b- quadratique (10 nœuds)

Figure 2.2 Discrétisation du domaine d'étude (maillage) [16]

## 2.4 Conditions limites

Les conditions aux limites permettent de déterminer les constantes d'expression du potentiel vectoriel dans chaque zone constitutive de la machine. On distingue deux types de conditions aux limites.

- Conditions limites de Dirichlet ( $A(r, \theta) = 0$ ) or Newman type ( $\partial A(r, \theta) / \partial r = 0$ )
- Conditions aux limites des études environnementales.

Dans un cadre d'étude de référence fixe, deux types de conditions sont distingués aux limites de séparation entre deux milieux (i) et (i + 1) :

### 2.4.1 analyse numérique

En raison de la complexité des systèmes électromagnétiques (géométrie en 3D, non-linéarité, phénomènes couplés), les équations de Maxwell n'ont généralement pas de solution

analytique. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes numériques en discrétisant l'espace et les grandeurs

locales. La méthode des éléments finis semble être la mieux adaptée pour résoudre ce type de problème. Cependant, il est difficile de discrétiser les éléments contenus dans la structure mathématique générée par les équations aux dérivées partielles [16].

Le concept fondamental de la méthode des éléments finis est la subdivision du modèle mathématique en composants disjointes de géométrie simple appelés éléments finis. Le comportement de chaque élément est exprimé en termes d'un nombre fini de degrés de liberté. Le comportement (réponse) du modèle mathématique est considéré, de manière approximative, comme celui du modèle discret obtenu en connectant ou en assemblant les éléments.

$$[K^e]\{U^e\} = \{F^e\} \quad (2.34)$$

## 2.5 Modélisation finie des aimants permanents

L'équation caractéristique d'hystérésis pour l'aimant permanent peut être insérée dans la loi d'Ampère (sans courants de déplacement), puis discrétisée. Cela est fait pour obtenir l'équation (2.34) [16]:

$$\nabla \times [vB - Hc] = J_{ext} \quad (2.35)$$

La force coercitive de l'aimant permanent (excitation) dans l'équation (2.34) peut être déplacée du côté gauche de l'équation pour obtenir l'équation (2.36).

$$\nabla \times (vB) = J_{ext} + \nabla \times Hc \quad (2.36)$$

L'équation peut également être résolue par rapport au vecteur de magnétisation [1], comme indiqué dans l'équation (2.37).

$$\nabla \times (vB) = J_{ext} + \nabla \times (v\mu_0 M) \quad (2.37)$$

De même, il est possible de résoudre l'équation par rapport au potentiel du vecteur magnétique.

$$\nabla \times (v\nabla \times A) = J_{ext} + \nabla \times Hc \quad (2.38)$$

En analyse 2D, il n'y a pas d'excitation de l'aimant permanent dans la direction z. La boucle de l'excitation peut alors être simplifiée en deux dimensions

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] = -J_{ext} + \frac{\partial Hc_x}{\partial y} - \frac{\partial Hc_y}{\partial x} \quad (2.39)$$

La seule zone où une force coercitive existe est dans la région de l'aimant permanent, mais les sources de diffusion s'appliquent uniquement aux limites de l'aimant permanent où Hc devient nul. Il est évident que l'aimant permanent a un enroulement de courant équivalent ( $HI = NI$ ).

### 2.5.1 modèles mathématiques

Pour calculer le champ magnétique dynamique nécessaire pour séparer les particules magnétiques et conductrices, et prendre en compte l'effet des courants induits liés à la variation du champ et au déplacement des particules conductrices, nous avons résolu, pour chaque étape de rotation du tambour, l'équation donnée par [1] :

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v}_p \times \vec{B} \right) = \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{B}_r) \quad (2.40)$$

$\vec{A}$  est le potentiel du vecteur magnétique,  $\vec{B}$  La densité de flux magnétique au niveau de la particule,  $\vec{B}_r$  est la densité de flux magnétique résiduelle des aimants,  $\mu$  est la perméabilité magnétique  $\sigma$  et  $\vec{v}$  représentent respectivement la conductivité électrique des particules et la vitesse de déplacement.

La force magnétique appliquée à une particule magnétique est donnée par [23] :

$$\vec{F}_m = \mu_0 \int_{v_p} (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} dv \quad (2.41)$$

$\vec{H}$  est l'intensité du champ magnétique dans le site de particules,  $\vec{M}$  est la magnétisation des particules,  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide et  $v_p$  est le volume de particules.

La densité de courant induite dans la particule conductrice liée à la variation du champ appliqué est donnée par [19-24] :

$$\vec{J}_F = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.42)$$

Le déplacement de la particule dans le champ appliqué conduit à la génération d'une composante supplémentaire des courants induits donnés par [23] :

$$\vec{J}_{Fa} = \sigma (\vec{v}_p \times \vec{B}). \quad (2.43)$$

La force résultante appliquée sur la particule conductrice est donnée par [23] :

$$\vec{F}_L = \left( -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v}_p \times \vec{B} \right) \times \vec{B} \right) \quad (2.44)$$

Pour calculer la trajectoire d'une particule en mouvement, on peut résoudre l'équation dynamique donnée par [1] :

$$\sum \vec{F} = m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} \quad (2.45)$$

Où  $m_p$  est la masse de particules et  $\vec{F}$  est la résultante des forces appliquées. En plus des forces appliquées aux particules données par les Equations (2.41) et (2.44), on peut mentionner la force d'interaction mécanique des particules avec le tapis roulant et l'interaction dipôle-dipôle magnétique entre les particules ferromagnétiques. Pour résoudre l'équation du mouvement (2.45), nous avons seulement considéré le magnétique, Lorentz et les forces de gravité[20,21].

## 2.6 Implementation du modèle dans l'ansys

### 2.6.1 Ansys maxwell

ANSYS Maxwell est un logiciel interactif haute performance utilisé Analyse d'éléments limités (FEA) pour résoudre des problèmes électriques ou magnétiques.

Maxwell résout les problèmes de champ électromagnétique en résolvant Maxwell Équations dans un espace limité avec des conditions de frontière appropriées et Conditions préliminaires spécifiées par l'utilisateur pour obtenir une solution garantie unicité [14]. L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les quatre équations de Maxwell qui lient les grandeurs magnétiques aux grandeurs électriques.

Et on peut le voir aussi l'organigramme de l'élément fini général Méthode d'analyse sur la (figure 2.3) Suivant :

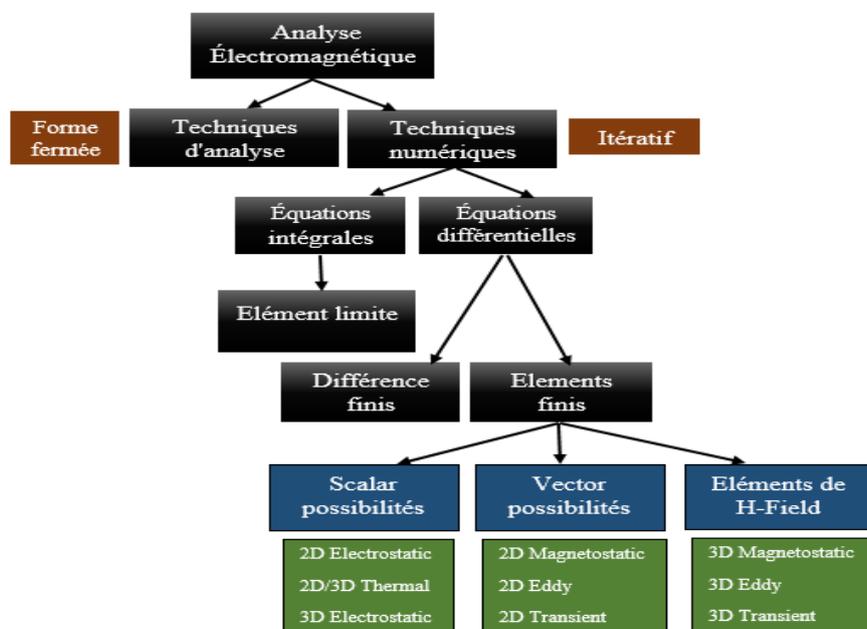


Figure 2.3 Organigramme de l'élément fini général

## 2.6.2 Maxwell Designs

Un design peut être ajouté à un projet Maxwell à partir de la barre de menu Projet

### 2.6.2.1 Types de Maxwell Designs

- **RMxpert :**

Rotating Machinery Expert est un outil analytique interactif utilisé pour concevoir et Analyser des machines électriques.

- **Maxwell 2D :**

Maxwell 2D utilise l'analyse par éléments finis pour simuler et résoudre des champs électromagnétiques 2D dans des plans XY ou RZ

- **Maxwell 3D :**

Maxwell 3D utilise l'analyse par éléments finis pour simuler et résoudre des champs électromagnétiques

### 2.6.3 Maxwell GUI (Graphical user interface)

On simplifier la GUI de l'ansys Maxwell sur la (figure 2.2) suivant :

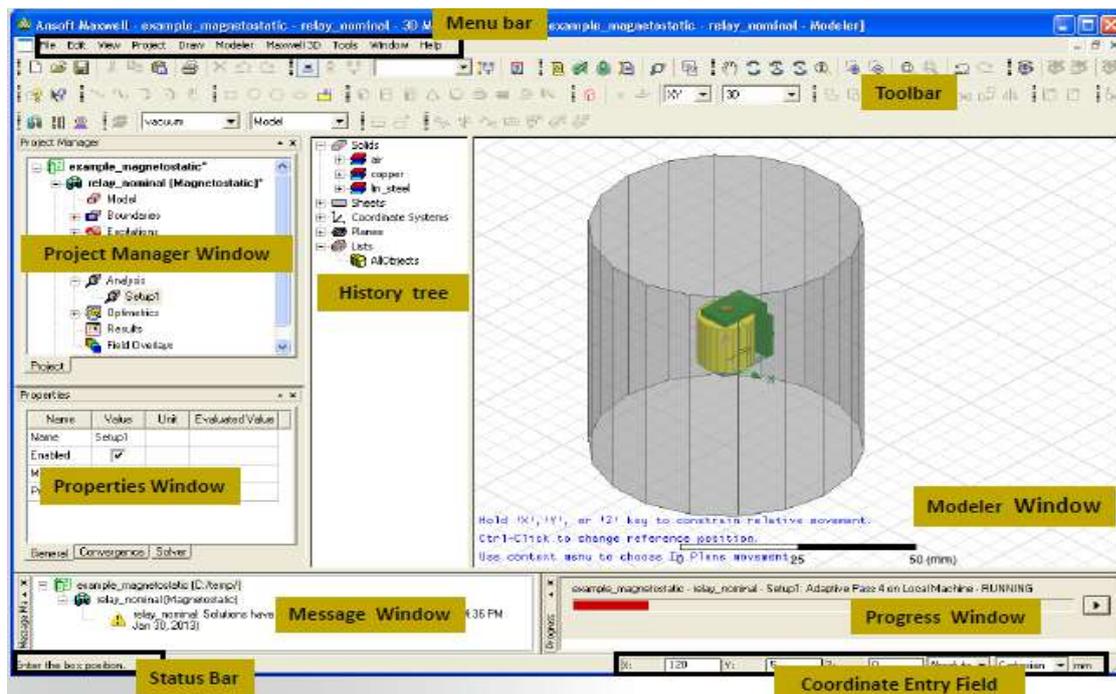


Figure 2.4 Interface de ansys maxwell

#### a) Menu bar

Si tu cliques sur le menu bar vous trouverez la :

- **File Menu :** Ouverture, fermeture et sauvegarde d'un projet.

- **Edit Menu** : Sélection et manipulation de la géométrie.
- **View Menu** : Définir l'option d'affichage ou masquer/afficher l'objet géométrique.
- **Project Menu** : Insérer les dessins, Ensembles de données et variables du projet.
- **Draw Menu** : Objets géométriques de primitives.
- **Modeler Menu** : les Opérations de géométrie et commandes d'analyse
- **Maxwell 3D/2D Menu** : Configuration de l'analyse Maxwell et contrôles après traitement.
- **Outils, Fenêtre et Aide** : Enregistrement et exécution des scripts, gestion des fenêtres, accès aux commandes d'aide.

### b) Project Manager window

La fenêtre Project Manager contient tous les détails de la configuration du problème

Effectuée pour n'importe quel projet on peut le voir sur la (figure 2.3.) ci-dessous :

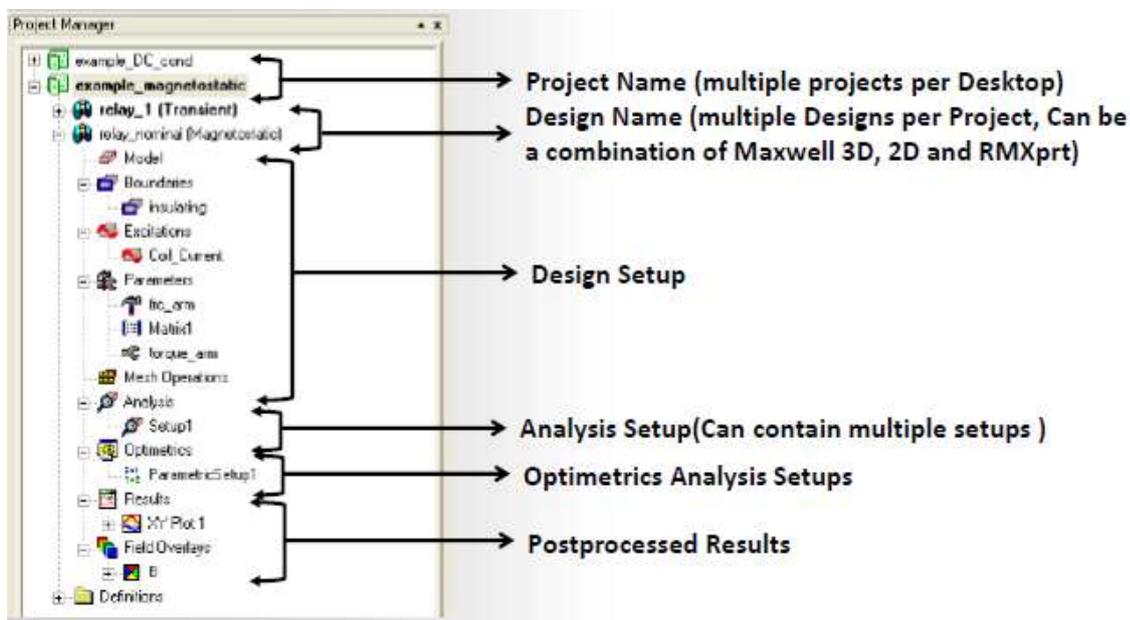


Figure 2.5 interface de Project manager

### c) History Tree

- L'arbre historique contient les détails de toutes les opérations géométriques effectuées dans un Design, Toute ligne, surface ou objets solides, systèmes de coordonnées ou ses plans peuvent être accessible à partir de l'arbre historique,

Les objets solides sont catégorisés en fonction des matériaux assignés en 3D tandis que les objets en feuille 2D sont catégorisés

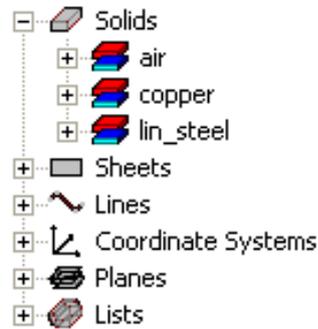


Figure 2.6 interface de History Tree

#### d) Toolbar

- La plupart des commandes de la barre de menus sont accessibles à partir de la barre d'outils sous forme d'icône, La barre d'outils peut être personnalisée pour ajouter ou supprimer des options en cliquant avec le bouton droit de la souris sur la barre d'outils ou en sélectionnant l'élément de menu

**Tools**→**Customize**

#### e) Properties Window

- Affiche toutes les propriétés de ces entités et L'entité sélectionnée peut être un objet géométrique, des opérations géométriques réalisées à partir de l'arborescence historique ou des entités de configuration ajoutées sélectionnées à partir du projet Fenêtre gestionnaire en suit La fenêtre Afficher les propriétés change selon l'entité choisie.

Double-cliquer sur une entité sélectionnée lancera également une boîte de dialogue pour la propriété afficher et éditer.

#### f) Coordinate Entry Field

- Cette fenêtre s'affiche à chaque transaction nécessitant l'entrée de coordonnées et les valeurs de coordonnées peuvent être saisies sous forme cartésienne, cylindrique ou sphérique



Figure 2.7 Les coordonnées

**g) Status Bar**

Affiche l'état de la fenêtre Maxwell, invite la marche à suivre pour toute opération géométrique ou des informations sur une commande sur laquelle la souris est placée

**h) Message Window**

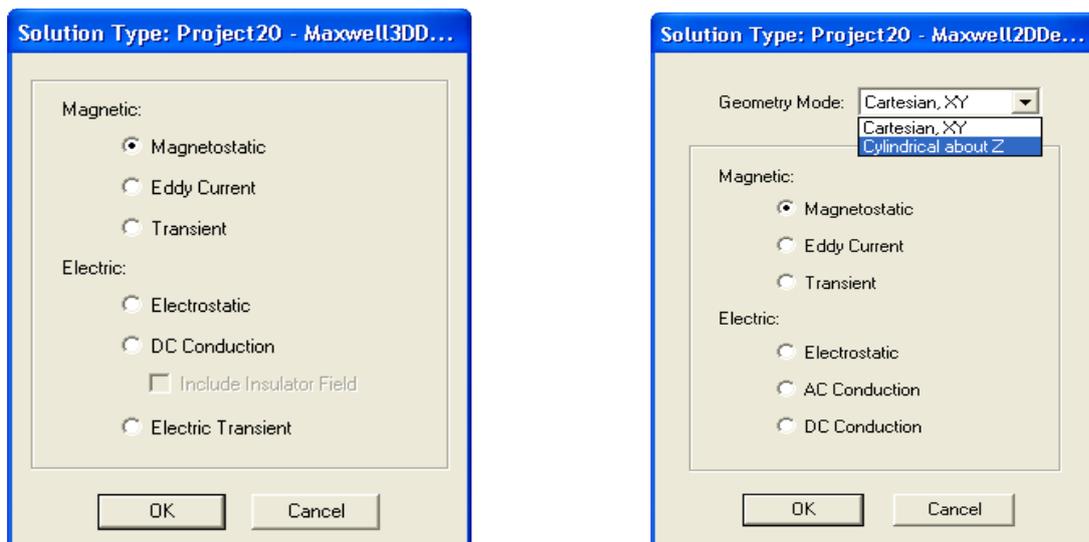
- Affiche les messages d'erreur, d'avertissement ou d'information résultant d'une opération
- Il est possible de copier et coller des messages dans un fichier texte, si nécessaire.

**i) Progress Window**

- Indique l'état d'avancement de l'analyse en cours [14]

**2.6.4 Solvers in Maxwell****2.6.4.1 Type de solveur**

- Le solveur Maxwell approprié peut être choisi selon l'application à résoudre.
- Le type de solveur peut être défini en sélectionnant l'élément de menu **Maxwell 3D/2D**→**Solution type**
- Pour la 2D, les utilisateurs peuvent également préciser si le problème sera résolu sur le plan XY ou RZ.



a- Maxwell 3D

b-Maxwell 2D

Figure 2.8 Type de Solution

### a. Magnetic Solvers

#### - Magnetostatic Solver :

- Résout les champs magnétiques statiques causés par les courants DC et les aimants permanents.
- Peut résoudre les matériaux linéaires et non linéaires.

#### - Eddy Current Solver :

- Résout les champs magnétiques sinusoïdaux dans le domaine de fréquence. Résout uniquement les matériaux de revêtement en 3D. Considère les courants de déplacement. Les champs induits tels que la peau et les effets de proximité actuels sont également pris en compte

#### - Transient Magnetic :

- Résout les champs magnétiques transitoires causés par des sources électriques temporelles ou mobiles et des aimants permanents dans des matériaux linéaires ou non linéaires. Les champs induits tels que la peau et les effets de proximité actuels sont pris en compte.

### b. Electric Solvers

#### - Electrostatic Solver :

- Résout les champs électrostatiques dans des matières linéaires.

- **DC Conduction :**

- Résout la tension, le champ électrique et la densité de courant à partir du potentiel.
- Peut résoudre les champs électriques dans les isolateurs aussi bien.

- **AC Conduction (seulement 2D) :**

- Résout les champs électriques sinusoïdaux dans le domaine Fréquence. Disponible uniquement avec le solveur 2D.

- **Transient Electric :**

- Champs électriques transitoires causés par des tensions, des distributions de charge ou des excitations de courant dans des matériaux non homogènes. Le potentiel électrique est la quantité de solution.

### 2.6.5 Maxwell Geometry

ANSYS Maxwell utilise une technique de modélisation primitive où la structure de base est créée à l'aide de primitives de géométrie, puis les opérations de géométrie sont effectuées pour atteindre l'objet final [14].

La géométrie peut également être créée dans ANSYS Design Modeler et peut être utilisée dans Maxwell via l'interface ANSYS Workbench qui a été discutée en ANNEXE [14].

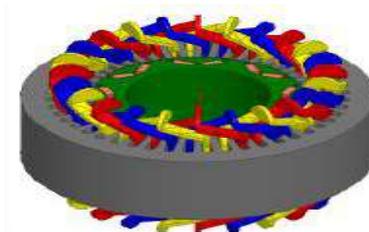


Figure 2.9 une géométrie

- **Geometry Selection :**

- Les commandes de sélection de géométrie sont accessibles via la barre de menu Modifier ou un clic droit sur l'espace de dessin

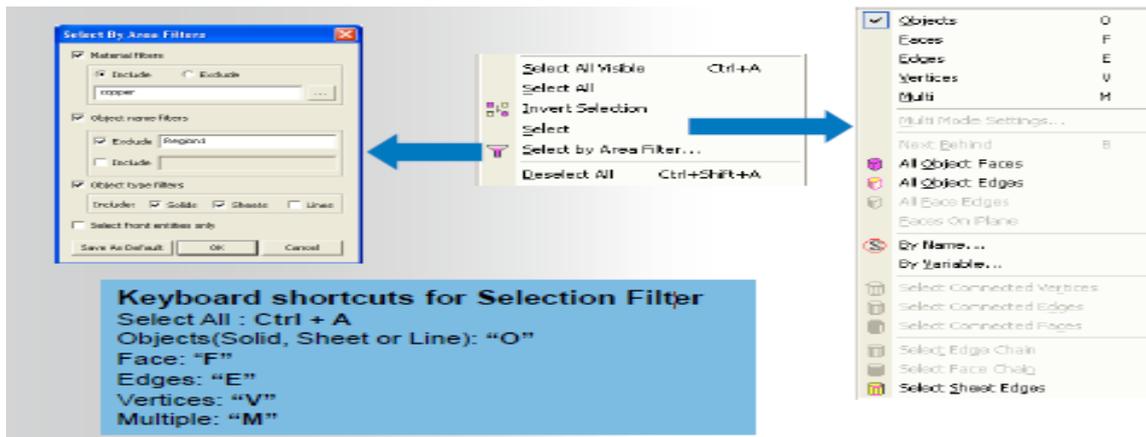
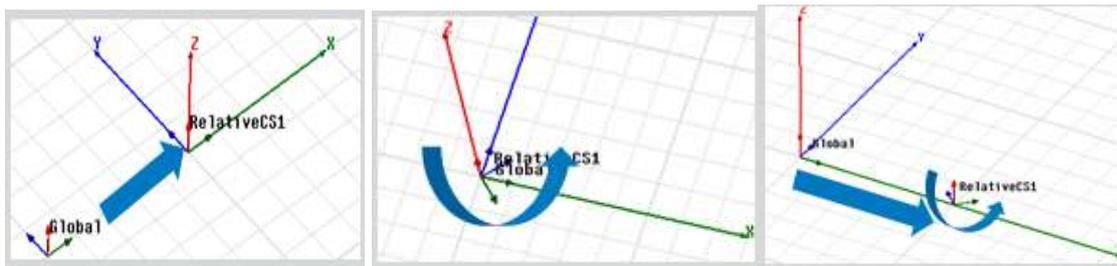


Figure 2.10 Géométrie UI Operations

- **Geometry Coordinate :**

- Un CS relatif peut être créé à partir de l'élément de menu **Modeler** → **Coordinate** → **System** → **Create** → **Relative CS**



a- décalage

b-tourné

c-décalage et tourné

Figure 2.11 Création de coordonnées de systèmes

- **Face Coordinate Systems :**

- Visage de CS peut être créé à partir de l'élément de menu **Modeler** → **Coordinate System** → **Create** → **FaceCS**

- **Object Coordinate Systems :**

- L'objet de CS peut être créé à partir de l'élément de menu **Modeler** → **Coordinate System** → **Create** → **Object CS**

- **Geometry Creation :**

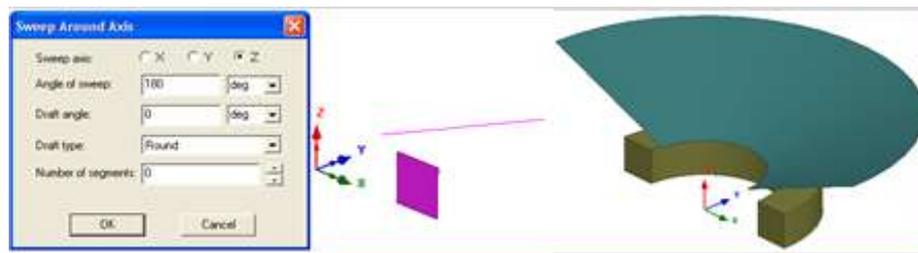
- Les entités géométriques peuvent être créées à l'aide de primitives dans la barre de menus **Draw**

	Inputs	
Line Objects	Line	Start and End Points
	Spline	Start, intermediate and end points
	Arc	Coordinates of Three points of arc or Center and two end points
	Equation Based Curve	X, Y, Z Coordinates as a function of the variable " _t"
Sheet Objects	Rectangle	Coordinates of two diagonal points
	Ellipse	Coordinates of center and major, minor radius
	Circle	Coordinates of center and Radius
	Regular Polygon	Coordinates of center, Radius and Number of sides
	Equation Based Surface	X, Y, Z coordinates as a function of the variable " _u" and " _v"
Solid Objects	Box	Coordinates of two diagonal points of base and height
	Cylinder	Coordinates of center of base and radius
	Regular Polyhedron	Coordinates of center of base, radius and number of segments
	Cone	Coordinates of center of Base, lower and higher radius and height
	Sphere	Coordinates of center and radius
	Torus	Coordinates of Center, Inner and Outer radius
	Helix	Sheet defining cross section, helix vector, pitch and turns
	Spiral	Sheet defining cross section, spiral vector, radius change and turns

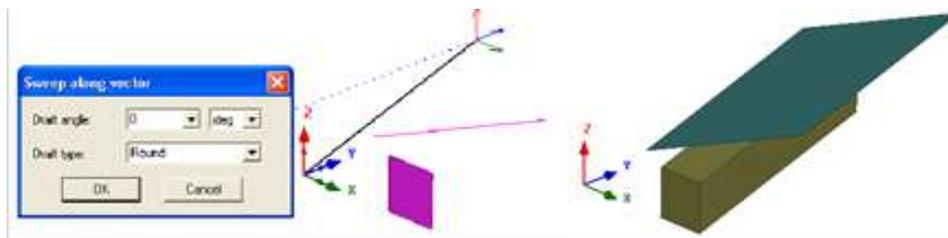
Figure 2.12 Création de géométrie à partir de primitives

- **Geometry Operations :**

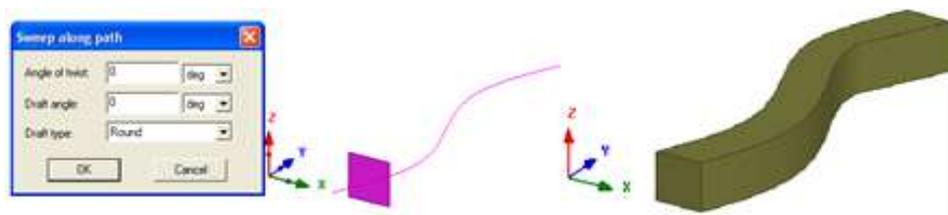
La commande de balayage est accessible à partir de l'élément de menu **Draw** → **Sweep**



a-Balayage autour de l'axe



b-Balayage le long du vecteur



c-Balayage le long du chemin

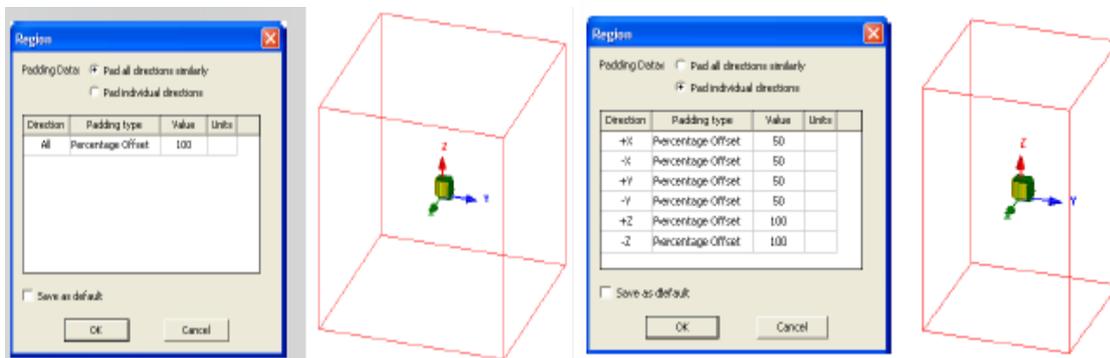
Figure 2.13 Commande de balayage

- La commande de **balayage autour de l'axe** c'est pour Détails de la feuille de profil ou du corps de ligne, de l'axe X, Y ou Z du CS actif, de l'angle de balayage et du brouillon, si nécessaire.

- La commande de **balayage le long du vecteur** Détails de la feuille de profil ou du corps de ligne, du vecteur de balayage et de l'ébauche, au besoin.
- La commande de **balayage le long du chemin** Détails du corps de la feuille de profil ou de la ligne, du corps de la ligne de cheminement, de la torsion et de l'ébauche, au besoin.

#### - Simulation Region :

- La région de simulation devrait contenir complètement la géométrie (à moins que la géométrie partielle ne soit résolue) et devrait avoir un dégagement suffisant par rapport au géomètre pour ne pas affecter le champ de solution.
- Une commande dédiée est fournie pour dessiner la région en fonction de la taille de la boîte de délimitation de la géométrie sous **Draw**→**Region**



a- Rembourrage en tous sens

b- Rembourrage dans chaque sens

Figure 2.14 Création d'une région de simulation

### 2.6.6 Maxwell maillage

Pour obtenir un calcul précis de la force, nous avons besoin d'un maillage particulier très fine de chaque milieu. Il est également judicieux d'utiliser un maillage fin dans l'aimant et son noyau de fer, car cela le calcul du champ magnétique sera plus exact [15].

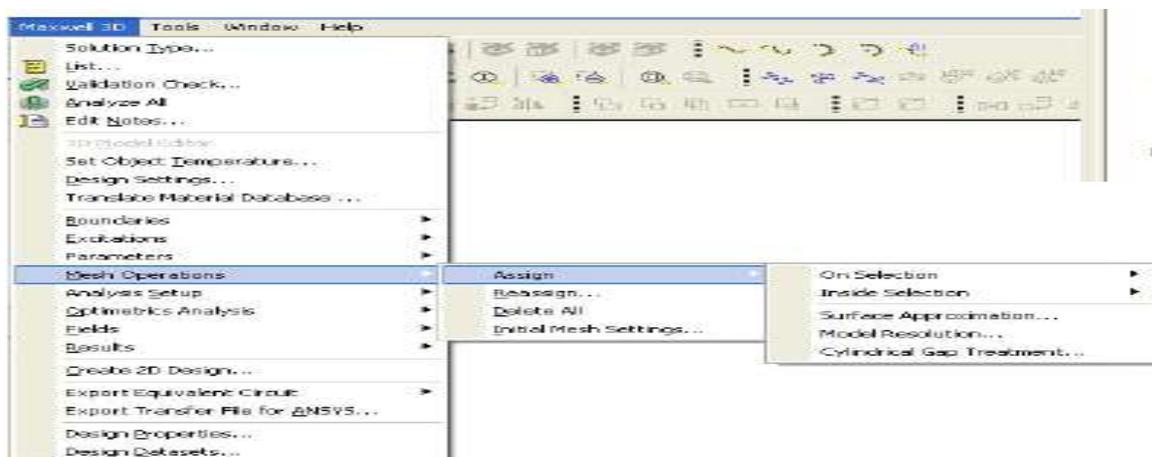


Figure 2.15 Sélection de Maillage

- Cliquez-gauche sur la fenêtre **Maxwell 3D**, **Sélectionner Mesh Operation** et puis **Assign** et choisissez le type des opérations de maillage.
  - **Types d'opérations de maillage :**
    - Sur la sélection / Longueur
    - Sur sélection / Profondeur de peau
    - Sélection interne / Basé sur la longueur
    - Approximation de surface
    - Résolution du modèle
    - Traitement de l'écart cylindrique

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les modèles mathématiques qui régissent les phénomènes impliqués dans la physique de la séparation magnétique. Nous avons examiné en détail le phénomène magnétique résultant de l'application d'un champ magnétique, ainsi que la réaction des particules à séparer, nous avons utilisé la méthode des éléments finis en 3D par l'exploitation du Maxwell Ansys pour résoudre le modèle d'un séparateur.

# Chapitre 3

### 3.1 Introduction

Dans cette étude, nous nous concentrerons sur l'utilisation de la simulation pour analyser et optimiser les performances d'un séparateur à disque magnétique. Nous examinerons les principes fondamentaux de la séparation magnétique, les paramètres clés à prendre en compte et les résultats obtenus à l'aide de la simulation. Ces informations nous permettront de mieux comprendre le fonctionnement des séparateurs à disque magnétique et d'améliorer le taux de séparation avec une efficacité supérieure.

## 3.2 Structure du modèle Dans l'ANSYS

### 3.2.1 Géométrie du modelé

#### 3.2.1.1 Disque

Nous avons la figure 3.1 ci-dessous représentant la structure de notre disque magnétique de métaux ( en acier) contient 36 aimant permanent et d'épaisseur = 5 (mm) et de rayon = 125 (mm), ainsi le diamètre = 250 (mm).

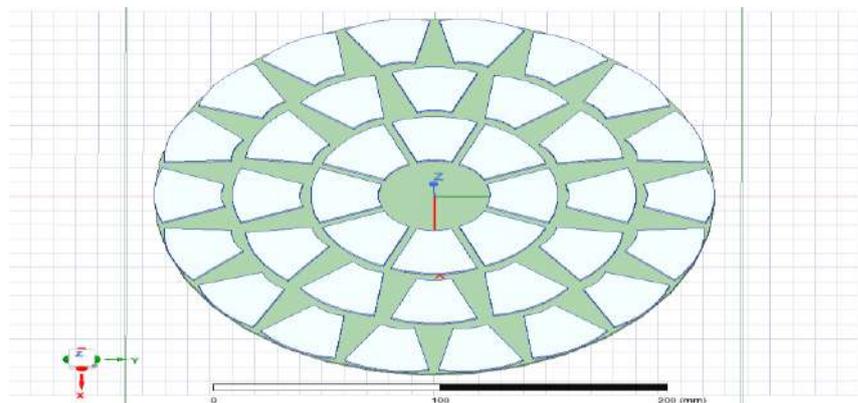


Figure 3.1 Structure du disque

#### 3.2.1.2 Aimant permanent

Le figure 3.2 ci-dessous illustrant la forme de notre Type d'aimant (NdFeB) le rayon extérieur=50 (mm) et l'intérieur = 20 (mm) avec un angle =45°.

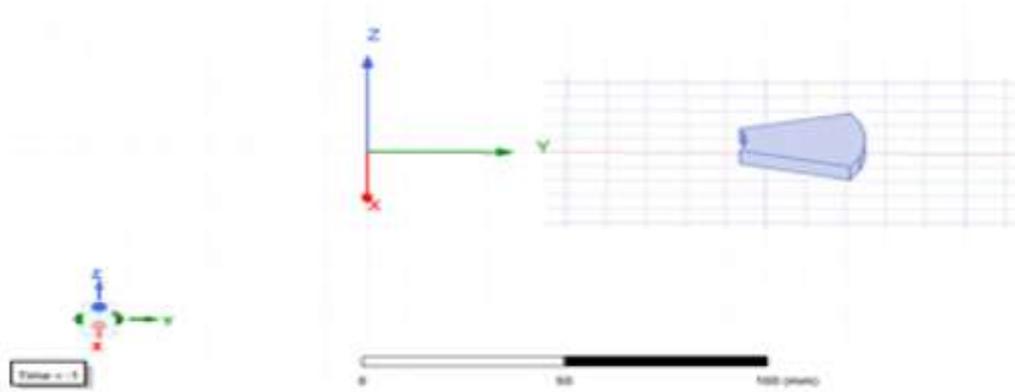


Figure 3.2 Structure de l'aimant permanent

### 3.3 Implémentation du modèle par les élément finis

La densité de flux magnétique dans le maillage sur ANSYS est une mesure de la répartition du champ magnétique à travers le modèle discrétisé. Lorsque vous effectuez une simulation électromagnétique dans ANSYS, le maillage est utilisé pour représenter la géométrie du modèle sous forme d'éléments finis. Chaque élément fini a des caractéristiques magnétiques attribuées, telles que la perméabilité magnétique relative et la conductivité électrique [19].

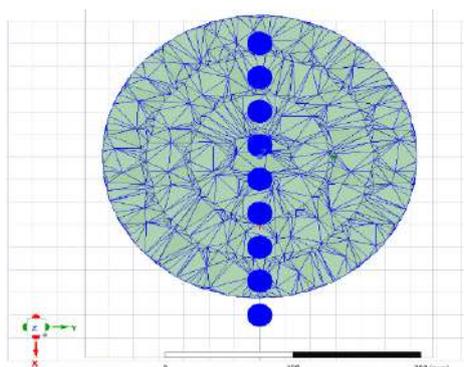


Figure 3.3 Maillage du modèle sur l'ANSYS

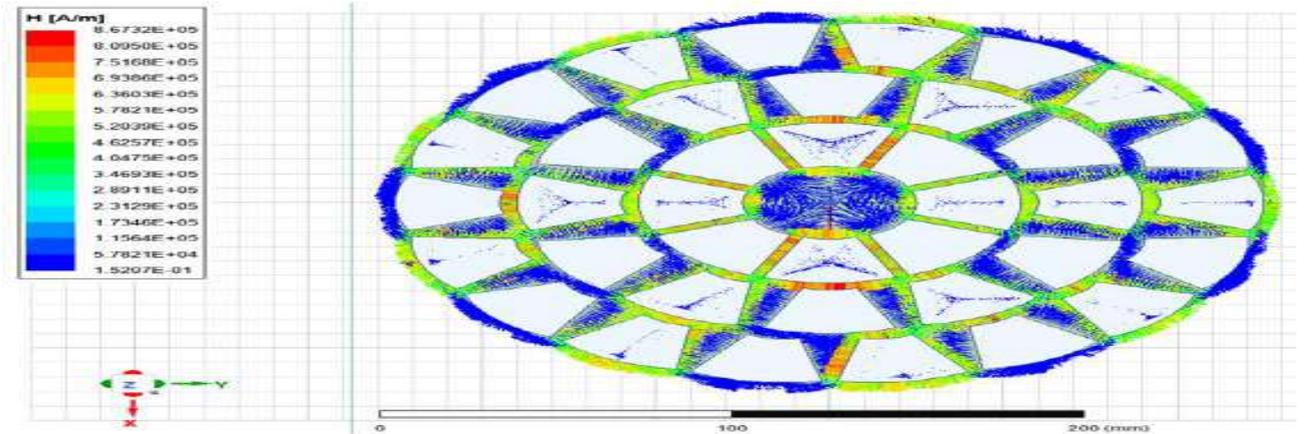
### 3.4 Résultats de simulation

Les résultats de simulation du type de séparateur (conception de la forme et du nombre  $n$  d'aimants, paires de pôles) avec des aimants permanents de polarité différente sont présentés. Les lignes de distribution magnétique autour du dispositif représentent l'interaction entre les polarités des aimants permanents et ont été étudiées numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis avec le logiciel maxwell ANSYS.

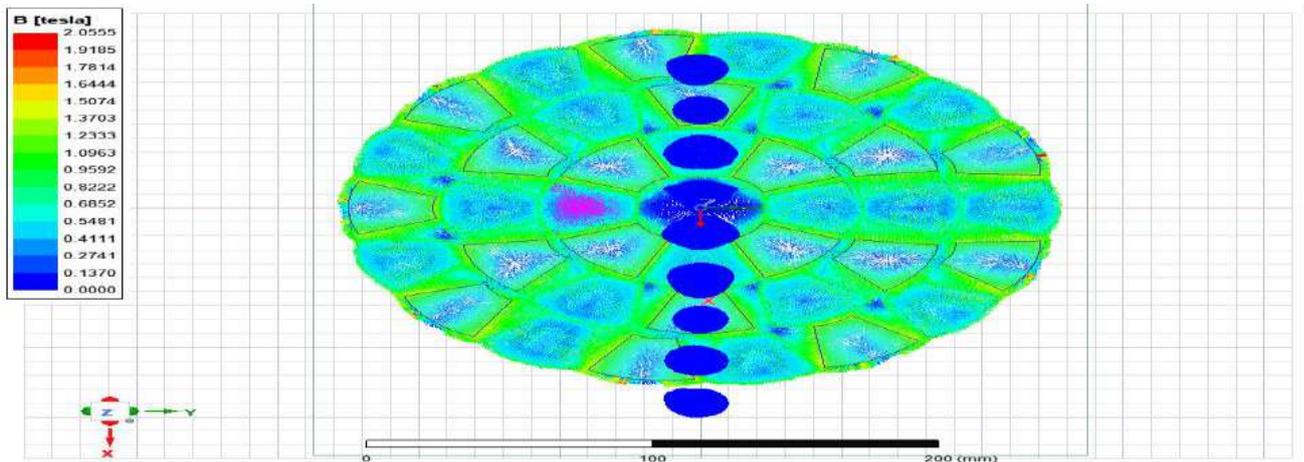
#### 3.4.1 Modèle Magnétostatique

La magnétostatique dans ANSYS fait référence à l'analyse et à la modélisation du comportement électromagnétique des systèmes dans des conditions stationnaires, c'est-à-dire

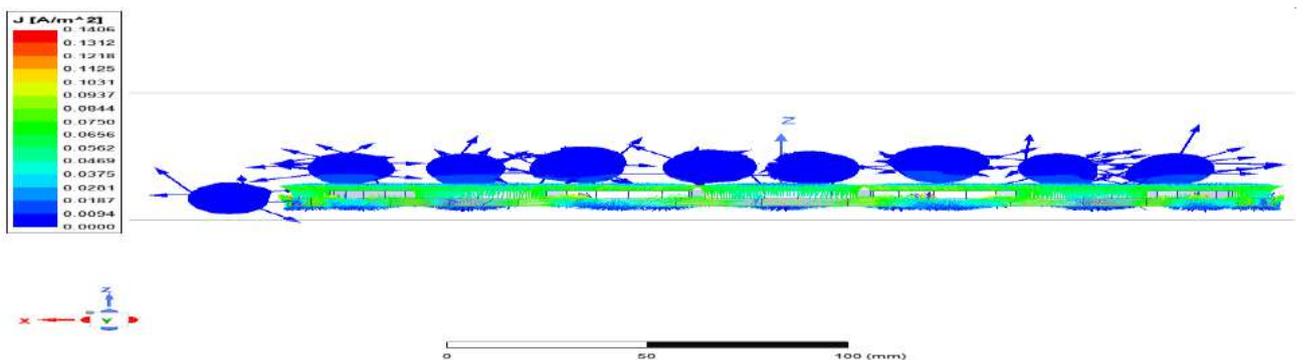
lorsque les champs magnétiques ne varient pas dans le temps. Cela comprend l'étude des champs magnétiques, des forces magnétiques et des propriétés magnétiques des matériaux [22,23].



a- champ d'excitation magnétique



b-Densité de flux magnétique



c-Densité de courant magnétique

Figure 3.4 Caractéristiques magnétiques sur la magnétostatique

La Figure 3.4 présente la distribution du potentiel de champ d'excitation magnétique, de la densité de flux magnétique et de la densité de courant magnétique lors du fonctionnement statique du disque magnétique. On peut remarquer une concentration élevée autour des aimants

permanents placés dans le disque ainsi on peut remarquer une faible concentration magnétique autour la particule Et c'est à revoir à l'absence de champ tournant.

### 3.4.2 Modèle Magnétodynamique

#### 3.4.2.1 Essais Magnétodynamique

La magnétodynamique dans ANSYS fait référence à l'analyse et à la modélisation du comportement électromagnétique des systèmes. Cela comprend l'étude des champs magnétiques, des forces magnétiques, des courants induits et d'autres phénomènes liés à l'interaction entre les champs magnétiques et la particule ou les composants électriques [24,25]

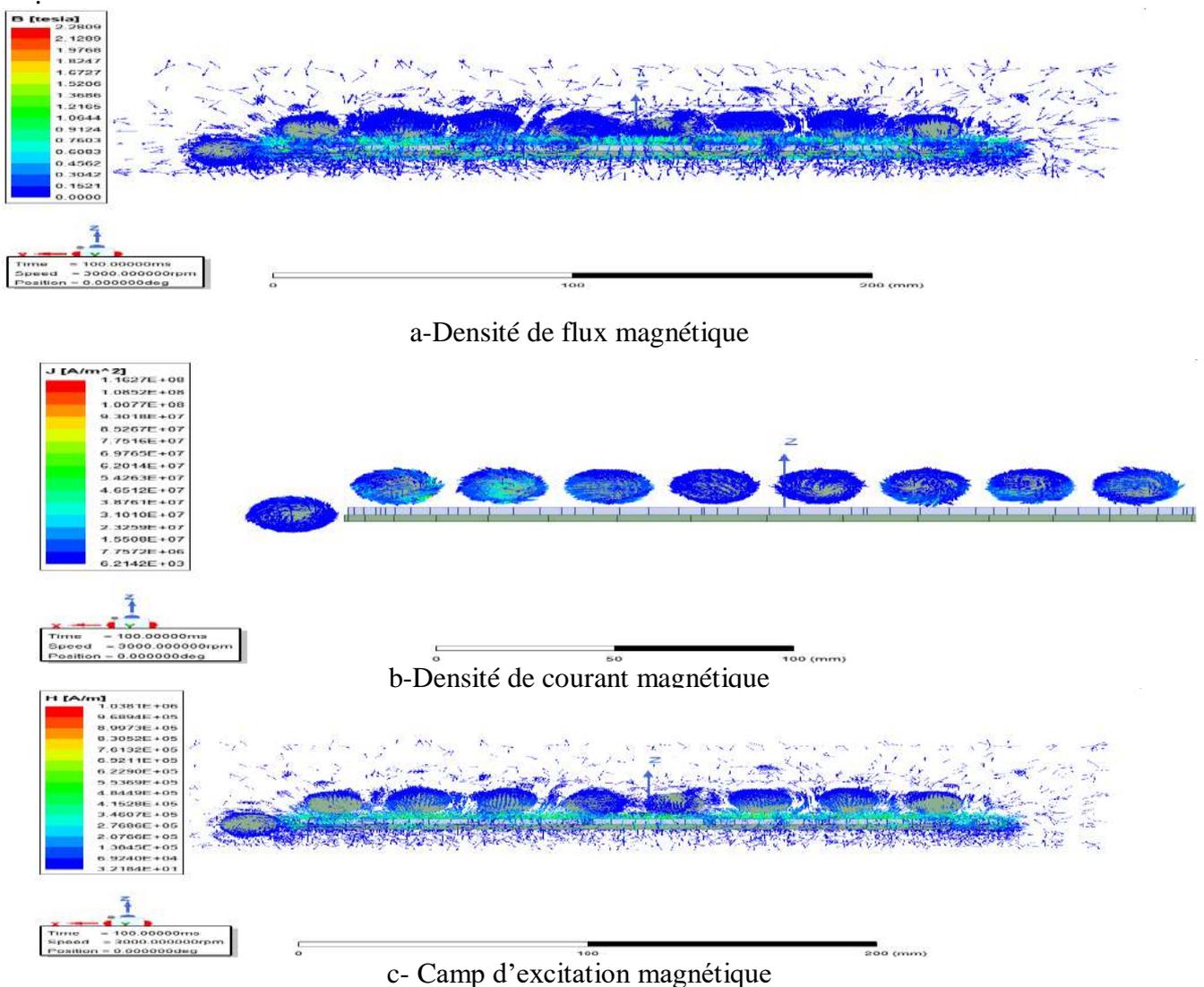


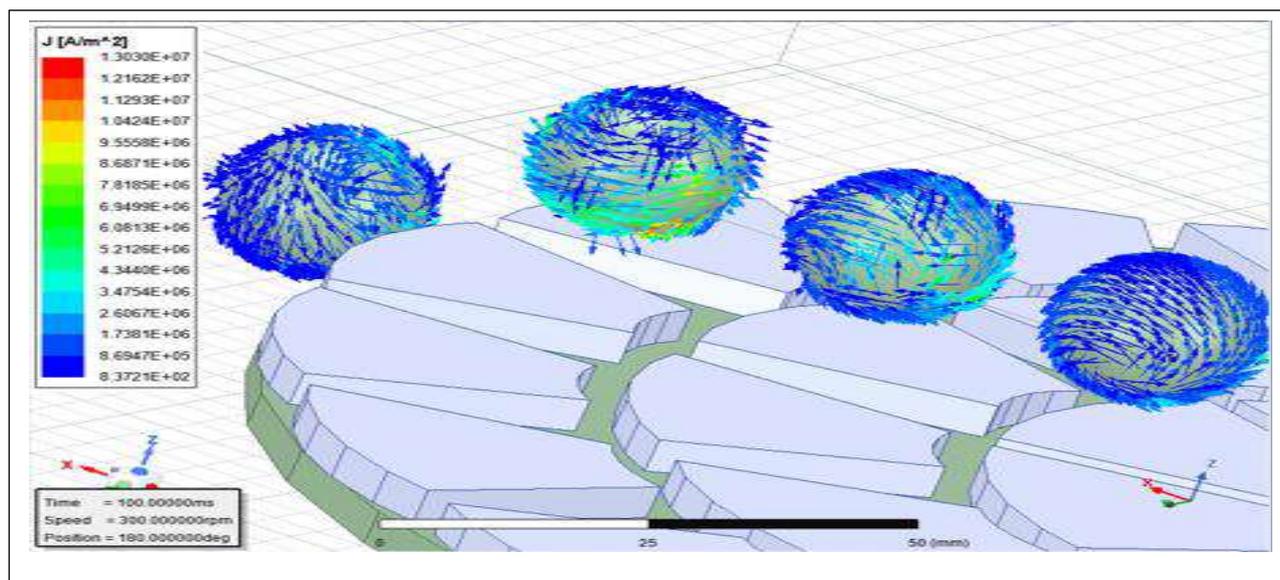
Figure 3.5 Caractéristiques magnétiques sur le magnétodynamique

La figure 3.5 représente la distribution du potentiel de champ d'excitation magnétique, la densité de flux magnétique et la densité de courant magnétique s'approchent du disque magnétique en état dynamique. Ce résultat montre une concentration élevée autour des aimants

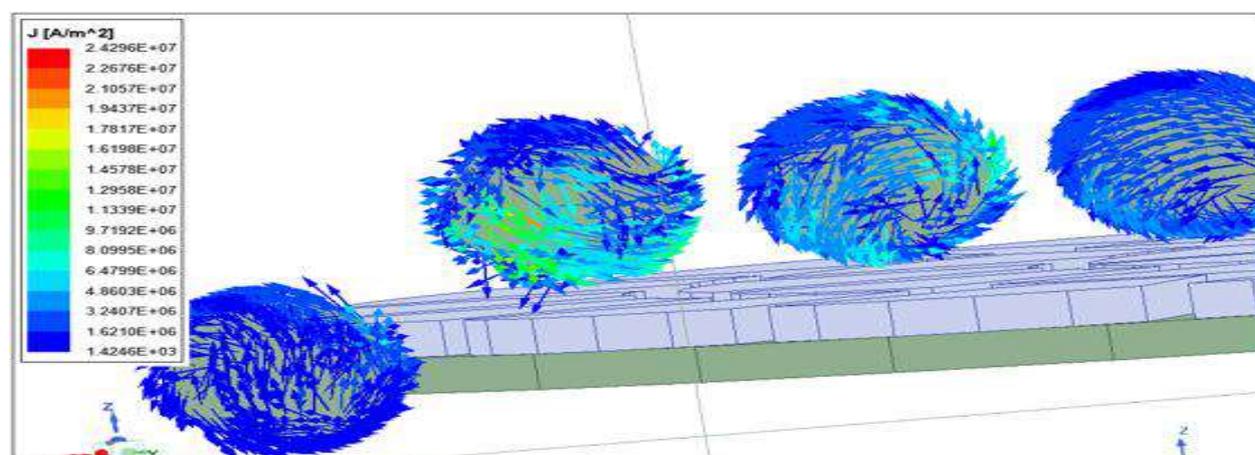
permanents placés dans le disque vertical, cette distribution devient de petites proportions s'éloignant du séparateur.

### 3.4.2.2 Mesure densité du courant magnétique

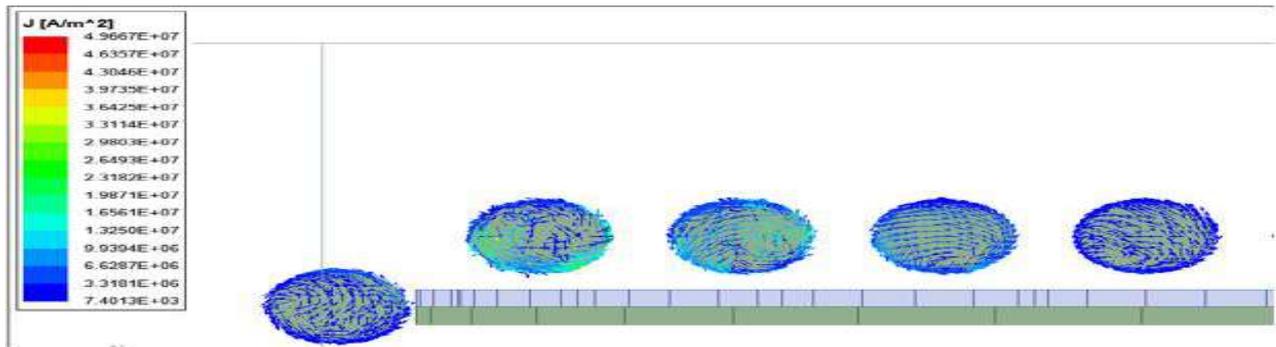
La figure 3.6 montre Les lignes de distribution magnétique de la densité de courant  $J(A/m^2)$  autour nous particule représentent l'interaction entre le champ magnétique crée par le disque et le courant de Foucault circulaire dans la particule.



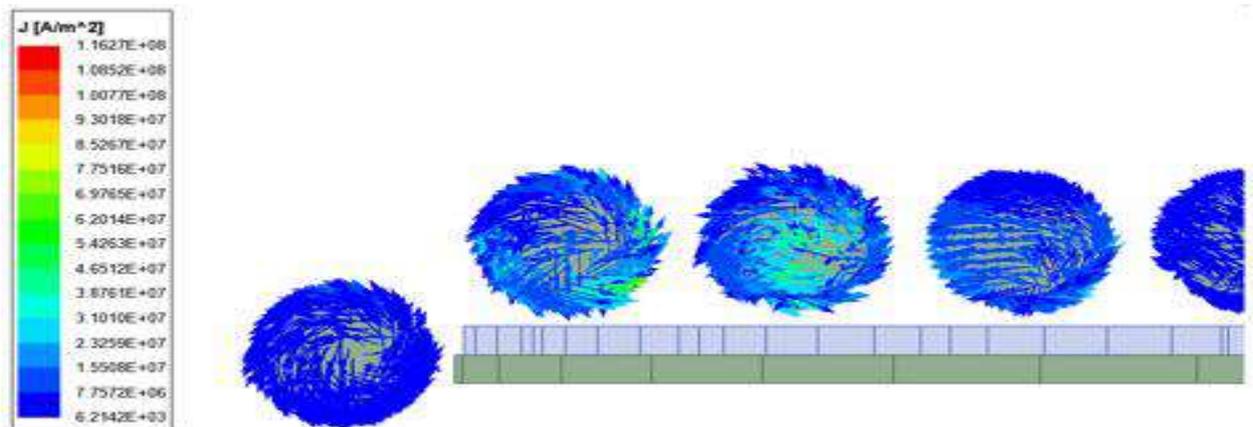
a-



b-



c-



d-

Figure 3.6 distribution de densité de courant autour les particules (a-) cas de vitesse 300(tr/min), (b-) cas de 600,(c-),cas de 1200(tr/min),(d-) cas de 3000(tr/min)

La Figure 3.6 montre que quand la vitesse de rotation d'un séparateur à disque magnétique est augmentée dans une simulation, on observe généralement une augmentation de la densité de courant magnétique. Cela est dû à l'effet de la variation de la vitesse de rotation qui influe directement sur la fréquence et le forme du champ magnétique.

### 3.4.2.3 Mesure de Force de Lorentz sur différente position des particules

Dans un séparateur magnétique, la force appliquée sur une particule conductrice dépend de ses caractéristiques magnétiques et des conditions du champ magnétique environnant selon taille, la vitesse et les propriétés magnétiques de la particule.

Le champ magnétique alternatif initial du séparateur induit un second champ magnétique opposé dans les particules non ferreuses. Ce phénomène d'induction électromagnétique est basé sur la loi de Faraday.

Pour étudier l'effet de la vitesse de rotation du disque sur l'augmentation de la force de Lorentz, nous avons établi différentes vitesses de rotation et de position (voir figure 3.7) des particules. Les résultats trouvés sont montrés dans la Figure 3.8 et le tableau 3.1 :

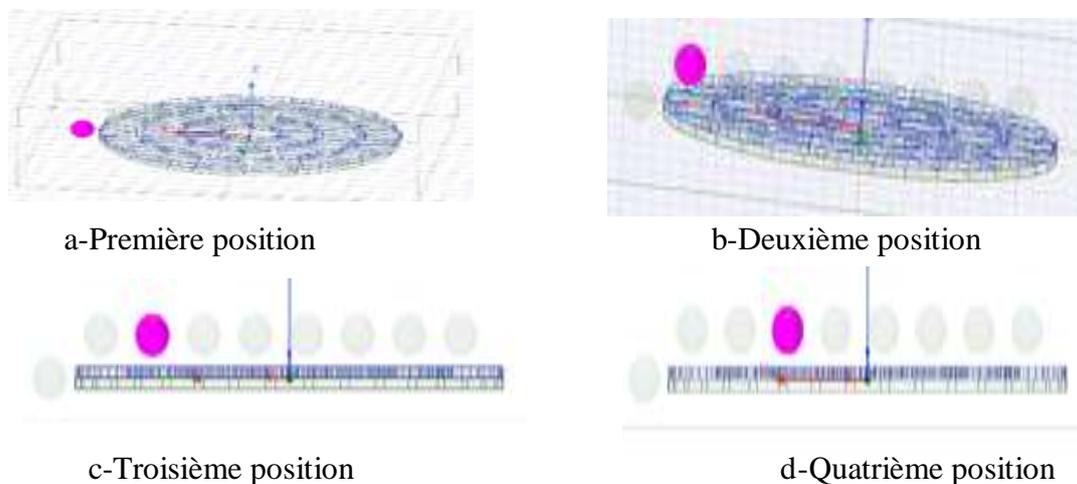
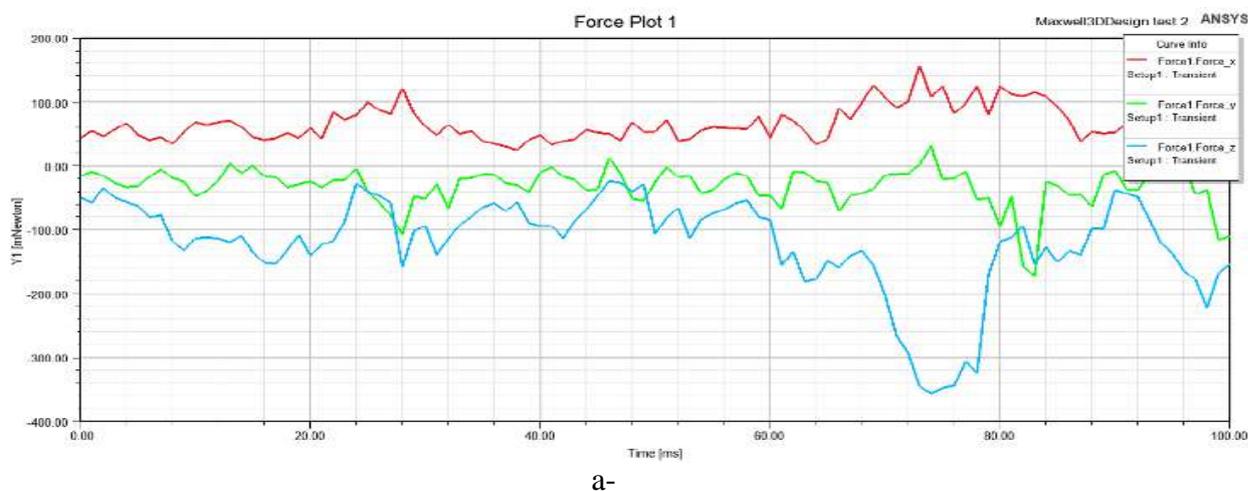


Figure 3.7 Différente position de particule

- Première position :
- Pour une vitesse [300/600/1200/3000 (tr/min)]:



a-

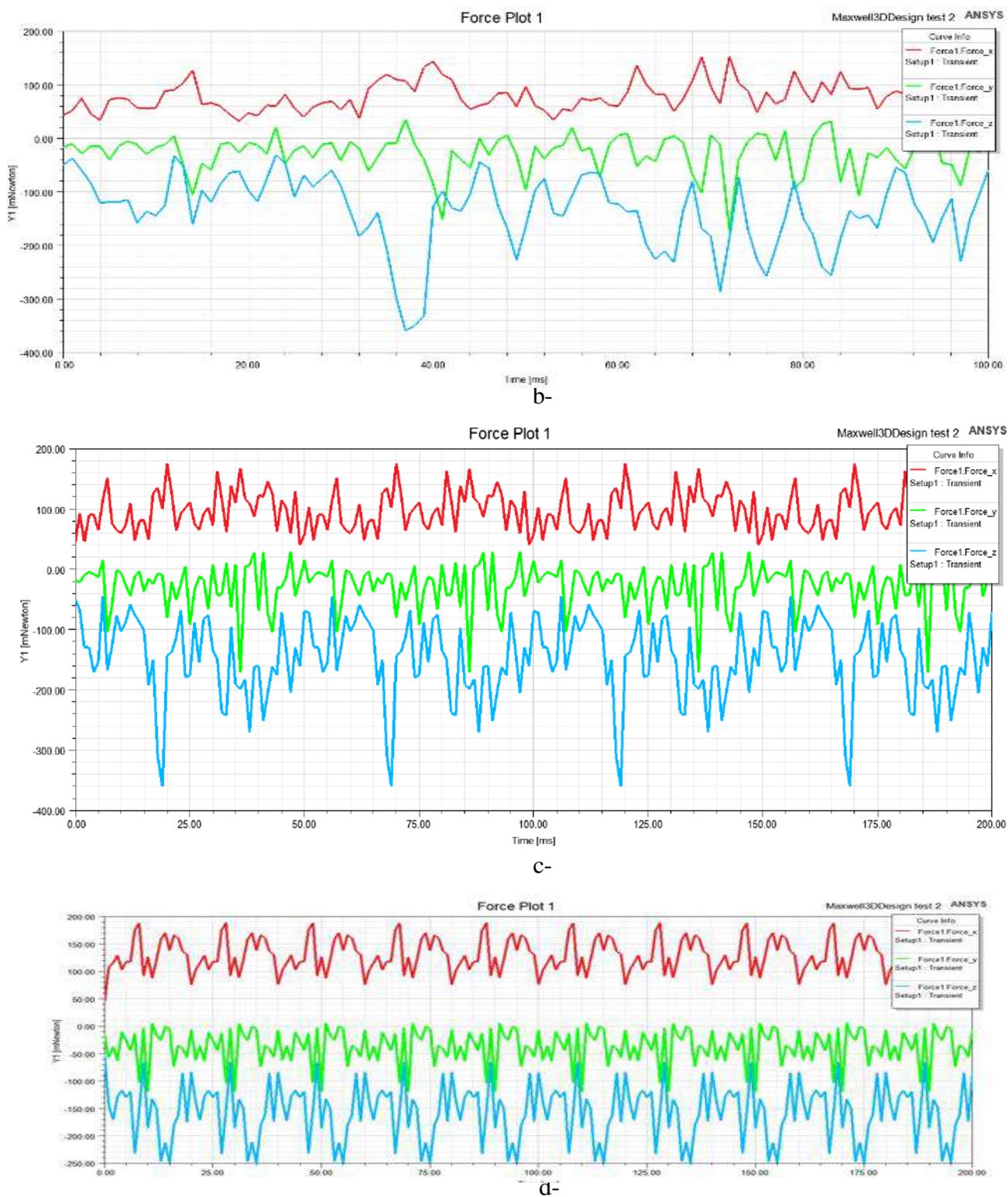


Figure 3.8 Variation de force en fonction du temps au première position, (a-) cas de 300 (tr/min) , (b-) cas de 600 (tr/min),(c-) cas de 1200(tr/min),(d-) cas de 3000 (tr/min)

• **Deuxième, Troisième et quatrième position :**

**Pour une vitesse de 300 (tr/min) :**

Position	Les Axes	Force de Lorentz
Deuxième Position	x	0.625
	y	3.00
	z	2.75
Troisième position	x	0.80
	y	1.08
	z	0.84
Quatrième position	x	1.25
	y	1.62
	z	1.35

a-

**Pour une vitesse de 600 (tr/min) :**

Position	Les Axes	Force de Lorentz
Deuxième Position	x	3.40
	y	4.00
	z	2.70
Troisième position	x	0.60
	y	1.10
	z	0.90
Quatrième position	x	1.70
	y	1.75
	z	1.60

b-

**Pour une vitesse de 1200 (tr/min) :**

Position	Les Axes	Force de Lorentz
Deuxième Position	x	1.65
	y	4.00
	z	2.40
Troisième position	x	0.56
	y	0.78
	z	0.76
Quatrième position	x	1.80
	y	1.65
	z	1.35

c-

**Pour une vitesse de 3000 (tr/min) :**

Position	Les Axes	Force de Lorentz
Deuxième Position	x	3.40
	y	3
	z	1.40
Troisième position	x	0.45
	y	0.95
	z	0.75
Quatrième position	x	1.43
	y	1.45
	z	1.60

d-

Tableau 3.1 Variation de force en fonction du temps au (2/3/4) position, (a-) cas de 300 (tr/min), (b-) cas de 600 (tr/min), (c-) cas de 1200(tr/min), (d-) cas de 3000 (tr/min)

Le résultat du Tableau 3.1 représentant les pic point de la force de Lorentz qui a atteint leur courbe sur les trois axes (x'y'z), La figure 3.8 illustre que la force de Lorentz exercée sur la particule conductrice change de manière proportionnelle à la vitesse de rotation du disque magnétique. En d'autres termes, plus la vitesse du disque est élevée, plus la force résultante est importante Cela est dû à l'augmentation de courant de foucault autour la particule conductrice.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vérification à travers une simulation la possibilité de réaliser un séparateur a disque magnétique avec la présence des particules conductrices.

Nous avons également étudié l'influence de la position des particules et la variation de vitesse de disque sur les caractéristiques magnétiques.

Les résultats de simulation numérique de la force de Lorentz expliquent bien le phénomène étudié concernant la position et la vitesse de disque magnétique.

### **Conclusion général**

En conclusion, nous avons exploré les différentes catégories de séparateurs magnétiques et leur caractéristique magnétique et physique ainsi que leur application. Les séparateurs magnétiques mettent en œuvre différentes techniques de séparation en fonction des exigences spécifiques de chaque situation

Nous avons étudié l'impact des différents paramètres sur l'interaction entre le séparateur magnétique et la particule non ferreuse. Parmi ces paramètres, nous avons analysé la vitesse de rotation, la position des particules. Pour cette étude, nous avons utilisé le logiciel Maxwell Ansys, spécialisé dans la modélisation magnétodynamique. Grâce à cette approche, nous avons pu examiner de manière approfondie les effets de ces paramètres sur le processus de séparation magnétique

Les résultats de simulation de séparateur plaque magnétique est un dispositif efficace et simple pour séparer les particules conductrices. La force de Lorentz exercée sur la particule conductrice varie proportionnellement à la vitesse de rotation du disque magnétique, ce qui signifie que plus la vitesse du disque est élevée, plus la force de séparation est grande. Ce système offre donc une méthode pratique et efficace pour trier et séparer les particules en fonction de leurs propriétés magnétiques, avec une grande flexibilité et une facilité d'utilisation.

La technique de séparation magnétique peut être utilisée pour trier les différents métaux ferreux et non ferreux à l'aide des techniques différents dans le secteur industriel avec des techniques différents de séparation

## Références

- [1] OUILI Mehdi” Optimisation du Profil de l'Induction Magnétique Pour Application de la Séparation des Particules non Homogènes en Voies Sèche et Humide” Thèse DOCTORAT Université Frères Mentouri Constantine 1 2019.
- [2] Ayad A N I “ Etude et Réalisation d’un séparateur à induction électromagnétique” thesis of PhD university of SIDI-BEL-ABBES May 2017
- [3] Ayad A N E, Kadri N, Krika W, Ayad A, Larouci B ,Bendimred S, Boudjella H. Conception of new separator of aluminum characterized by medium size. 9 th International Zeugma Conference On Scientific Research; February 19-21; Gaziantep, Turkey; 2023.
- [4] Zvi Bekerman “magnetic drums with high performance and extreme robustness“2013
- [5] Gérard GILLET ”Séparation mangétique” 10 nov. 1991
- [6] Mr John Curwen ” Mine et traitement des minéraux voie sèche et voie humide” 4 janvier 2013
- [7] Timothy G. Shuttleworth et Carlos Stipicic”feeder magnetic separators” 2011
- [8] Hrivinuv Ujezd ”Eddy Current Separator ECS / Non-ferrous metals separators” 2014
- [9] Subhankar Bedanta et Oleg Petravic et Wolfgang Kleemann ” Magnetic materials”Chaptre,Supermagnetism 2015, 1-83
- [10] J.M.D. Coey ”Permanent magnet applications”2002.
- [11] Olga Baun et Peter Blümler ” Journal of Magnetism and Magnetic Materials” chapter, Permanent magnet system to guide superparamagnetic particles P 294-304 1/11/2017
- [12] Jean-Marie Le Breton et Luc Lechevall ”les grandes classes de matériaux pour aimants permanents et leurs propriétés”10/05/201
- [13] F Svoboda” Magnetic Techniques for the Treatment of Materials” chapter,
- [14] Review of Magnetic Separation Equipment and Techniques”” P 67-162 Book Springer Netherlands 978-1-4020-2107-7 [https://doi.org/10.1007/1-4020-2107-0\\_2](https://doi.org/10.1007/1-4020-2107-0_2), 2004.
- [15] King Abdullah ”ANSYS Maxwell Training Manual”Chaptre, Introduction to ANSYS Maxwell 2014
- [16] GHERAIRI HAYAT ”Etude et simulation d’un séparateur rotationnel” mémoire de master université Kasdi Merbah 2015
- [17] HAMMOUDI Barakat et HAOUED MOUISSA Abdelouaheb”2D simulation and study of the rotational magnetic separator” master thesis université kasdi merbeh 2022
- [18] TOMASZ G. ZIELIŃSKI "Introduction to Finite Element Method" Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences Warsaw-Poland 2017.
- [19] X. Zheng, N. Guo, R. Cui, D. Lu, X. Li, M. Li and Y. Wang, Magnetic field simulation and experimental tests of special cross-sectional shape matrices for high gradient magnetic separation, IEEE Transactions on Magnetics 53(3) (2017), 1–10
- [20] M. Woltereck, R. Ludwig and W. Michalson, a quantitative analysis of the separation of aluminum cans out of a waste stream based on eddy current induced levitation, IEEE Transactions on Magnetics 33(1) (1997).
- [21] Ayad A N I, Moulay LARAB, Houari boudjella, Farid Benhamida et al. Simulation of eddy current and repulsive force of non-ferrous Particles in eddy current separator. [Przegląd Elektrotechniczny](#). 2019; R. 95 NR 6: 0033-2097.

- [22] Ayad A N I, Ayad A, Ramdani Y, Yann L B. Simulations and experiments on electromagnetic induction separator by excitation variation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2014.8(1): 351-357.
- [23] Ayad A N I, Ayad A, Boudjela H. Electromagnet separator of different Particles. *International Journal of Engineering and Manufacturing*. 2018; 5: 22-31.
- [24] Ayad A N I, Ayad A, Ramdani Y. Simulation of eddy current separation of gold particles from sands. *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*. 2016; 6. (5). 30-37.
- [25] Njeh A, Trabelsi H, Ayad A N E. 3D FEA of the performances of magnetic separator for different drum topologies. *20th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*; February 20-23; Mahdia Tunisia; 2023.

## خلاصة

تستخدم عملية الفصل المغناطيسي لفصل المواد بناءً على استجابتها المغناطيسية. تعتمد هذه العملية على استخدام حقول مغناطيسية لجذب وفصل الجسيمات المغناطيسية عن الجسيمات غير المغناطيسية. قمنا بدراسة ومحاكاة فاصل القرص المغناطيسي في مواضع وسرعات مختلفة. قمنا بإنشاء نموذج واضح في برنامج ، وأظهرت نتائج المحاكاة كثافة التيار والتدفق المغناطيسي والاندماج المغناطيسي وقوة Maxwell ANSYS لورنتز حول الجسيم الموصل.

الكلمات الرئيسية: الفصل المغناطيسي، القرص المغناطيسي، قوة لورنتز، Maxwell ANSYS

## Résumé

La séparation magnétique est un processus utilisé pour séparer les matériaux en fonction de leur réponse magnétique. Elle repose sur l'utilisation de champs magnétiques pour attirer et séparer les particules magnétiques des particules non magnétiques, nous avons étudié et simulé le séparateur à disque magnétique sur différentes position et vitesse. Nous avons modélisé et simulé notre dispositif à travers le logiciel maxwell ANSYS, les résultats de simulation ont montré la densité de courant, de flux, l'induction magnétique ainsi que la force de Lorentz autour une particule conductrice.

Mots clés : maxwell ANSYS, séparation magnétique, disque magnétique force de Lorentz

## Summary

Magnetic separation is a process used to separate materials based on their magnetic response. It relies on the use of magnetic fields to attract and separate magnetic particles from non-magnetic particles. We studied and simulated the magnetic disk separator at different positions and speeds. We used the Maxwell ANSYS model and obtained clear results from the simulation, showing the current density, flux, magnetic induction, and Lorentz force around a conductive particle.

Keywords: Maxwell ANSYS magnetic separation, magnetic disk, Lorentz force.