

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Matériaux électrotechniques

Présenté par :

GHERAIRI hayat

Thème:

Etude et simulation d'un séparateur rotationnel

Soutenu publiquement

Le 09/06/2015.

Devant le jury :

M^r.BEN ALIA khaled

MC (B)

Président

UKM Ouargla

M^r.AYAD ahmed nour el islam

MA (B)

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^{me}. NACEUR Sonia

MA (A)

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2014/2015

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

, mon très cher père 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(Ayad Ahmed Nour Islam), pour m'avoir constamment guidé tout long de mon projet et pour les précieux conseil qu'il m'ont donné, et pour leur serviabilité, leur disponibilité et leur conseil constructif.

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 générale.....	01
Chapitre I: Généralités sur les aimants permanents	
I-1 Introduction.....	03
I-2 Les aimants permanents	03
I-3 Structure à aimants permanents	04
I-4 Propriétés générales des aimant permanents.....	06
I-4-1 Le point de fonctionnement	08
I-4-2 Schéma magnétique équivalent	08
I-4-3 Energie magnétique.....	09
I-4-4 Démagnétisation.....	09
I-5 Les différentes familles des aimants permanents.....	09
I-6 Les applications des aimants permanents.....	11
I-6-1 Les machines synchrones à aimants permanent.....	11
I-6-1-1 Alimentation des machines électriques à aimants permanents.....	11
I-6-1-1-1 Les moteurs BDCM.....	11
I-6-1-1-2 Les moteurs PMSM.....	12
I-6-1-2 Différentes applications	12
I-6-1-2-1 Moteur à rotor intérieur.....	13
I-6-1-2-2 Moteur à rotor extérieur.....	13
I-6-1-2-3 Moteur à entrefer axial	14
I-6-1-3 Les Les rotors des machines aimants permanent	15
I-6-1-3-1 Aimants en surface.....	15
I-6-1-3-2 Aimants insérés.....	16
I-6-1-3-3 Aimants enterrés.....	16
I-6-1-3-4 Aimants à concentration de flux.....	16
I-6-2 Moteurs à courant continu.....	16
I- 6-3 Haut-parleurs.....	18
I-6-4 Séparateur magnétique	19
I-6-4-1 Principe de fonctionnement.....	20

I-6-4 -2 Différents types de séparateurs magnétiques	20
I-7 conclusion	24
Chapitre II: Modélisation d'un aimant permanent	
II-1 Introduction.	25
II-2 Maillage d'un aimant permanent rectangulaire.....	25
II-3- Principe de la méthode des éléments finis.....	25
II-3-1 Types d'éléments finis.....	26
II-4 Magnétostatique.	26
II-5 Formulations des équations d'électromagnétique.	26
II-6 Equation de continuité.....	28
II-7 Formulation du problème électromagnétique	28
II-8 Condition aux limites.....	29
II-9 Condition de transmission	30
II-10 Discrétisation et approximation	30
II-11 Formulation intégrale.....	32
II-12 Principes des sources équivalentes.....	33
II-12-1 Calcul du champ magnétique dû à un volume aimanté en un point extérieur à l'aimant.....	33
II-13 Le calcul des forces magnétiques.....	35
II-13-2 Calcul des forces dans le cas d'un matériau magnétique.....	35
II-14 Conclusion	38
Chapitre III: Initiation sur le COMSOL	
III -1 Introduction.....	39
III-2 Présentation du logiciel COMSOL	39
III-3 L'interface de COMOSOL.....	39
III-3-1 Le modèle builder(construction).....	39
III-3-2 Déclaration des paramètres physiques.....	40
III-3-3 Représentation de la géométrie.....	40
III-3-4 Messages et résultats physiques.....	40
III-4 Création d'un modèle de géométrie 2D aimant permanent	41
III-4-1 la construction de la géométrie.....	41
III-4-2 les matériaux.....	43
III-5 le champs magnétiques courant nul(mfnc).....	43

III-6 le Maillage.....	45
III-7 Le choix du domaine étude.....	46
III-8 Calcul des paramètres magnétiques et mécaniques	46
III-8-1 Paramètres magnétiques	46
III-8-2 Paramètres électromécaniques.....	47
III-9 Affichage les résultats.....	47
III-10 Conclusion.....	48
Chapitre IV: Simulation et analyse des résultat d'un Séparateur rotationnel	
IV-1 Introduction.....	49
IV-2 Structure du programme.....	49
IV-3 Aimant permanent	50
IV-4 Aimant permanent de forme U.....	51
IV-5 Présence d'une particule ferreuses proche d'un aimant permanent.....	52
IV-5-2 Variation de la distance de la particule selon l'axe X.....	52
IV-5-2 Variation de la taille des particules ferreuses.....	53
IV-6 Le calcul de la force magnétique exercée sur une particule ferreuse.....	54
IV-7 Simulation du séparateur magnétique.....	56
IV-7-1 Séparateur rotationnel a aimant permanent.....	56
IV-8 Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59
Référence	60

Liste de figure

Chapitre I: Généralités sur les aimants permanents

Figure I.1: Interactions mutuelles de deux aimants.....	03
Figure I.2: Aimant Watson.....	04
Figure I.3: Structure des aimants permanents avec des pièces polaires	05
Figure I.4 : Structure des aimants permanents annulaire.....	06
Figure I.5: Structure des aimants permanents prismatiques et Zhou.	06
Figure I.6: Courbe de désaimantation.....	07
Figure I.7: Les caractéristiques des aimants permanents.....	08
Figure I.8 :Courbe B (H) des différents types des aimants permanents.....	09
Figure I.9: Moteur à aimants en géométries cylindriques.....	11
Figure I.10: Le courant de phase et la f.e.m d'un moteur BDCM à 4 pôles.	12
Figure I.11: Moteur à rotor intérieur et extérieur.	13
Figure I.12: Vue d'une machine à flux axial (différentes configurations)	14
Figure I.13:Différents structures des rotors des MSAP.....	15
Figure I.14 : Moteurs à courant continu avec un stator à aimants.....	17
Figure I.15 :Un circuit magnétique comportant un aimant, un matériau doux et un entre fer.....	18
Figure I.16: Structure haut-parleur.....	18
Figure I.17 : Chaine de séparation magnétique	19
Figure I.18 : Principe de fonctionnement de séparateur.....	20
Figure I.19 : Blocs magnétiques.....	21
Figure I.20: Aimants pour band supérieure.....	21
Figure I.21: Tambour à Aimant permanent	22
Figure I.22 : Séparateur non ferreux (Eddy Current)	22
Figure I.23: Séparateurs d'un haut gradient.....	22
Figure 1.24 :Le détecteur de métaux.....	23

Chapitre II: Modélisation d'un aimant permanent

Figure II.1 maillage d'un aimant permanent.....	25
Figure II.1 :Eléments classiques en une et deux dimensions.....	26
Figure. II.2 :Interface entre deux milieux différents.....	30
Figure II.3: Elément triangulaire.	31

Figure II.4 :Notations utilisées pour le calcul du champ magnétique.....	33
--	----

Chapitre III: Initiation sur le COMSOL

Figure III.1 : L'interface de COMSOL4.3.....	40
Figure III.2 : Construction de la structure du modèle de base	41
Figure III.3 : La géométrie	41
Figure III.4 :Déclaration des dimensions	42
Figure III.5 : La géométrie a trois parties	42
Figure III.6 :Ouverture du navigateur matériaux.....	43
Figure III.7 :Navigateur de matières.....	43
Figure III.8 : Déclaration de la conservation du flux.....	43
Figure III.9 : Le choix de l'isolation magnétique.....	44
Figure III.10: La valeur initiale du milieu.....	44
Figure III.11 : Déclaration de l'induction magnétique des aimants permanents.	45
Figure III.12 : Présence d'une particule proche de l'aimant permanent	46
Figure III.13: Messages et résultats.	47
Figure III.14: L'induction magnétique.	47
Figure III.15 :Potentiel scalaire magnétique autour de la de la particule ferreuse.	48

Chapitre IV: Simulation et analyse des résultat d'un Séparateur rotationnel

Figure IV.1 : Différents blocs du programme.....	49
Figure IV.2 : Polarisation des aimant permanents selon X etY	50
Figure IV. 3 : Potentiel scalaire magnétique en fonction la distance x.....	51
Figure IV.4 : Aimant permanent de forme U.....	51
Figure IV.5 : Variation de la distance X (cm).....	52
Figure IV.6 : Variation du rayon (cm).....	53
Figure IV.7: Force magnétique entre l'aimant permanent et les particules ferreuses.....	54
Figure IV.8 : Force magnétique en fonction de la taille des particules ferreuses.....	55
Figure IV.9 : Variation de l'induction magnétique B (T)	56
Figure IV.10 :Mesure de l'induction magnétique B (T) autour du séparateur	57

Liste de tableau

Chapitre I: Généralités sur les aimants permanents

Tableau I.1 :Les grandes familles d'aimants	10
Tableau I.2 : Différents types de séparateurs magnétiques.....	23

Liste des symboles

Chapitre I: Généralités sur les aimants permanents

B	Induction magnétique.(T)
B_r	Induction magnétique rémanent (T)
H	Champ magnétique ($A.m^{-1}$)
H_c	Champ magnétique coercitif ($A.m^{-1}$)
J	Densité de courant, ($A.m^{-2}$)
M	Aimantation ($A.m^{-1}$)
l_a	Longueur de l'aimant (cm)
S_a	Section de l'aimant (cm^2)
μ_0	Perméabilité magnétique du vide ($H.m^{-1}$)
μ_{rec}	Perméabilité magnétique relative
Θ_a	Potentiel magnétique de l'aimant

Chapitre II: Modélisation les aimants permanents

A	Le potentiel vecteur
B_r	Induction magnétique rémanente (cas d'aimants permanents) (T)
\vec{B}	Induction magnétique (T)
\vec{D}	Induction électrique($C.m^{-2}$)
\vec{E}	Champ électrique($V.m^{-2}$)
\vec{F}_s	La force surfacique
F	La force totale
g_0	Une constante
\vec{H}	Champ magnétique ($A.m^{-1}$)
\vec{j}	Densité de courant, ($A.m^{-2}$)
J_e	Un courant de densité volumique
\vec{j}_s	Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation($A.m^{-2}$)
K_e	La densité de courant surfacique
S^+	La surface S coté extérieur,
S^-	La surface S coté intérieur
$[T]^+$	Tenseur calculé à l'extérieur,
$[T]^-$	Tenseur calculé à l'intérieur.

ρ	Charge volumique ($C.m^{-3}$)
$\frac{d\vec{D}}{dt}$	Densité de courant déplacement($A.m^{-2}$)
μ_0	Perméabilité magnétique du vide ($H.m^{-1}$)
μ_r	Perméabilité magnétique relative du milieu
μ	Perméabilité magnétique absolue ($H.m^{-1}$)
ε_0	Permittivité électrique du vide ($F.m^{-1}$)
ε_r	Permittivité électrique relative du milieu
ε	Permittivité électrique absolue($F.m^{-1}$)
σ	Conductivité électrique ($S.m^{-1}$)

Introduction générale

L'évolution de la technologie et des besoins industriels et domestiques en plus des contraintes de réduction de la consommation d'énergie ont poussé les industriels à adopter des machines compactes à haut rendement. Parmi ces machines, on situe à très bonne place les machines à aimants permanents[6].

Grâce à leurs performances, les machines à aimants permanents ont été adoptées dans plusieurs applications avec des structures multiples et généralement complexes de ce fait, il est indispensable de disposer de modèles fiables pour retranscrire leur comportement.

Les diverses complexités rencontrées lors de l'étude des machines électriques (géométries complexes et multiples, non linéarité des circuits magnétiques mis en jeu, phénomènes couplés, mouvement relatif) rend leur étude difficile et l'utilisation de modèles analytiques insuffisant. Le recours aux méthodes numériques est donc indispensable ; l'une des méthodes les plus utilisées est la méthode des éléments finis[6].

Le développement de l'informatique a fourni un outil important dans la résolution des problèmes complexes. En effet les performances accrues des calculateurs, tant au niveau des fréquences d'évaluation que de l'augmentation quasi-exponentielle des tailles de mémoire et de stockage, permettent l'utilisation de modèles numériques de plus en plus sophistiqués traduisant la prise en compte d'un nombre croissant de phénomènes mis en jeu dans le fonctionnement des machines électriques[6].

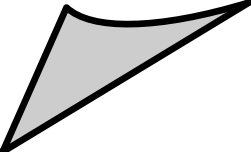
L'analyse des machines électriques du fait qu'elles sont tournantes nécessite la prise en compte du mouvement. Les différentes techniques de prise en compte du mouvement dans la modélisation électromagnétique des machines électriques requièrent un temps de calcul très onéreux ,comme les séparateurs magnétiques rotationnels[6].

La séparation magnétique des minerais a connu un développement industriel rapide dès le début du XX e siècle, avec des séparateurs fonctionnant principalement en voie sèche. C'est seulement dans les années 1960-1970 que la séparation dite à haute intensité (du champ magnétique) a connu les premières applications industrielles de fort tonnage. On procède alors en voie humide, ce qui permet de traiter des particules plus fines qu'en voie sèche. L'exemple le plus notable est celui des séparateurs à carrousel type Jones [11].

Les objectifs fixés à travers ce mémoire est de faire une initiation sur les aimants permanents et le séparateur magnétique. Donc il va être partagé en quatre chapitres :

- Dans le premier 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 abordons la modélisation par les méthode des éléments finis d'un aimant permanent et un séparateur magnétique, l'analyse des phénomènes électromagnétiques qui est basée essentiellement sur l'exploitation des lois de l'électromagnétisme et la résolution des équations de Maxwell est représentée dans le deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre nous allons donnée une brève initiation sur l'utilisation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 4.3.
- Le dernier chapitre sera consacré à l'élaboration d'une simulation des aimants permanents et un séparateur magnétique rotationnel tels que, la représentation d'une particule ferreuse proche de l'aimant, en faisons déplacer notre particule le long de l'axe x afin de calculer la force magnétique en fonction de la distance entre l'aimant et la particule, ainsi que voir l'influence de la variation de la taille d'une particule sur l'amplitude de la force magnétique, afin de représenter ces variations numériques.

Chapitre I :
Généralités sur les aimants
permanents



I-1-Introduction:

Les aimants permanents présentent des performances magnétiques de plus en plus élevées font que ces dernières années des éléments de base dans l'industrie moderne, leurs utilisations dans les machines électriques sont de plus en plus fréquentes grâce à leurs avantages économique et technique.

Les aimants permanents présentent des perspectives d'avenir très favorables dans un certain nombre de domaines industriels.

D'autres secteurs d'activités plus novateurs et en fort développement, tels que l'aéronautique, l'énergie (éolienne), les technologies de l'information, utilisent des aimants de la famille des terres rares, essentiellement Nd-Fe-B. Les autres familles d'aimants (Alnico, Sm-Co), en raison de leurs propriétés spécifiques : Alnico pour des applications telles que la métrologie, et Sm-Co pour des applications à haute température ou en atmosphère agressive.

L'étude des applications des aimants permanents aborde dans a envisager les différentes conversions d'énergie qu'il est possible d'obtenir avec ces aimants.

I-2-Les aimants permanents:

Un aimant est appelé « dipôle magnétique », car il possède deux pôles (nord et sud) et génère un champ magnétique. Il est en outre sensible à l'influence d'un champ magnétique extérieur.

Par convention, on appelle pôle nord, d'un aimant le pôle qui s'oriente vers le nord magnétique terrestre si l'aimant est libre désorienter.

On différencie les deux pôles d'un aimant par leur propriété d'interaction avec un autre aimant. Par exemple : deux pôles identiques se repoussent alors que deux pôles opposés s'attirent.[1]

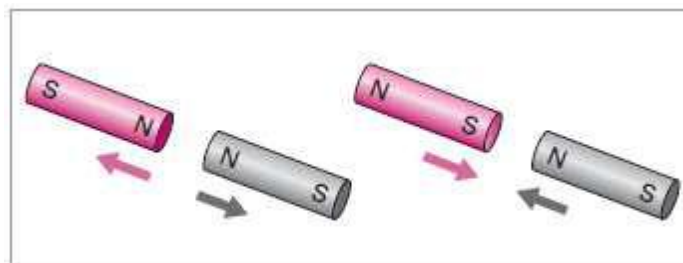


Figure I.1 Interactions mutuelles de deux aimants [1]

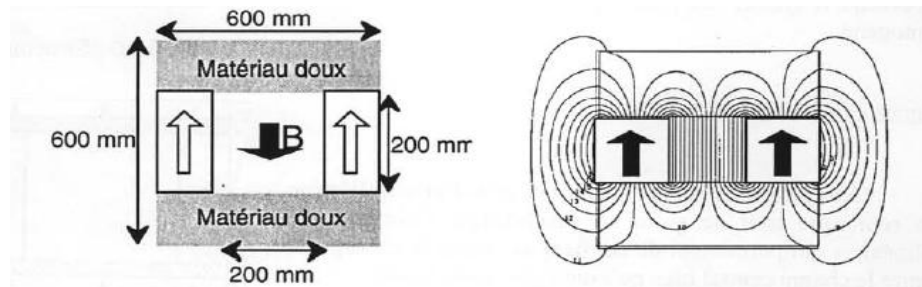
I-3-Structure à aimants permanents:

La plupart des structures existantes ont pour but de créer un champ magnétique homogène.

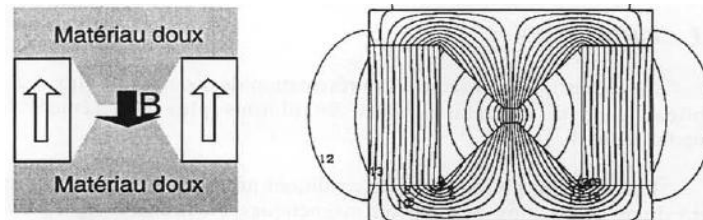
- **Aimant Watson (Richmond 1967).**

Le principe de cette source de flux est simple: les flux des deux aimants sont canalisés par un matériau doux de perméabilité élevée. Cette source de flux est très intéressante car elle produit un champ homogène mais faible dans un espace central important voir la figure I.2.a L'homogénéité de cette source dépend de la perméabilité du matériau doux.

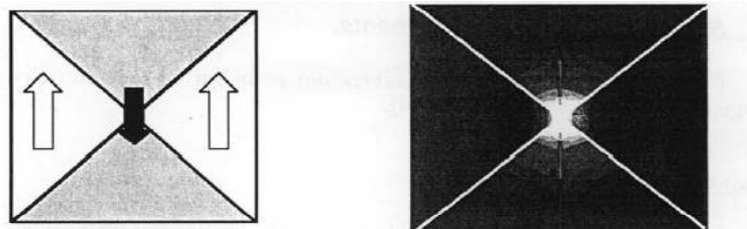
Le plus gros inconvénient, en dehors du faible champ créé, est l'existence de champs de fuite. Dans notre exemple ci-dessous, le champ a une homogénéité de 0,15% et une amplitude de 0,66T, avec des aimants Néodyme-fer-Bore de 1,35T de rémanence, [2]



.a : aimants canalisés dans un espace central important



b: les aimants près de la zone centrale



c: les aimants près de la zone centrale

Figure I.2 Aimant Watson.

Une variante de cette structure est de donner aux culasses la forme de pièces polaires afin de concentrer le flux, jusqu'à la saturation du matériau. On obtient donc des champs plus élevés, mais dans un plus petit volume. Cependant, il est impossible d'obtenir des champs très

supérieurs à la saturation du matériau doux (2,3 Tesla pour le Fer-Cobalt) car il faut un volume d'aimant important pour créer le champ, voir la figure I.2.b.

Une troisième variante suivant la même conception consiste à rapprocher les aimants près de la zone centrale. Cette structure théoriquement permet d'atteindre un champ central de près de 4 T, mais en imposant un très fort champ démagnétisant dans les aimants voir la figure I.2.c [2]

- **Aimant Molfino (1988) .**

Il s'agit d'une structure dont le principe est très proche de l'aimant Watson. Mais cette structure corrige un des inconvénients car le flux est presque entièrement confiné en utilisant un matériau doux de forte perméabilité. Par contre, il est nécessaire d'ajuster les pièces polaires pour obtenir un champ de la figure I.3.a [2].

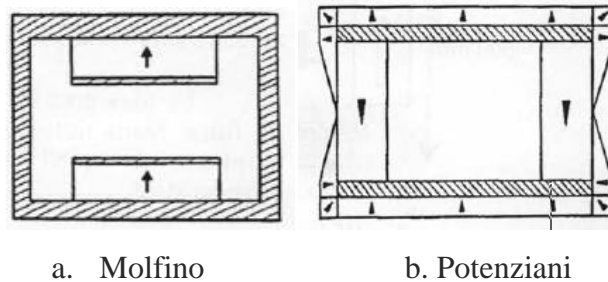


Figure I.3 Structure des aimants permanents avec des pièces polaires

- **Aimant Potenziani (1986).**

Cette structure est une amélioration de l'aimant Watson. On remarque tout de suite un assemblage d'aimants non colinéaires qui permettent de confiner au mieux le champ. Par contre le champ central bien que 'homogène reste faible représenté dans la figure I.3.b.

- **Aimant annulaire (Marinescu 1983)**

Il s'agit d'une structure sans pièce polaire. On comprend mieux le principe de cet anneau en représentant les charges magnétiques. Sur la figure I.4, les charges positives sont en haut, et les charges négatives en bas de l'espace central, d'où un champ central orienté de haut en bas. Le champ magnétique est confiné dans l'espace cylindrique par une culasse en matériau doux [2].

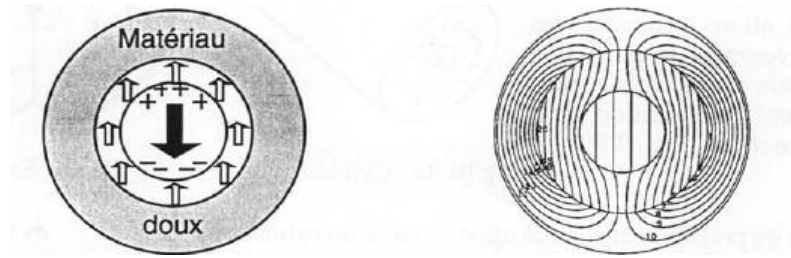


Figure I.4 Structure des aimants permanents annulaire

- **Aimants prismatiques (Ziilstra 1985) .**

Cette structure est différente de l'aimant annulaire car elle est réalisée à partir d'aimants à orientation différente. Le champ central est plus élevé mais subit de fortes inhomogénéités aux interfaces air-aimants. Par contre, elle conserve le principe de confinement des flux de fuites.

- **Aimant Zhou (1986).**

Cette structure est très proche de la précédente. La grosse différence est qu'elle présente des pièces polaires, comme dans la structure Molfino. Elle obtient donc une meilleure homogénéité [2].

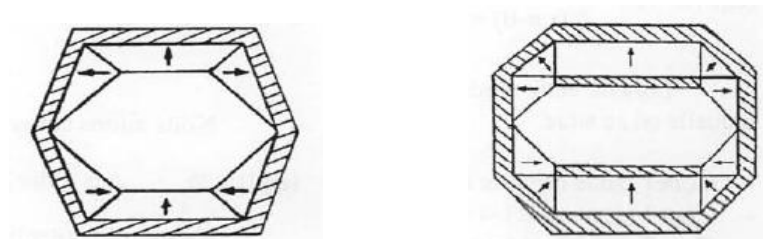


Figure I.5 Structure des aimants permanents prismatiques et Zhou.

I-4-Propriétés générales des aimants permanents:

Un aimant permanent est un corps ferromagnétique qui, une fois aimanté, conserve un certain état magnétique et fournit un flux magnétique continu. La caractéristique de l'aimantation correspond au deuxième quadrant du cycle d'hystérésis du matériau magnétique ($H < 0$, $B > 0$).

Cette courbe caractérise l'aimant, on l'appelle également caractéristique principale. La figure I.6 représente la courbe de désaimantation (B en fonction de H) pour un aimant NdFeB couramment utilisé dans les machines à aimants permanents de petite puissance.[3]

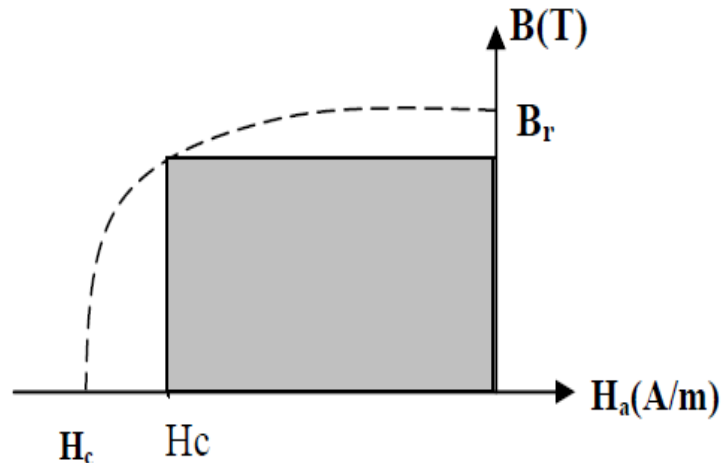


Figure I.6: Courbe de désaimantation

Dans un aimant, le champ magnétique est la composition d'un champ de polarisation intrinsèque au matériau magnétique (M) et d'un champ externe (H_m). La courbe intrinsèque donne la polarisation intrinsèque (J). Ces paramètres sont liés par les formules de base :

$$B_m = \mu_0 H + J \quad (1.1)$$

$$J = \mu_0 M \quad (1.2)$$

$$B_m = \mu_0 (H_m + M) \quad (1.3)$$

Les points importants de la courbe de désaimantation sont:

Br *Champ rémanent* : il correspond à la valeur du champ de l'aimant lors d'un court-circuit magnétique.

Hc *Champ coercitif* : valeur de H_m lorsque $B_m = 0$

μ_{rec} *Perméabilité de recul*: correspond à la pente de la courbe $B = f(H)$ au point Br .

Pour les aimants couramment utilisés dans les moteurs, la caractéristique principale est linéaire. Celle-ci est donc confondue avec les droites de recul.

Une grandeur également importante est le produit $(BH)_{\text{Max}}$; ce produit est couramment appelé « énergie spécifique de l'aimant ». Cette énergie caractérise la qualité du matériau, car l'énergie spécifique est inversement proportionnelle au volume d'aimant.

Donc, pour un entrefer donné, le volume d'aimant est d'autant plus faible que l'énergie spécifique est élevée [3].

Les matériaux magnétiques peuvent être de deux formes, isotropes ou anisotropes. Les matériaux isotropes ont les mêmes caractéristiques dans toutes les directions, contrairement aux matériaux anisotropes qui ont une direction privilégiée. Les matériaux anisotropes ont de meilleures performances magnétiques dans leur direction privilégiée.

Lorsqu'on utilise des aimants, il faut prendre garde à ne pas les démagnétiser. Si un champ externe trop intense est appliqué à l'aimant, il y a risque de désaimantation. Il faut toujours rester dans la partie linéaire de la courbe principale, afin de garder les performances optimales de l'aimant [3].

I-4-1 Le point de fonctionnement :

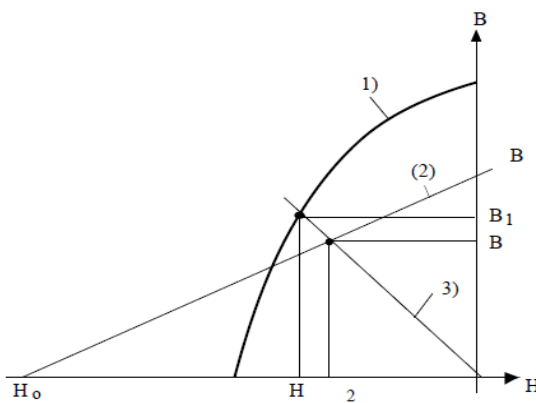
Le point de fonctionnement d'un aimant est déterminé par l'intersection de la caractéristique principale ou de la droite de retour avec la droite de charge (3). Cette dernière a pour équation :

$$B/H = \Lambda_e I_a / S_a \quad (I.4)$$

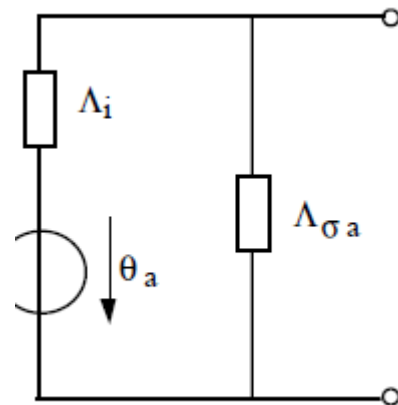
l_a = longueur de l'aimant ,

S_a = section de l'aimant,

Λ_e = perméance externe [4]



a- le point de fonctionnement



b- Schéma magnétique équivalent

Figure I.7 Les caractéristiques des aimants permanents

I-4-2-Schéma magnétique équivalent:

Un aimant permanent a pour schéma équivalent la représentation de la figure (I.7 b) , avec :

Λ_i = perméance interne de l'aimant

$$\Lambda_i = \mu_d S_a / l_a \quad (I.5)$$

θ_a = potentiel magnétique de l'aimant

$$\Theta_a = H_0 I_a \quad (I.6)$$

Λ_a = perméance de fuite de l'aimant [4]

μ_d = perméabilité interne de l'aimant.

I- 4-3-Energie magnétique:

L'énergie magnétique externe à l'aimant a pour expression :

$$W_{mag} = \frac{1}{2} B_e H_e V_e = -\frac{1}{2} BH V_a \quad (I.7)$$

$$V_a = -\frac{2W_{mag}}{BH} \quad (I.8)$$

I-4-4- Démagnétisation:

Si un aimant est soumis à un potentiel magnétique démagnétisant, par une bobine par exemple, l'équation de la droite de charge devient :

$$H = \theta_b / l_a - B \cdot S_a (l_a \wedge_e) \quad (I.9)$$

Le potentiel θ_b peut être positif ou négatif.[4]

I-5- Les différentes familles des aimants permanents:

Il existe trois types d'aimant permanent utilisés dans l'excitation des machines ; actuellement ceux qu'on trouve sur le marché sont: les Alnicos, les ferrites et les terres rares. La figure I.8 illustre ces trois types.

-Les aimants ont beaucoup évolué ces cinquante dernières années ; de nouveaux matériaux sont apparus, comme par exemple les terres rares (NdFeB, Sm-Co). Ces nouveaux matériaux ont de très bonnes caractéristiques magnétiques, mais restent relativement coûteux. C'est pourquoi, de nombreuses applications industrielles sont encore réalisées avec des ferrites [3].

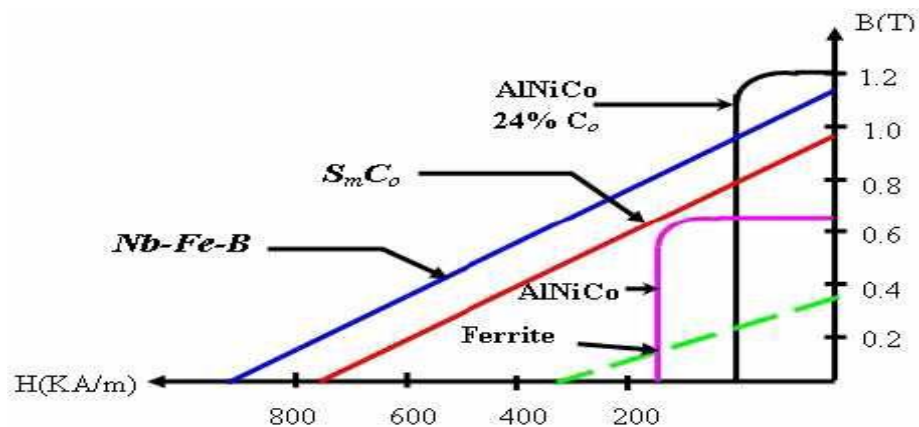


Figure I.8 Courbe B (H) des différents types des aimants permanents

1-Les aimants en Alinco ont un champ rémanent très élevé, mais un champ coercitif très faible, ce qui pose de gros problèmes de démagnétisation. Ces aimants ne peuvent être sortis de leur circuit magnétique, sous peine de les désaimanter. [3]

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

3-Les aimants Terre-Rares (Nd-Fe-B, Sm-Co) sont très puissants et paraissent très bien appropriés pour les machines électriques. Leur coût encore élevé freine l'extension de ces nouveaux aimants. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les plasto-neodymes. C'est un mélange de néodyme fer bore avec un liant plastique.

Cette matière permet de réaliser des pièces moulées, ce qui facilite l'assemblage et diminue le nombre de pièces mécaniques [3]

a-Les Samarium-Cobalt (Sm-Co) sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition. Les Sm-Co sont utilisés dans des applications particulières (télécommunications, aéronautique), dont les propriétés à haute température et la résistance à l'oxydation sont supérieures [6].

b-Les Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B) ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160°C). Les aimants de type Nd-Fe-B sont principalement utilisés dans la microinformatique et les télécommunications. Ils constituent en particulier l'élément central des actionneurs de têtes de lecture[6].

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

Tableau I.1 –Les grandes familles d'aimants [10].

I-6-Les applications des aimants permanents:

I-6-1-Les machines synchrones à aimants permanents:

Dans la machine synchrone à aimant permanent MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants, ce qui présente les avantages suivants :

L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor d'où un meilleur rendement ;

L'absence d'enroulement au rotor permet un gain en volume et en masse, conférant à la machine un couple volumique et une puissance massique relativement élevé.

Suppression des contacts frottant balais collecteurs ou balais a bagues.

Un facteur de puissance plus élevé.



Figure I.9: Moteur à aimants en géométries cylindriques

I-6-1-1 Alimentation des machines électriques à aimants permanents:

On distingue deux grandes familles pour les machines à aimants :

Les machines à f.e.m trapézoïdale, dites BDCM (Brushless Direct Current Motors);

Les machines à f.e.m sinusoïdale, dites PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machines).[6]

I-6-1-1-1 Les moteurs BDCM:

Dans un moteur BDCM, les phases sont alimentées par des courants en créneaux fonctions de la position du rotor. Ce régime de fonctionnement est très proche de celui de la machine à courant continu sauf que les aimants tournent et la commutation dans les conducteurs du stator est assurée par l'électronique.

Ce type de machine est très utilisé à cause de la simplicité de sa commande; une seule boucle de courant suffit, donc peu coûteuse; cependant, un simple retard de commutation peut

causer un grand couple pulsatile cela est l'inconvénient majeur qui fait que ce type de machine n'est pas utilisé pour les besoins en grandes performances [6].

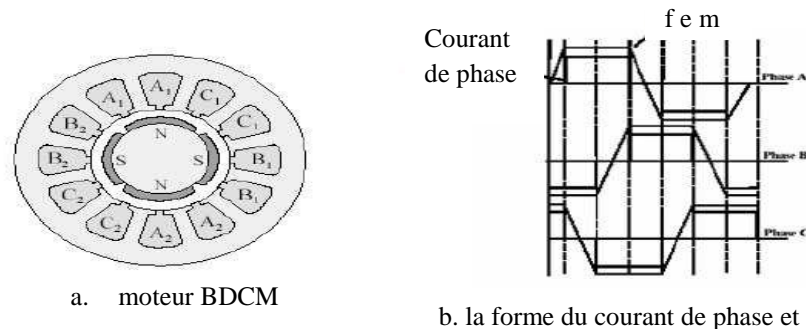


Figure I.10: Le courant de phase et la f.e.m d'un moteur BDCM à 4 pôles.

Afin de minimiser les couples pulsatiles, on alimente la machine avec des créneaux de courant de 120° . Cette alimentation consiste à alimenter à toutes instantes deux phases du moteur avec des créneaux de courant. La figure (I.10.a) montre la géométrie d'un moteur à courant continu à 4 pôles avec un enroulement concentré triphasé et la figure (I.10.b) montre le courant statorique et la forme d'onde de la f.e.m.

I-6-1-1-2 Les moteurs PMSM:

Les PMSM sont alimentés par des courants sinusoïdaux, ce qui réduit l'ondulation du couple causée par la commutation. Ils ont un fonctionnement plus proche de celui de la machine synchrone classique: le rotor bobiné est remplacé par un rotor à aimants permanents. Dans ce cas, on cherche à avoir une fem sinusoïdale. Ces machines présentent plusieurs avantages comparés aux (BDCM) comme : la capacité de contrôle du couple, le rendement ainsi que le fonctionnement dans une large gamme de puissance. Pour les entraînements de précision (robotique), ces machines sont préférées mieux que les machines BDCM [6].

I-6-1-2 Différentes applications:

Il existe de nombreuses configurations de moteur. La raison principale de cette diversité est que les utilisateurs ont tous des besoins spécifiques. Par exemple, pour la conception d'un servomoteur, l'inertie devra être la plus faible possible, afin de permettre une accélération et une décélération les plus rapides possible. Il sera donc préférable d'utiliser un moteur à rotor intérieur avec des aimants à hautes énergies. Tandis que, pour une application où la vitesse doit rester la plus constante possible, telle que la motorisation d'un disque magnétique, un moteur à rotor extérieur du fait de son inertie, est préférable. Nous pouvons

distinguer les différents types de machines synchrones à aimants permanents principalement par la structure de leur rotor. Trois grandes familles existent, les moteurs à rotor intérieur, à rotor extérieur ou entrefer axial [6].

I-6-1-2-1 Moteur à rotor intérieur:

Le moteur à rotor intérieur a une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique. Le stator est similaire à celui des machines triphasées à induction. La Figure(I.11) montre un exemple de moteur à rotor intérieur. L'avantage majeur de cette structure est le ratio couple/vitesse qui est élevé. Néanmoins une difficulté de construction existe, il faut assurer le maintien des aimants, même à vitesse élevée. Le plus souvent, ils sont collés et frétés [6].

I-6-1-2-2 Moteur à rotor extérieur:

La figure suivante présente la section d'un moteur à rotor extérieur. Les tôles utilisées au stator ressemblent à celles de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section.[6]



Figure I.11 Moteur à rotor intérieur et extérieur.

Les tôles utilisées au stator ressemblent à celles de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section. Le rotor est constitué d'aimants montés dans une cloche magnétique permettant la continuité du champ. Dans cette configuration, il n'y a plus de problème pour maintenir les aimants, car ils sont plaqués sur la cloche par l'action de la force centrifuge.

Cette structure est fréquemment utilisée dans les applications de ventilations pour son faible coût et sa facilité de fabrication. Cependant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante car le mobile a une inertie importante de par sa position externe [6].

I-6-1-2-3 Moteur à entrefer axial:

Les moteurs discoïdes sont pourvus de disques fixes bobinés (les bobines sont fixées en général sur un circuit imprimé avec les composants électroniques. Sous le circuit une plaque métallique permet au champ de se refermer) et de disques mobiles supportant les aimants permanents. L'avantage déterminant de la structure discoïde par rapport aux structures cylindriques provient de l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante.

Ces moteurs sont de construction simple, donc de faible coût ; de plus, du fait d'un entrefer pratiquement constant le couple de détente est inexistant. Cette structure fait l'objet d'une attention particulière, son application touche particulièrement le domaine où la miniaturisation est de rigueur (moteur de disque dur d'ordinateur, tables tournantes, ventilateur). La figure(I.12), représente une vue d'une machine à flux axial. Malgré sa puissance massique élevée, on souligne toutefois l'existence de contraintes mécaniques liées aux poussées axiales et des contraintes thermiques dues à la difficulté d'évacuation des pertes statoriques de ce fait ces machines fonctionnent à basse vitesse (inférieure à 1000tr/min) afin d'éviter un échauffement excessif dû au courant de Foucault.

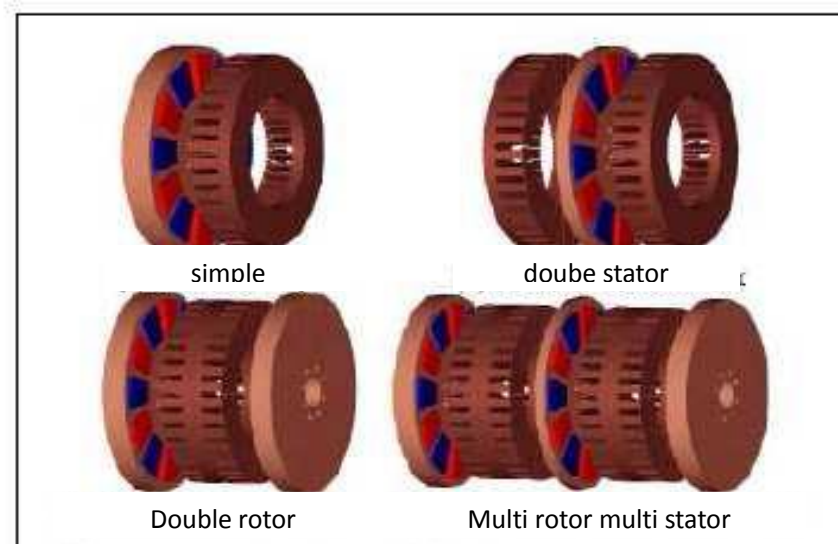


Figure I.12 Vue d'une machine à flux axial (différentes configurations)

I-6-1-3-Les rotors des machines à aimants permanents:

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant :

I-6-1-3-1-Aimants en surface:

Dans ce cas, les aimants permanents à aimantation radiale sont placés sur la périphérie du rotor; ils ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique comme montré sur la figure I.13.a. La construction de ce type de machine est relativement simple et plus économique. Pour améliorer la tenue mécanique et la fixation des aimants, ils peuvent insérés être sous une frette amagnétique, généralement en fibre de verre. Comme les aimants permanents ont une perméabilité proche de celle de l'air ($\mu_r \approx 1.1 \dots \dots 1.2$), l'entrefer magnétique équivalent vu parle stator est important et constant

L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants permanents de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges.[6]

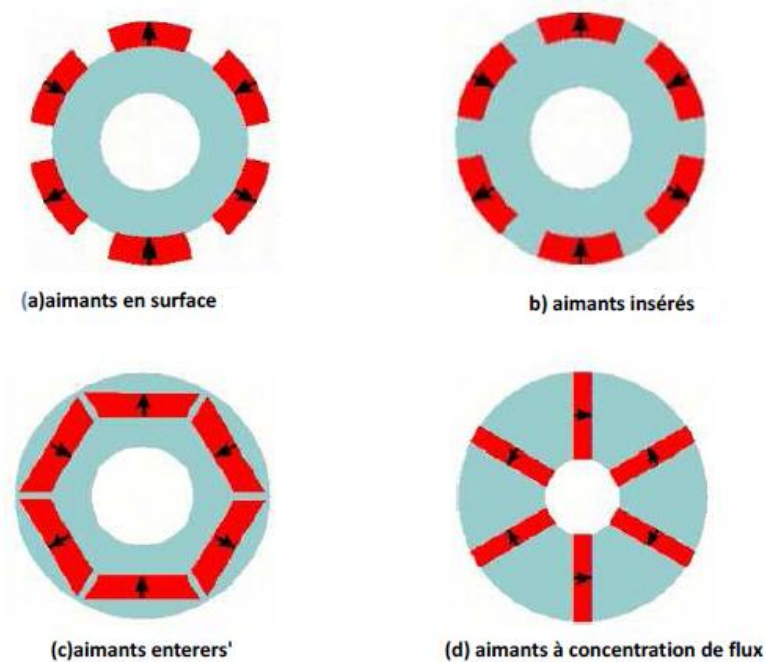


Figure I.13: Différentes structures des rotors des MSAP

I-6-1-3-2 Aimants insérés:

Comme des machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (I.13), ce qui permet d'avoir une bonne tenue mécanique. Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réluctant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe- q est légèrement supérieure à celle dans l'axe- d [6].

I-6-1-3-3 Aimants enterrés:

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor figure (I.13. c) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe- d est plus petite que celle de l'axe- q . Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est commandée pour les applications à grandes vitesses.

I-6-1-3-4 Aimants à concentration de flux:

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure (I.13.d). L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe- q est plus grande que celle de l'axe- d .[6].

I-6-2 Moteurs à courant continu:

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. Ils présentent l'avantage d'être très facilement commandés en régime de vitesse variable et se rencontrent dans la plupart des servomoteurs utilisés pour des fonctionnements de faible puissance (inférieure à 5 kW). Les moteurs à courant continu comportent un induit et un inducteur. Si l'induit est généralement constitué de bobinages en cuivre, l'inducteur peut être réalisé soit avec des bobinages en cuivre (figure I.14), soit avec des aimants permanents (figure I.14.a),

L'ensemble stator/rotor est représenté sur la (figure I.14.a), pour la seconde configuration. Nous nous intéressons ici aux avantages que représente l'utilisation des aimants permanents en tant qu'inducteurs à la place des bobinages en cuivre. Pour en savoir davantage sur le moteur à courant continu, le lecteur pourra se reporter utilement .[7]

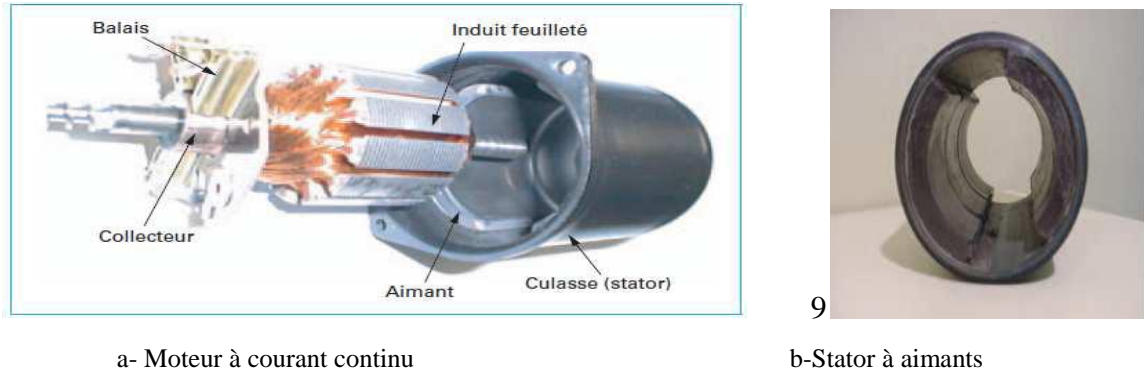


Figure I.14 Moteurs à courant continu avec un stator à aimants

L'utilisation des inducteurs à aimants permanents plutôt que des inducteurs bobinés présente les avantages suivants :

- le diamètre du moteur est plus faible d'environ 15 à 30 % avec des ferrites et jusqu'à 50 % avec des aimants Nd-Fe-B ;
- la masse du moteur est réduite d'environ 20 à 30 % avec des ferrites et d'environ 80 % avec des aimants Nd-Fe-B ;
- la consommation de courant est inférieure puisqu'il n'y a pas de courant inducteur, le rendement énergétique s'en trouve donc amélioré d'environ 10 à 15 % ;
- la fiabilité du moteur est accrue car il ne peut y avoir de rupture du bobinage inducteur ;

Les dimensions des circuits magnétiques et par suite des machines électriques sont souvent caractérisées par leur pas polaire P (P est proportionnel au diamètre de la machine et inversement proportionnel au nombre de pôles). P. Brissonneau et autres ils ont montré qu'il existe un pas polaire critique pour lequel les performances obtenues (puissance spécifique) sont équivalentes pour les deux types d'inducteurs (bobinés et à aimants) et qu'ils évaluent à 9 cm pour les ferrites de strontium et à 20 cm pour les Sm-Co .[7]

Les aimants, par leur capacité de miniaturisation (et d'induction élevée) sont donc appropriés aux machines à pas polaire faible. Ceci est généralement le cas des machines de faible puissance et donc de petite dimension.[7]

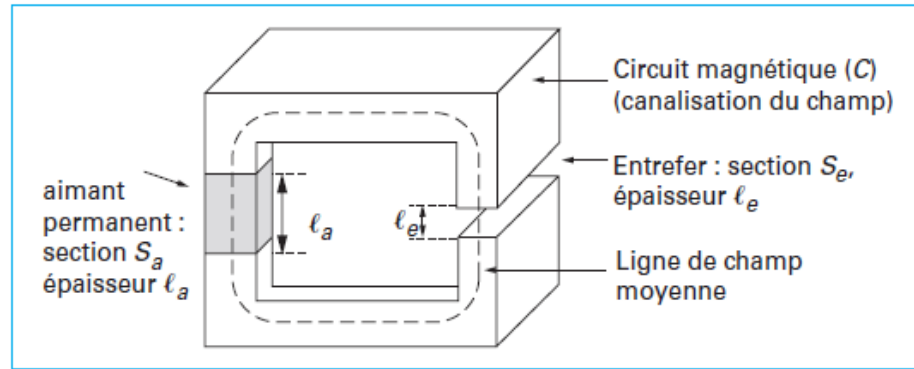


Figure I.15 Un circuit magnétique comportant un aimant, un matériau doux et un entre fer

Pour des machines de plus forte puissance (au-delà d'une puissance de l'ordre de quelques kilowatts), les moteurs à aimants permanents deviennent plus coûteux que les moteurs à inducteurs bobinés. Ils sont alors réservés aux applications où les gains de volume et de poids sont les critères principaux de conception. Les moteurs à aimants ferrites nécessitent des épaisseurs et donc des volumes plus élevés que les moteurs à aimants Nd-Fe-B. Ils restent cependant, pour une même puissance, moins chers que les moteurs à aimants Nd-Fe-B [7] voir la figure I.15.

I-6-3-Haut-parleurs:

Il existe deux types de structure de circuits magnétiques pour les haut-parleurs à bobine mobile: la structure *disque* et la structure *bague* (figure I.16). On recherche une induction (ou densité de flux) magnétique maximale dans l'entrefer, dans lequel est placée la bobine mobile reliée au pavillon ; cette dernière vibre en fonction des variations de courant qui lui sont appliquées (loi de Laplace)

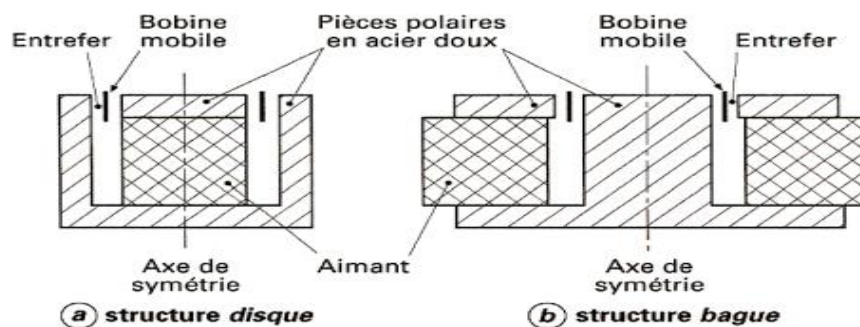


Figure I.16: Structure d'un haut-parleur

La **structure disque** est employée lorsque l'on utilise des aimants à rémanence élevée, c'est-à-dire des aimants métalliques de type alnico, samarium-cobalt, néodyme fer-bore ou manganèse-aluminium-carbone. Les avantages de cette structure sont :

- un très faible coefficient de fuite, intéressant dans le cas des haut-parleurs de téléviseurs (l'image n'est pas perturbée par les lignes de fuite de champ) ;
- un montage simple .Cependant, le prix élevé de ces aimants a amené les constructeurs à utiliser de plus en plus la **structure bague** avec des aimants de type ferrite, de plus faible rémanence et de plus grande surface, malgré les fuites inhérentes au système que l'on voit nettement sur la figure I.16, cette dernière représente les lignes d'induction super posées à la coupe du système à analyser, lignes obtenues à l'aide d'un programme informatique. Un système de blindage magnétique doit être ajouté pour éviter ces fuites, en particulier lorsque le rayonnement magnétique perturbe l'environnement (cas des haut-parleurs de téléviseurs). [7].

I-6-4- Séparateur magnétique:

Un séparateur magnétique est un appareil qui modifie les caractéristiques du champ magnétique dans l'espace de traitement. Il engendre en particulier un champ magnétique agissant de façon sélective sur les corps qui présentent la plus grande aptitude à l'aimantation. Dans les opérations de tri magnétique (concentration ou épuration), la séparation est obtenue en appliquant à toutes les particules contenues dans un mélange une force magnétique.[11]

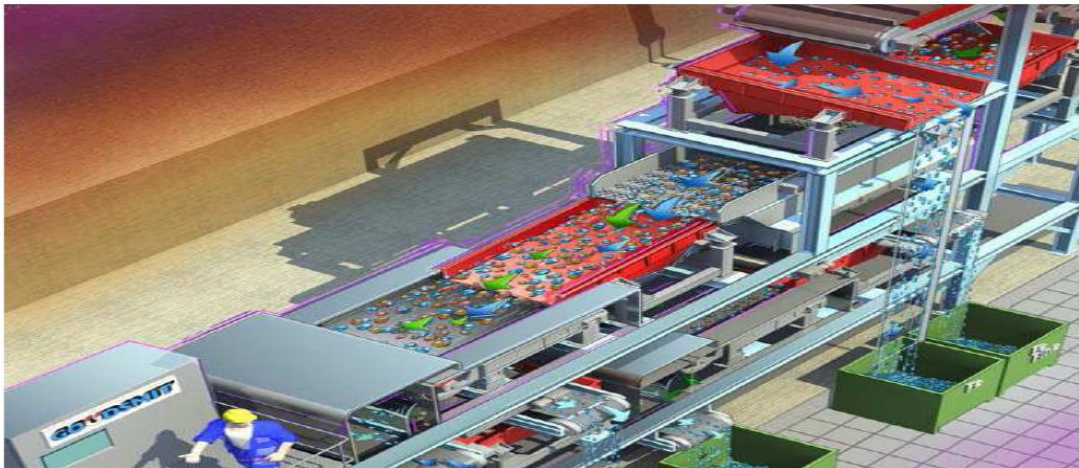


Figure I.17 Chaîne de séparation magnétique

I-6-4- 1-Principe de fonctionnement:

Ce système dispose d'une bande transporteuse avec un rotor magnétique à une extrémité. Ce rotor, tournant très rapidement sur lui-même, génère un champ magnétique très puissant: lorsque le métal non-ferreux arrive au voisinage du champ magnétique, celui-ci est propulsé 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 métaux ferreux sont eux attirés par le puissant champ magnétique et déchargés en dessous du séparateur, afin d'être ensuite récupérés [8].

Les over bands magnétiques permettent d'effectuer une séparation précise et efficace des métaux ferreux présents dans les déchets (verre, plastique, papier, bois, pierre, charbon, compost, etc.).

Ces types de séparateurs magnétiques sont largement utilisés par de nombreux recycleurs pour augmenter la valeur matière en la rendant exempte d'impuretés et aussi afin de protéger les équipements contre tout dommage pouvant être causé par les objets métalliques initialement présent dans le flux de matière/produit on duchesse. [8]

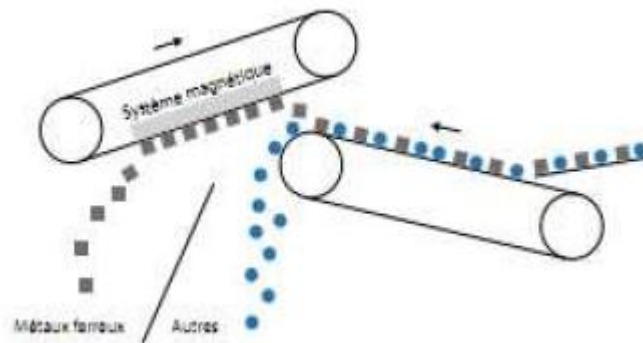


Figure I.18 : Principe de fonctionnement de séparateur

I-6-4- 2 Différents types de séparateurs magnétiques:

- **Blocs magnétiques.**

Les blocs magnétiques conviennent par excellence pour l'élimination de particules de fer dans des flux de matériaux où il est question de relativement peu de particules de fer. On peut les placer au-dessus de bandes de convoyage plates ou en **forme d'auge**. **Goudsmit** livre des blocs magnétiques en modèles permanents aussi bien qu'électromagnétiques. Ils sont

applicables pour tous flux de produits et de déchets, pour toute largeur de bande et profondeur de couche. Le choix d'un modèle permanent ou électromagnétiques dépend de la situation spécifique. [9]

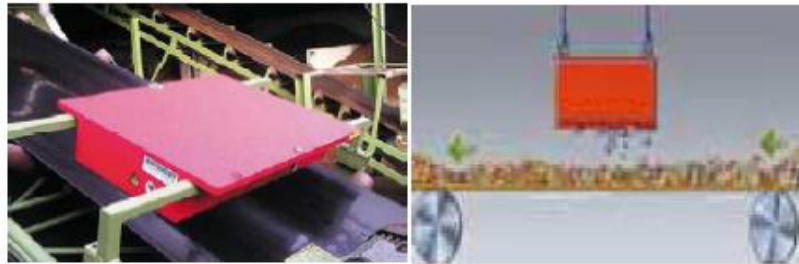


Figure I.19 Blocs magnétiques

- **Aimants pour band supérieure.**

Depuis de nombreuses années les aimants pour bande supérieure permanents et électromagnétiques. Ce genre d'aimants dans la première étape d'un processus d'élimination du fer. Le rendement varie de 70 à 90%. Si l'on souhaite un produit plus propre, on peut ajouter une ou plusieurs étapes d'élimination du fer. Les aimants pour bande supérieure peuvent être montés tant en ligne qu'exposition transversale. Les deux possibilités sont représentées ci-contre. [9]

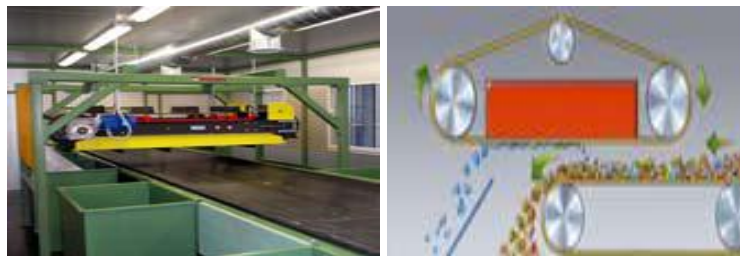


Figure I.20 Aimants pour band supérieure

- **Tambour à aimant permanent.**

Les aimants à tambour conviennent pour des produits en vrac et à recycler. Un aimant à tambour est un segment d'aimant fixe de 180 degrés autour duquel tourne un tambour muni d'arêtes. Les particules de fer sont fixées au manteau du tambour et entraînées vers la partie inférieure de l'aimant. Les arêtes emportent les particules de fer hors du champ magnétique. Il en suit une séparation pure entre produit et particules de fer. [9]



Figure I.21: Tambour à aimant permanent

- **Séparateurs à courant de Foucault**

Les séparateurs non ferreux "Eddy Current" Ils sont munis d'un rotor magnétique tournant à grande vitesse à l'aide duquel un champ d'induction est suscité par l'intermédiaire de pôles magnétiques (aimant permanent). La vitesse de rotation génère un champ magnétique à variation rapide. Dans des particules métalliques conductrices d'électricité ne contenant pas de fer (métaux non ferreux), il se produit un courant magnétique tourbillonnaire (Eddy Current). Ce jeu de forces a pour effet de propulser la particule non ferreuse hors du flux de produit. [9]



Figure I.22 : Séparateurs à courant de Foucault

Séparateurs haut gradient.

Les séparateurs a haut gradient sont des aimants si puissants qu'ils peuvent capter et éliminer des matériaux paramagnétiques ou légèrement magnétiques. Par exemple, l'inox qui a été déchiqueté peut devenir magnétique à la suite de cette déformation mécanique. Pensez par exemple aussi à de la poussière de fer de l'ordre du micron dans des matériaux céramiques. [9]

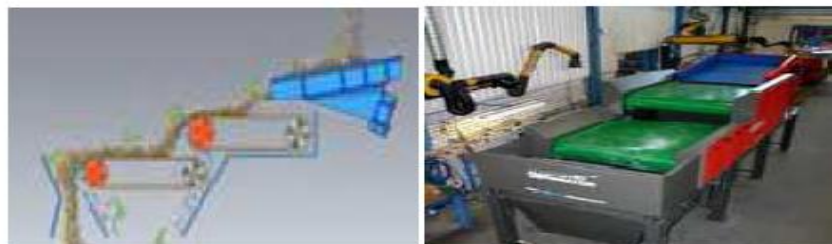


Figure I.23 Séparateurs haut gradient

- **Les détecteurs de métaux.**

Les détecteurs de métaux leur application dans les flux de recyclage comme protection pour broyeurs/réducteurs/ déchiqueteuses dans le trajet initial d'un processus de traitement. Mais aussi comme instrument de contrôle à la fin d'un processus de traitement, par exemple dans le cas du traitement de plastique. [9]



Figure 1.24 Le détecteur de métaux

Appareils	Générateurs	Granulométrie de traitement (mm)	$\mu_0 \text{grad} (H^2)$ ($N. m^3$)
Basse intensité			
Séparateur à tambour	aimant permanent	5 à 20	2×10^4 à 2×10^6
Séparateur à bande	aimant permanent	10	5×10^4
_voie sèche	aimant permanent	20	2×10^6
- voie humide	aimant permanent	5	2×10^5
Haute intensité			
Séparateur à tambour	aimant permanent ou électroaimant	1 à 5	2×10^7 à 2×10^8
Séparateur à rotorinduit	aimant permanent en céramique	5	2×10^7
Séparateur Jones	électroaimant	3	2×10^9
	électroaimant	1	4×10^9
Haut gradient ou Haut champ	solénoïde	0,05 à 0,1	6×10^{10} à 6×10^{12}
Séparateur conventionnel :			
_ discontinu.	bobine en cuivre	0,1	6×10^{11}
- continu.	bobine en cuivre	0,1	6×10^{11}
Séparateur en supraconducteu	bobine supraconductrice	1	4×10^{12}

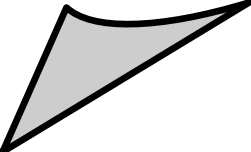
Tableau I.2 Différents types de séparateurs magnétiques[11]

I-7-Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté les aimants permanents ainsi qu'un bref tour d'horizon des différentes applications techniques par exemple les machines synchrones à aimants permanents, 'stators et rotor' les différentes formes des aimants et les structures qui existent, ainsi que les séparateurs à aimant permanent, les haut-parleurs. La modélisation dans ce cas n'est pas une chose aisée; les méthodes de calculs empiriques ou analytiques deviennent insuffisantes quant à la prise en considération des géométries complexes. La résolution de tel problèmes nécessitent de recourir aux méthodes numériques. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus efficaces et les plus utilisées, La présentation de cette fera méthode l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II :

**Modélisation d'un aimant
permanent**



II-1 Introduction:

Dans ce chapitre nous abordons le cœur de notre sujet : le calcul du champ magnétique des aimants permanents par la méthode des éléments finis, cette méthode numérique est une méthode de d'approximation interne particulière. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

Nous commencerons par présenter les équations de maxwell et les notions de bases du magnétisme pour aboutir un modèle fini simple.

II-2 Maillage d'un aimant permanent rectangulaire:

Un aimant permanent est caractérisé par une induction magnétique B l'application de a méthode des élément finis sert a le décomposé a des sous domaines triangulaires afin de garantir une discrétisation bien définie caractériser par un nombre de point et des bras formant des triangles cette méthode est développée ci-dessous:

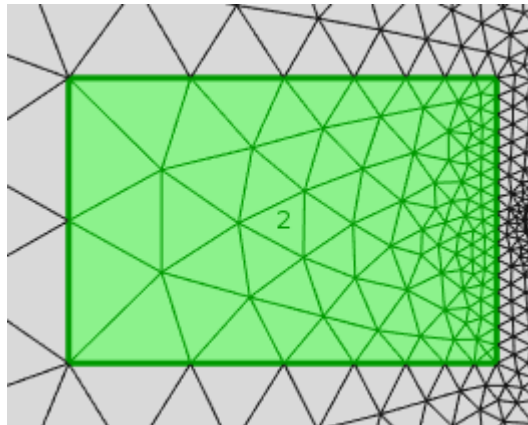


Figure II.1 maillage d'un aimant permanent

II-3 Principe de la méthode des éléments finis:

La méthode des éléments finis c'est une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régit les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée au type du maillage (géométrie et la discrétisation). Après c'est l'assemblage d'un système matriciel d'équations non linéaire. [6]

II-3-1 Types d'éléments finis:

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

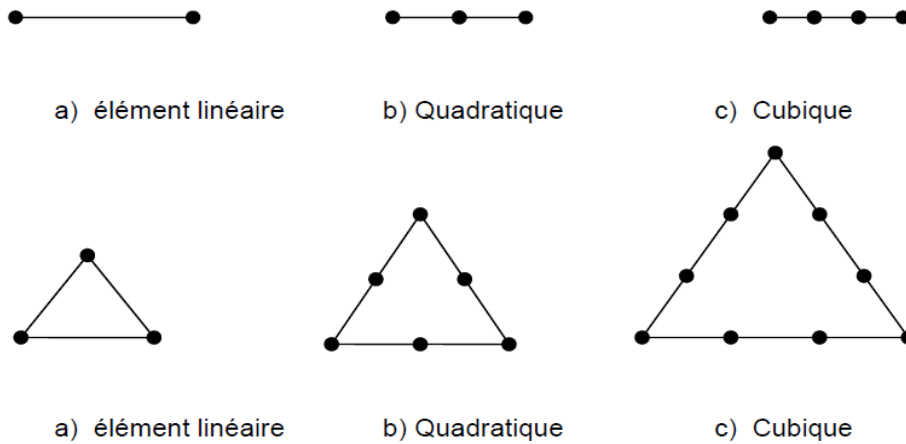


Figure II-2 Eléments classiques en une et deux dimensions

Dans la majorité de cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleur exactitude de la solution, on procède a raffiner le maillage.

II-4 Magnétostatique:

La magnétostatique est l'étude des champs 'magnétiques stationnaires'. C'est le deuxième phénomène de base de l'électromagnétisme. Autrefois, on pensait que l'électricité et le magnétisme étaient deux phénomènes indépendants. Cependant, on sait maintenant qu'ils sont reliés. Le champ magnétique est représenté par H (unité : Henry par mètre [H/m]), tandis que l'induction magnétique est représenté par B (unité : Tesla [T]).

II-5 Formulations des équations d'électromagnétique:

Les équations locales de l'électromagnétisme ou «équations de Maxwell» décrivent le comportement local dans le temps et dans l'espace des grandeurs électriques et magnétiques et leurs interactions mutuelles. Les quatre équations suivantes présentent la forme la plus générale des équations de Maxwell [6]

$$\text{Loi de Maxwell-Faraday} \quad \overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Loi de Maxwell-Ampère} \quad \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad \text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Loi de Maxwell-Gauss} \quad \text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Avec:

\vec{E} (V.m^{-2}) Champ électrique,

\vec{B} (T) Induction magnétique,

\vec{H} (A.m^{-1}) Champ magnétique,

\vec{J} (A.m^{-2}) Densité de courant,

\vec{D} (C.m^{-2}) Induction électrique,

ρ (C.m^{-3}) Charge volumique,

$\frac{d\vec{D}}{dt}$ (A.m^{-2}) Densité de courant déplacement

La résolution de ces équations ne peut s'effectuer sans les relations constitutives du milieu. Une relation constitutive décrit localement le comportement des grandeurs électromagnétiques dans un matériau donné. Dans le cas des matériaux isotropes ces relations s'écrivent [6]:

- Les relations du milieu

$$\text{Pour les matériaux magnétiques} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.5})$$

Avec:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

B_r (T) Induction magnétique rémanente (cas d'aimants permanents),

μ_0 (H.m^{-1}) Perméabilité magnétique du vide ;

μ_r Perméabilité magnétique relative du milieu,

μ (H.m^{-1}) Perméabilité magnétique absolue,

$$\text{Pour les matériaux diélectriques} \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

Avec: $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

ε_0 (F.m^{-1}) Permittivité électrique du vide ;

ε_r Permittivité électrique relative du milieu,

ε (F.m^{-1}) Permittivité électrique absolue,

$$\bullet \text{ La loi d'ohm} \quad \vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

σ (S.m^{-1}) Conductivité électrique

\vec{J}_s ($A \cdot m^{-2}$) Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation

Les relations précédentes sont données dans le cas le plus général : dans un matériau ferromagnétique sans induction rémanente, le terme B_r de l'équation (II.5) devient nul.

Dans le cas des aimants permanents, l'induction rémanente \vec{B}_r s'exprime en fonction du vecteur aimantation \vec{M} comme suit [6]:

Dans le cas des aimants permanents, l'induction rémanente \vec{B}_r s'exprime en fonction du vecteur aimantation comme suit [6]:

$$\vec{B} = \mu \vec{M} \quad (\text{II.8})$$

II-6 Equation de continuité:

Cette équation est obtenue par la combinaison des équations (II.2) et (II.4) qui traduit la conservation de charge électrique donnée par:

$$\text{div} \vec{J} + \frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (\text{II.9})$$

II-7 Formulation du problème électromagnétique:

Pour les fréquences utilisées en électrotechnique, les courants de déplacement $\frac{d\vec{D}}{dt}$

Sont négligeables devant les courants de conduction ce que se traduit par $\frac{d\vec{D}}{dt} \ll \vec{J}$; l'équation (II.2) s'écrit alors:

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (\text{II.10})$$

A partir de l'équation (II.3) on peut introduire un potentiel vecteur magnétique (A) tel que [6] :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.11})$$

D'après le théorème d'Helmoltz, un vecteur ne peut être défini que si son rotationnel et sa divergence sont simultanément donnés. Dans ce cas, la relation (II.11) ne suffit pas à définir le vecteur A , il faut en plus définir sa divergence pour garantir l'unicité de la solution. Dans notre étude, nous utiliserons la jauge de Coulomb, soit [6] :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.12})$$

La substitution de (II.11) dans (II.1) nous donne :

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} \right) = 0 \quad (\text{II.13})$$

La relation (II.13) implique qu'il existe un potentiel scalaire V tel que :

$$\vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} = -\text{grad} V \quad (\text{II.14})$$

D'où :

$$\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt} - \overrightarrow{grad} V \quad (\text{II.15})$$

La substitution de E par son expression (II.15) dans l'équation (II.7) nous donne :

$$\vec{J} = \vec{J}_S - \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} - \overrightarrow{grad} V \quad (\text{II.16})$$

A partir de (II.5), (II.10), (II.11), (II.16), l'équation qui régit les phénomènes magnétiques est :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}\vec{A}\right) = \vec{J}_S - \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} - \overrightarrow{grad} V \text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot B_r\right) \quad (\text{II.17})$$

Le potentiel vecteur A n'a qu'une composante (selon Oz),

Le vecteur densité de courant J n'a qu'une composante (selon Oz).

Ceci se traduit par

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{A} = A(x, y, t)_z \\ \vec{J} = J(x, y, t)_z \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

$$(\text{II.19})$$

II-8 Conditions aux limites:

Condition de Dirichlet

Cette condition impose la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière extérieure du domaine de résolution. [6]

$$A = g_0$$

Avec A : Fonction inconnue du problème

g_0 : Une constante

On parle de condition de Dirichlet homogène quand $A = 0$ le long de la frontière du domaine

Condition de Neumann

C'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine étudié. $\frac{dA}{dn} = g_0$

Habituellement, on parle de Neumann homogène sur les plans de symétrie, quand

l'équation $\frac{dA}{dn} = 0$ définit le long de la frontière du domaine

Condition mixte Dirichlet – Neumann (de Robin)

C'est la combinaison des deux types de conditions aux limites. Elle s'exprime par

$$aA + b \frac{dA}{dn} = g \quad (\text{II.21})$$

Où :

a et b : constantes définies sur le domaine d'étude et g : la valeur de l'inconnue sur la frontière.

II-9 Conditions de transmission:

Un champ électromagnétique traversant deux milieux continus différents subit une discontinuité et n'est plus différentiable. Afin de résoudre les équations de Maxwell dans un domaine entier contenant des sous-domaines avec différentes propriétés de matériaux, il est donc nécessaire de considérer les conditions de transmission, qui s'énoncent comme suit :

Conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E}

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (\text{II.22})$$

Conservation de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B}

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{II.23})$$

Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} , si les courants surfaciques \vec{K}_S existent

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{K}_S \quad (\text{II.24})$$

Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} , si les charges surfaciques ρ_S existent

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_S \quad (\text{II.25})$$

Avec:

\vec{n} : La normale à l'interface.

K_S et ρ_S sont respectivement, la densité de courant et la densité de charges, portées par la surface de séparation.

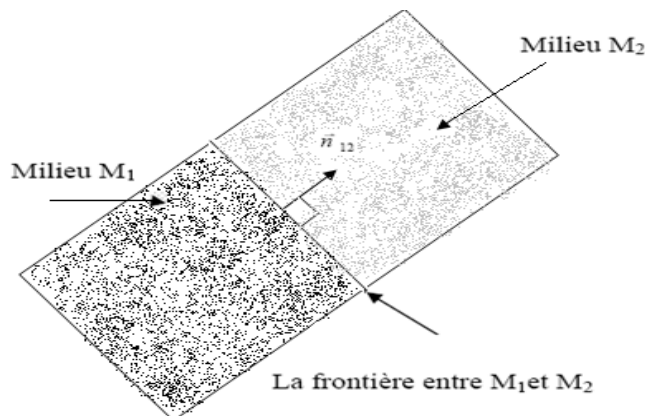


Figure. II.3 Interface entre deux milieux différents

II-10 Discrétisation et approximation:

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul [6].

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres. [6]

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines. [6]

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds. [6]

L'inconnue A est décrite dans chaque élément e par une combinaison linéaire des valeurs A_i^e aux nœuds:

$$A^e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i^e A_i^e \quad (\text{II.26})$$

Les α_i sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$\alpha_i^e(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } i = j \\ 0 & \text{Si } i \neq j \end{cases}$$

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples. [6]

Dans le cas de l'élément triangulaire représenté sur la figure (II.1), les fonctions de pondération sont :

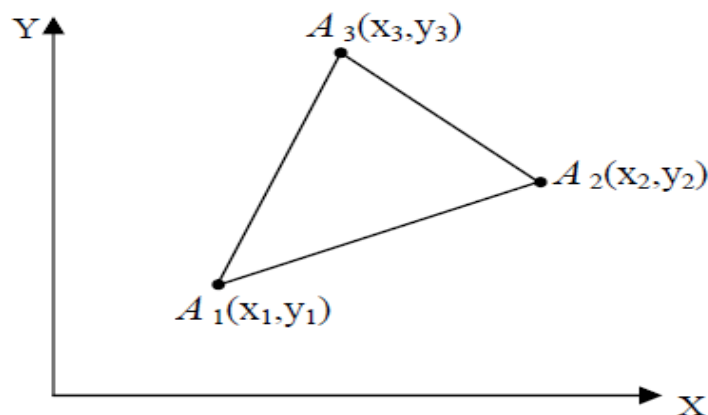


Figure. II.4 Élément triangulaire.

$$\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2, y_3) - (x_3, y_2) + (y_2 - y_3).x + (x_3 - x_2).y]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3, y_1) - (x_1, y_3) + (y_3 - y_1).x + (x_1 - x_3).y]$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1, y_2) - (x_2, y_1) + (y_1 - y_2).x + (x_2 - x_1).y]$$

où: Δ est l'aire de l'élément.

$$2.\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1, y_2) - (x_2, y_1) + (x_3, y_1) - (x_1, y_3) + (x_1, y_2) - (x_2, y_1)$$

D'où:

$$\begin{aligned} \Delta &= [(x_1, y_2) - (x_2, y_1) + (x_3, y_1) - (x_1, y_3) + (x_1, y_2) - (x_2, y_1)] / 2 \\ &= \frac{1}{2} [(x_1, y_2) - (x_2, y_1) + (x_3, y_1) - (x_1, y_3) + (x_1, y_2) - (x_2, y_1)] \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

II-11 Formulation intégrale:

On procède à la résolution par la méthode des éléments finis de l'équation régissant le comportement électromagnétique des structures étudiées soit par la minimisation d'une fonctionnelle liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments (méthode vibrationnelle), soit par une formulation intégrale du problème (méthode des résidus pondérés). Ces deux méthodes sont équivalentes et conduisent à partir d'un certain point, aux mêmes développements mathématiques. [6]

La méthode des résidus pondérés consiste à rechercher sur le domaine d'étude Ω les fonctions $A(x,y)$ qui annulent la forme intégrale suivante.

$$W = \iint_{\Omega} \Psi \cdot R(A) d\Omega \quad (\text{II.28})$$

Où R est le résidu de l'approximation défini par :

$$R(A) = L(A) - F_v \quad (\text{II.29})$$

L : L'opérateur différentiel;

F_v : Fonction défini sur le domaine d'étude Ω ;

A : Potentiel magnétique, inconnue de l'équation

II-12 Principes des sources équivalentes:

II-12-1 Calcul du champ magnétique dû à un volume aimanté en un point extérieur à l'aimant:

Imaginons, dans le référentiel (O,x,y,z) , un volume aimanté (v') , dont l'aimantation $\vec{J}(r')$ est supposée connue en chaque point et un observateur $M(r)$ (Figure II.5). On s'intéresse aux seules grandeurs magnétiques liées à la présence du volume aimanté et on suppose l'observateur situé d'abord à l'extérieur de la matière aimantée, donc dans le vide. [12] .

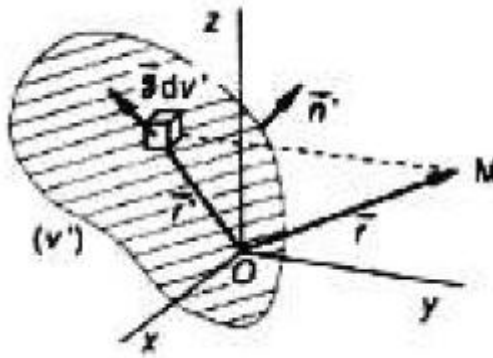


Figure II.5 Notations utilisées pour le calcul du champ magnétique

dû à un volume aimanté[12] .

Chaque élément de volume dv' se comporte comme un moment élémentaire $d\vec{M}$:

$$d\vec{M} = \vec{J}(r') \cdot dv' / \mu_0 \quad (\text{II.30})$$

Le champ d'induction $\vec{B}(\vec{r})$ vu par l'observateur dérive à la fois d'un potentiel scalaire $\mu_0 V(\vec{r})$ et d'un potentiel vecteur, $\vec{A}(\vec{r})$ avec :

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iiint_{v'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (\text{II.31})$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_{v'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (\text{II.32})$$

On démontre facilement que les intégrales précédentes peuvent être remplacées par les expressions mathématiques suivantes qui représentent des potentiels scalaire et vectoriel :

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[\iint_{s'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' + \iiint_{v'} \frac{-\text{div}(\vec{J})}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv' \right] \quad (\text{II.33})$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \left[\iint_{s'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' + \iiint_{v'} \frac{-\text{div}(\vec{J})}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv' \right] \quad (\text{II.34})$$

Dans les relations précédentes S' désigne la surface du volume aimanté V' et le vecteur normal unitaire n' est toujours orienté vers l'extérieur. Ces deux expressions montrent que :

- Pour calculer le potentiel scalaire $V(\vec{r})$ d'où dérive le champ d'excitation \vec{H} , on peut utiliser la loi de Coulomb en remplaçant la distribution d'aimantation $\vec{J}(\vec{r}')$ par une distribution de pôles magnétiques fictifs comprenant :

- une répartition volumique de pôles avec une densité : $\rho = -\text{div}(\vec{J})$

- une répartition surfacique de pôles avec une densité : $\sigma = (\vec{J} \cdot \vec{n}')$

- Pour calculer le potentiel vecteur $\vec{A}(\vec{r})$ d'où dérive le champ d'induction \vec{B} , on peut utiliser la formule de Biot et Savart en remplaçant la distribution d'aimantation $\vec{J}(\vec{r}')$ par une distribution de courants Ampériens, qui comprennent :

- une répartition volumique avec une densité : $\vec{j} = \text{rot}(\vec{J})/\mu_0$ (II.35)

- une répartition surfacique avec une densité : $\vec{k} = (\vec{J} \times \vec{n}')/\mu_0$ (II.36)

Les pôles et les courants ampériens ne sont que des modèles mathématiques sans existence physique réelle. Ils n'en sont pas moins très précieux puisqu'ils permettent d'accéder non seulement au champ vu par l'observateur, mais compte tenu de ce qui a été dit à propos du moment magnétique, aux forces d'interaction, au couple...etc. [12]

Dans tous nos applications et calculs on va considérer que des aimants idéals, au niveau des calculs il y'aura des simplifications pour les expressions des potentiels scalaire et vecteur magnétiques on aura : [12]

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[\iint_{S'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' \right] \quad \text{car} \quad \text{div}(\vec{J}) = 0 \quad (\text{II.37})$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \left[\iint_{S'} \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' \right] \quad \text{car} \quad \text{rot}(\vec{J}) = 0 \quad (\text{II.38})$$

On rencontre beaucoup plus de difficultés pour définir le champ magnétique dans la matière que dans le vide, car une particule chargée témoin y subit les interactions de très nombreuses particules voisines. On a alors de la peine à isoler une force d'interaction purement magnétique ; on est conduit naturellement à un traitement statistique [12] .

Si on peut considérer le milieu aimanté cela permet de calculer en tout point de la matière les deux vecteurs :

$$\vec{H}(\vec{r}) = \overrightarrow{\text{grad}}(\vec{V}(\vec{r})) \quad (\text{II.39})$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}(\vec{r})) \quad (\text{II.40})$$

II-13 Le calcul des forces magnétiques:

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

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

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

II-13-1 Calcul des forces dans le cas d'un matériau magnétique:

La discontinuité du champ lors du passage entre les milieux influe sur le calcul des forces s'exerçant sur un milieu magnétique, Pour cela, nous distinguons les notations suivantes: [13]

$[T]^+$: tenseur calculés à l'extérieur, $[T]^-$: tenseur calculés à l'intérieur.

S^+ : La surface S coté extérieur, S^- : La surface S coté intérieur.

Quelque soit la nature du matériau à étudier on a:

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (\text{II.41})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.42})$$

J la densité de courant volumique, a la surface des différents milieux, nous avons:

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}^+ - \vec{H}^-) = \vec{K} \quad (\text{II.43})$$

$$\vec{n}(\vec{B}^+ - \vec{B}^-) = 0 \quad (\text{II.44})$$

Avec $(H^+ B^+)$, sont les caractéristiques magnétiques à proximité de la surface extérieur du milieu, $(H^- B^-)$ le champ et l'induction magnétique au voisinage de la surface intérieur du domaine et K la densité de courant surfacique. [13]

La relation qui caractérise le milieu:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (\text{II.45})$$

En ajoutant à cette relation, les équations précédentes on obtient pour la surface extérieure la forme suivante:

$$\text{rot} \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) = \vec{J} + \text{rot} \left(\frac{\vec{M}}{\mu_0} \right) \quad (\text{II.46})$$

Et pour la surface extérieure du milieu:

$$\vec{n} \wedge \left(\frac{\vec{B}^+}{\mu_0} - \frac{\vec{B}^-}{\mu_0} \right) = \vec{K} + \vec{n} \wedge \left(\frac{\vec{M}^+}{\mu_0} - \frac{\vec{M}^-}{\mu_0} \right) \quad (\text{II.47})$$

On comparant les équations précédentes, on peut dire qu'un milieu magnétique peut être assimilé a un milieu a magnétique parcouru par un courant de densité volumique J_e et surfacique K_e données par: [13]

$$\vec{J}_e = \vec{J} + \text{rot} \left(\frac{\vec{M}}{\mu_0} \right) \quad (\text{II.48})$$

$$\vec{K}_e = \vec{K} + \vec{n} \wedge \left(\frac{\vec{M}^+}{\mu_0} - \frac{\vec{M}^-}{\mu_0} \right) \quad (\text{II.49})$$

La théorie montre que la force appliqué est donnée par :

$$\vec{F} = \int_V (\vec{J}_e \wedge \vec{B}) dV + \oint_S (K_e \wedge B) dS \quad (\text{II.50})$$

on arrive à dire que :

$$\vec{J}_e = \text{rot} \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) \quad (\text{II.51})$$

On injecte cette formule dans l'intégrale de volume:

$$\vec{F}_v = \int_v \left(\text{rot} \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) \wedge \vec{B} \right) dV \quad (\text{II.52})$$

Des développements de calcul sont analogues à ceux qui permettent d'établir le tenseur de Maxwell à partir de la loi de Laplace, donne l'expression suivante: [13]

$$\vec{F} = \oint_S ([\vec{T}] \cdot \vec{n}) ds \quad (\text{II.53})$$

D'après les relations précédentes (II.46) e(II.48), on a:

$$\vec{K}_e = \frac{1}{\mu_0} [\vec{n} \wedge (\vec{B}^+ - \vec{B}^-)] \quad (\text{II.54})$$

L'intégrale surfacique devient alors:

$$\vec{F}_s = \oint_S (\vec{K}_e \cdot \vec{B}_s) ds = \frac{1}{\mu_0} \int_S [(\vec{n} \wedge (\vec{B}^+ - \vec{B}^-)) \wedge \vec{B}_s] ds \quad (\text{II.55})$$

Le vecteur d'induction magnétique B_s à la surface S égale à la moyenne des vecteurs inductions magnétiques exprimé en fonction de B^+ et B^- comme suit:

$$\vec{B}_s = \frac{1}{2} (\vec{B}^+ + \vec{B}^-) \quad (\text{II.56})$$

La force surfacique s'écrit par :

$$\vec{F}_s = (\oint_S ([\vec{T}]^+ \cdot \vec{n}) ds) - (\oint_S ([\vec{T}]^- \cdot \vec{n}) ds) \quad (\text{II.57})$$

Tel que

$$\oint_S ([\vec{T}] \cdot \vec{n}) ds = \oint_S ([\vec{T}]^+ \cdot \vec{n}) ds \quad (\text{II.58})$$

La force globale égale à:

$$\vec{F} = \vec{F}_s + \vec{F}_v \quad (\text{II.59})$$

$$F_s = \oint_S ([\vec{T}]^+ \cdot \vec{n}) ds \quad (\text{II.60})$$

La force agissant sur une particule magnétique peut être exprimée par le tenseur de Maxwell. Cette force peut donc aussi s'exprimer par l'équation: [13]

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_0} \oint_S \left((\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} (\vec{B}^2) \vec{n} \right) dS \quad (\text{II.61})$$

L'expression de la force sur des milieux magnétiques (particules ferreuses) peut donc être formulée en fonction du vecteur champ magnétique H .

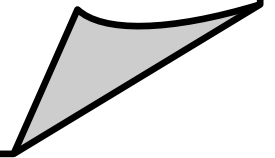
$$\vec{F} = \mu_0 \oint_S \left((\vec{H} \cdot \vec{n}) \vec{H} - \frac{1}{2} (\vec{H}^2) \vec{n} \right) dS \quad (\text{II.62})$$

II-14 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a données les différentes étapes pour le calcul des paramètres magnétiques a fin de l'exploitation du logiciel COMSOL utilisé pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP), en utilisant la méthode des éléments finis en 2D. Bien sure après avoir spécifié certaines données telles que les domaines, les conditions aux limites, et le maillage de la géométrie. Dans le chapitre suivant nous allons exploiter cette structure de modélisation pour simuler notre dispositif magnétique.

Chapitre III:

Initiation sur le COMSOL



III-1 Introduction :

La modélisation numérique des lignes de champ autour des aimants permanents et les particules ferreuses d'un dispositif de séparation magnétique nécessite impérativement l'utilisation d'un outil numérique de calcul comme le logiciel (COMSOL Multiphysics) qui donnera les valeurs du champ magnétique dans chaque point du domaine d'étude. Dans ce chapitre on va faire une étude détaillée pour l'implémentation du modèle d'un aimant permanent avec une particule ferreuse pour visualiser les lignes de champ magnétique et même les forces mécaniques.

III-2 Présentation du logiciel COMSOL :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications physiques en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation [14] :

- Définir la géométrie,
- Les propriétés des matériaux,
- Le maillage,
- Choisir la ou les physiques,
- Résoudre et afficher les résultats.

III-3 L'interface de COMSOL:

L'interface de COMSOL peut être résumé comme suite :

III-3-1 Le modèle builder (construction):

À gauche, on retrouve le "*Model Builder*" où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (*Parameters*), "le modèle (*Model*)" où se retrouvent la géométrie (*Geometry*), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (*Mesh*). Le *Model Builder* comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (*Study*) et les options d'affichage et de post traitement des données (*Results*). [14]

III-3-2 Déclaration des paramètres physiques :

Au milieu du logiciel on trouve la déclaration des paramètres électriques, physiques et même mécaniques de chaque domaine tels que la conductivité, l'excitation du courant et la tension l'induction ...etc

III.-3-3 Représentation de la géométrie:

En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (*Graphics*) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer la taille de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. [14]

III-3-4 Messages et résultats physiques:

Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. [14]

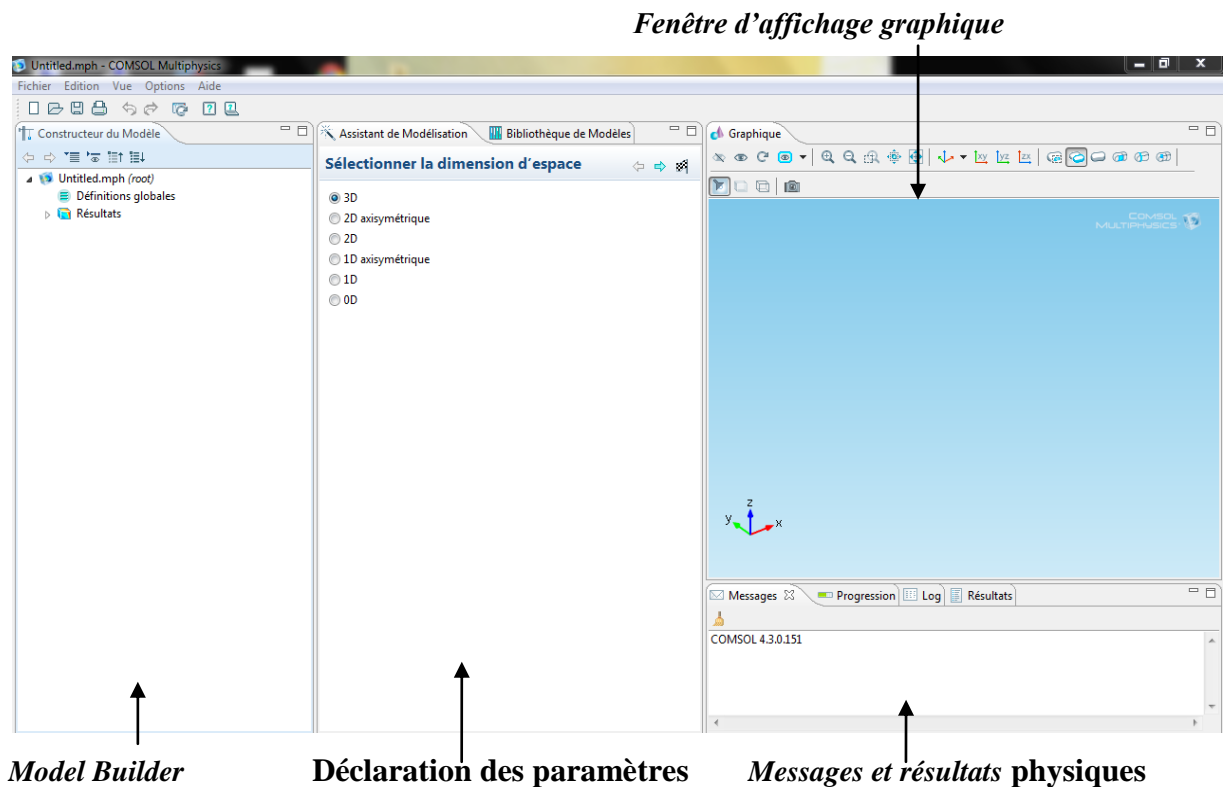


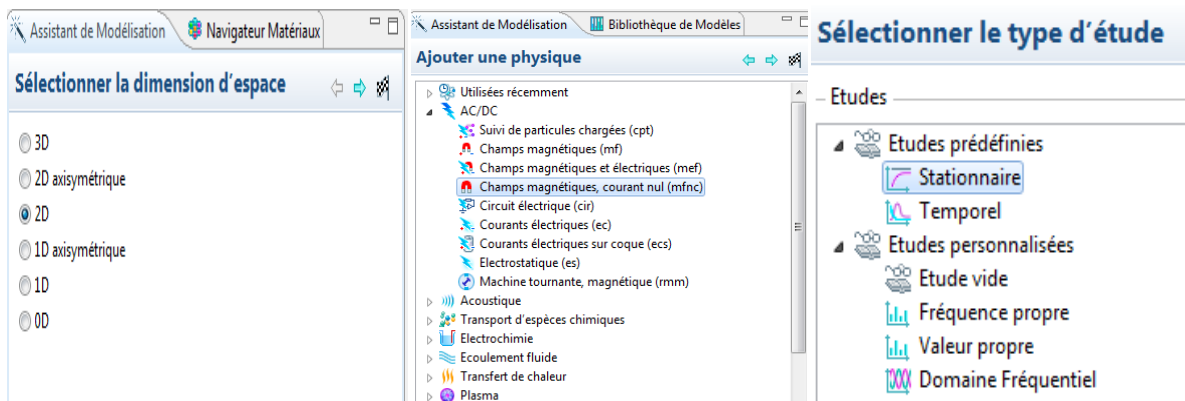
Figure III.1 L'interface de COMSOL4.3

III-4 Création du modèle en géométrie 2D :

La première étape dans la création d'un modèle de géométrie 2D est de générer un modèle COMSOL Multiphysics pour cette dimension dans un espace:

- 1- Dans le navigateur de modèle.
- 2- cliquez sur l'onglet "**nouveau fichier**".
- 3- puis sélectionnez **2D** dans la liste Espace Dimension.
- 4- Cliquez sur suivant.

Utilisez les outils de **AC/DC** dans la barre d'outils dessin et choisissez "**le champs magnétiques courant nul(mfnc)**" de la liste. Cliquez sur suivant et cliquez sur terminer.



a- Espace des dimension

b- le domaine d'étude

c- Le type d'étude

Figure III.2 Construction de la structure du modèle de base.

Cette étape donne la possibilité de choix du domaine étude soit temporel, stationnaire ou fréquentiel, suivant nos besoins et nos objectifs voulu. [15]

III-4-1 La construction de la géométrie:

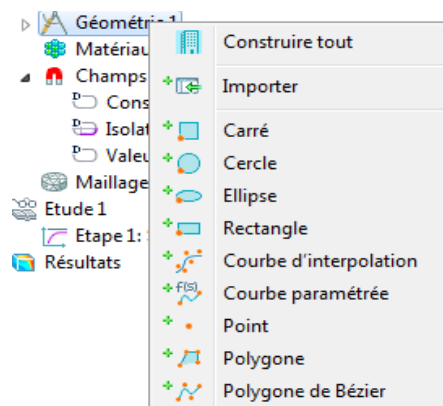


Figure III.3 La géométrie

- **Dessin de la géométrie :**

1- Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit "**géométrie 1**" et choisissez **rectangle1** ou **cercle** ou un **carré**.....

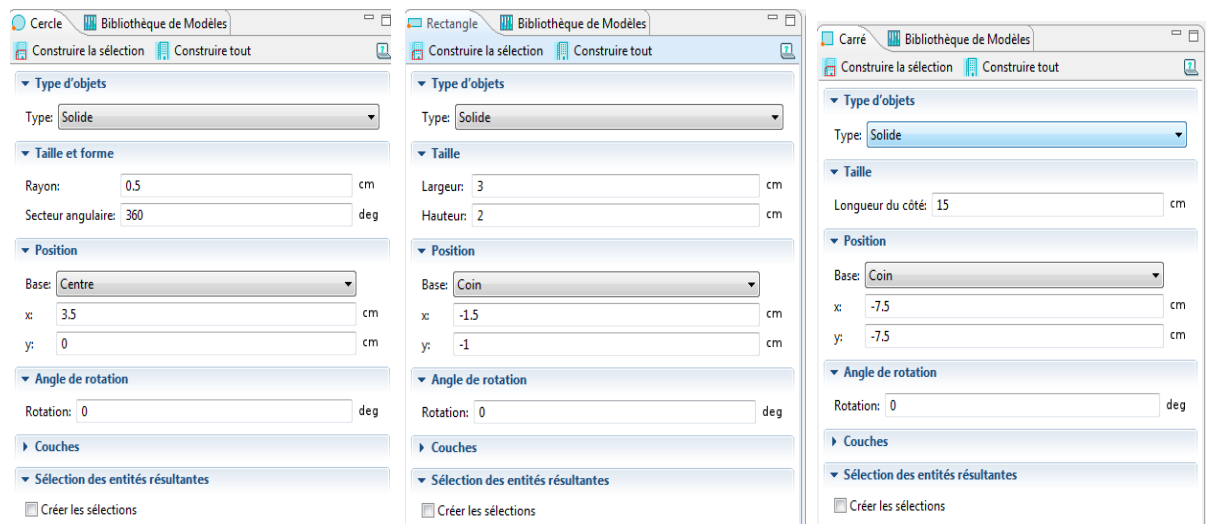
-Dans la fenêtre des paramètres "**rectangle1**", localisez la section, Taille et la forme.

2- Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit "**géométrie 1**" et choisissez **cercle2**.

- Dans la fenêtre des paramètres **cercle2**, localisez la section Taille et forme.

3- Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit "**géométrie 1**" et choisisse **carré**

-Dans la fenêtre des paramètres. "**carré 3**", localisez la section Taille et forme.



a la taille de la cercle

b La taille de la rectangle

c la taille de la carré

Figure III.4 : Déclaration des dimensions

Cliquez sur le bouton "**construire tout**".

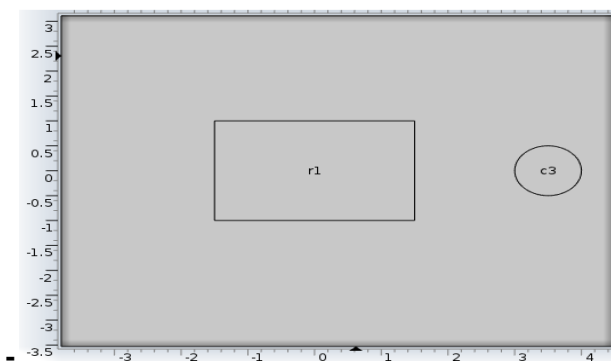


Figure III.5 La géométrie a trois parties.

III-4-2 Les matériaux:

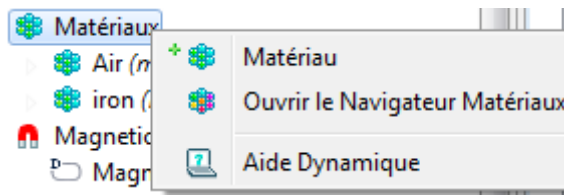


Figure III.6 Ouvrir e navigateur matériaux

1- Dans la fenêtre, "**constructeur du modèle**" cliquez-droit sur "**matériaux** "et sélectionnez "**Ouvrir Navigateur de matières**".

-Dans "**le navigateur matières**", développez dossier matériaux, localiser "**air** ", cliquez-droit et sélectionnez "**Ajouter le Matériel a chaque partie**" [15]

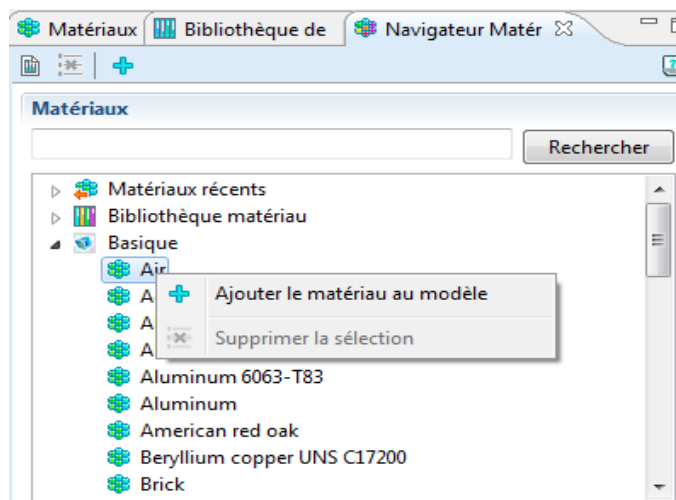


Figure III.7 Navigateur de matériaux.

- Dans la fenêtre "**le navigateur matières**", développez le type du matériau, choisir le matériaux "**iron** "par exemple, cliquez par la droite et sélectionnez "**Ajouter le Matériel au modèle à construire**"

III-5 Le champ magnétique courant nul (mfnc):

- *Conservation du flux magnétique1.*

-Sélectionner un domaine 1.2.3.

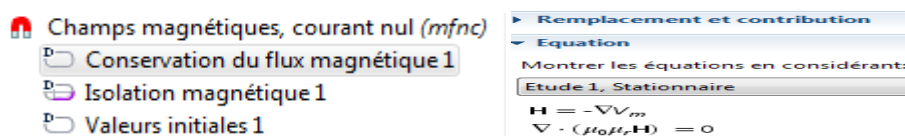


Figure III. 8 Déclaration de la conservation du flux

- **Isolation magnétique 1.**

- Dans la fenêtre **Model Builder** cliquez-droit sur *champ magnétique courant nul (mf)* et de choisir la condition aux frontières *Isolation magnétique*. Concernant les conditions de passage d'un milieu a un autre.

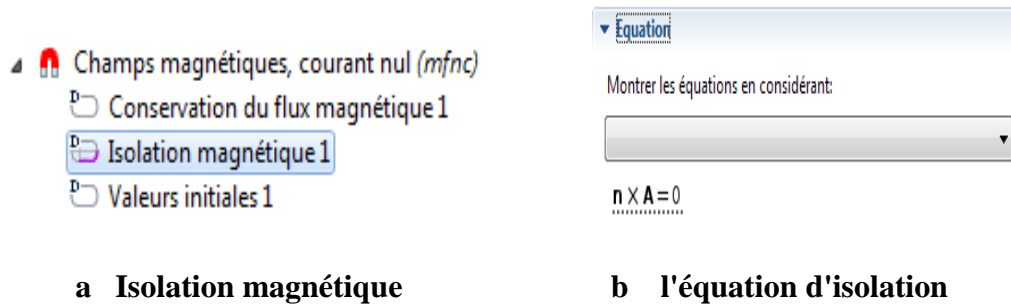


Figure III.9 Le choix de l'isolation magnétique.

- **Valeurs initiales 1.**

- Dans la fenêtre **Model Builder** cliquez-droit sur *champ magnétique courant nul (mf)* et de choisir la **valeur initiales du milieu**.

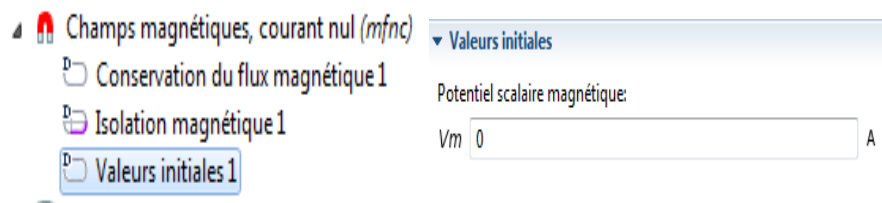


Figure III.10 La valeur initiale du milieu.

- **Conservation du flux magnétique 2.**

-Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit sur **Model 1**> "**le champs magnétiques courant nul(mfnc)**" et de choisir le domaine "**conservation du flux magnétique 2**"

- **Déclaration des paramètres magnétiques.**

-Sélectionner un domaine 2 seulement de l'aimant permanent

-Spécifiez le vecteur B_r l'induction magnétique en Tesla:

Densité de flux rémanent:

0	x
0.5	y
0	z

B_r T

Figure III.11 Déclaration de l'induction magnétique des aimants permanents.

- **Potentiel scalaire magnétique:**

- Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**" cliquez-droit sur "**le champs magnétiques courant nul(mfnc)**" et de choisir le condition à la limite "**potentiel scalaire magnétique nul**". Concernant es conditions aux limites du milieu à étudier.

- **La condition à la limite :**

Condition de Dirichlet

L'inconnue prend des valeurs données sur les bords du domaine on distingue deux types :

Dirichlet homogène

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considéré égal à zéro : $A=0$, $V=0$

Concernant les conditions aux limites du milieu à étudier on va sélectionner les frontière du domaine simuler "Select Bouderies" 1,2, 3,8

- **Le Calcul de la Force magnétique:**

-Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit sur "**champ magnétique a courant nul (mfnc)**" et de choisir le domaine "**Force Calculation**".

- Sélectionner un domaine3 seulement (la particule ferreuse). [15]

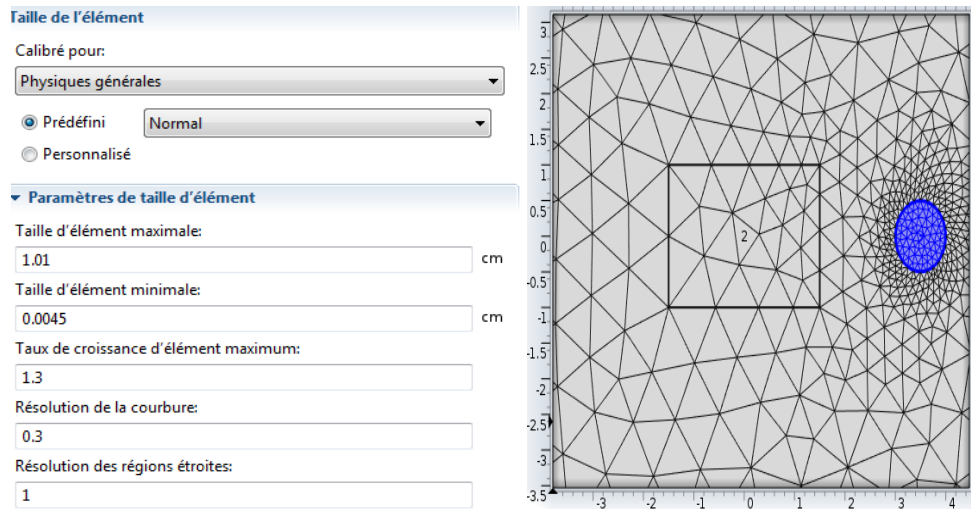
III-6 Le Maillage:

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]

- Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**" sous le **Model 1** -clic droit "**Maillage1**" et choisissez le type du maillage "**triangle libre1**".

- **Taille:**

-Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**" sous, **Model 1> Maillage 1** clic "**Taille.**"



a- la taille de l'élément

b- maillage des sous domaines

Figure III.12 Presence d'une particule proche de l'aimant permanent.

III-7 Le choix du domaine étude :

1- Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez sur "**étude 1**"

2- Dans la fenêtre "**étude 1**" settings, localisez la section "**étude stationnaire1**", il nous permet la déclaration des paramètres temporels ou fréquentiels qui caractérisent le milieu d'études afin de calculer les paramètres magnétiques électriques ou mécaniques en fonction des variables connues. [15]

III-8 Calcul des paramètres magnétiques et mécaniques:

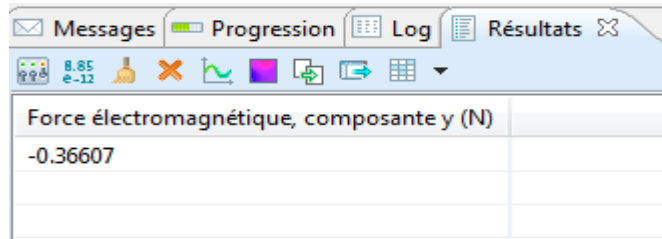
III-8 -1 Paramètres magnétiques :

Le calcul des propriétés magnétiques pour chaque point devient très simple avec a méthode des éléments finis et on se basant sur les lois magnétiques de maxwell et d'électromagnétique afin de les représenter en forme géométrique clair et simple. Par exemple la loi définie dans l'axe "**le champs magnétiques a courant nul (mfnc)**" est la suivante:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \mathbf{H}) &= 0 \\ \mathbf{H} &= -\nabla V_m + \mathbf{H}_b\end{aligned}$$

III-8-2 Paramètres électromécaniques:

La force magnétique d'attraction sera déterminée à travers les résultats des calculs magnétiques et les paramètres physiques tels que la conductivité de la particule.



Messages		Progression	Log	Résultats
Force électromagnétique, composante y (N)				
-0.36607				

Figure III.13 Messages et résultats.

III-9 Affichage des résultats :

-Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit sur "**résultats**" et de choisir le type de la représentation des résultats par exemple surfacique ou contour ...etc.

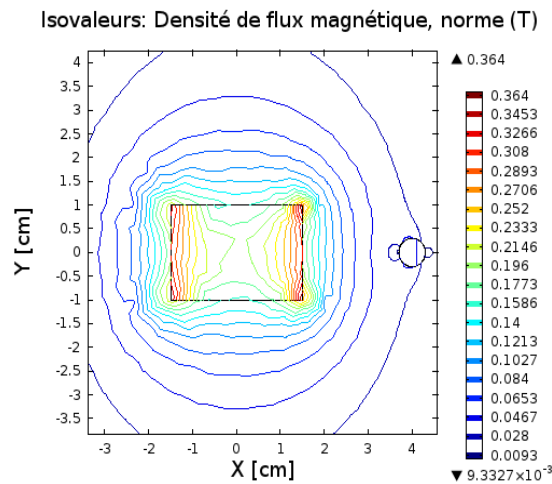


Figure III.14 L'induction magnétique .

-Représentation des courbes:

L'instruction "Groupe de graphique 1D 1" nous permet de représenter les courbes ou les mesures dans des points ou à des extrémités en fonction du temps.

-Dans la fenêtre "**constructeur du modèle**", cliquez-droit sur "**résultats**" et de choisir

"**Groupe de graphique1D 2**"

- "**Groupe de graphique1D 2**" et de choisir "**Graphique sur ligne1**" [15]

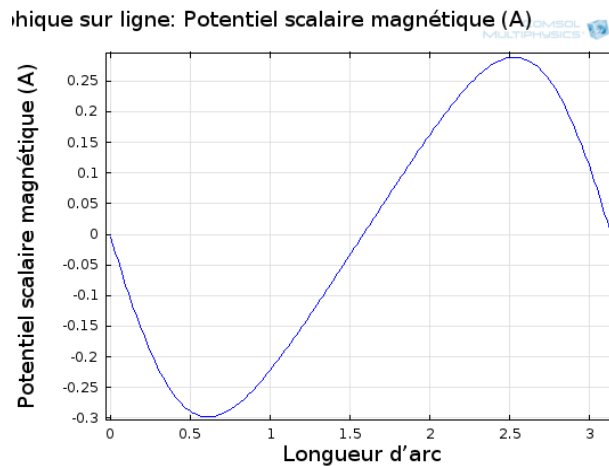


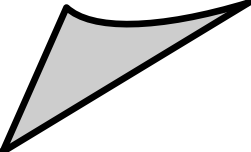
Figure III.15 Potentiel scalaire magnétique autour de la particule ferreuse.

II-10 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a données les différentes étapes pour l'exploitation du logiciel COMSOL, ce dernier peut être utilisé pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP), en utilisant la méthode des éléments finis en 2D. Cette méthode peut être exploitée grâce à l'interface graphique, qui peut être utilisée pour spécifier certaines données telles que le domaine, les conditions aux limites, et le maillage de la géométrie. Après simulation les résultats peuvent être exportés vers l'éditeur MATLAB. Dans le chapitre suivant nous allons utiliser cette simulation pour représenter les caractéristiques magnétiques et mécaniques des particules ferreuses.

Chapitre IV:

**Simulation et analyse des
résultat d'un séparateur
rotationnel**



IV-1 Introduction :

La validation de la simulation sur le logiciel COMSOL devient facile après la simplification du modèle en équation différentielle partielle et la détermination de tous les paramètres magnétiques et géométriques, une fois mise en œuvre et validée, peut être relancée très rapidement avec de nouveaux paramètres. Les outils complémentaires de la simulation permettent de traiter la majorité des configurations et les différentes formes des aimants permanents avec la méthode des éléments finis. Dans ce chapitre nous allons exploiter les résultats des simulations réalisés.

IV-2 Structure du programme:

En premier lieu, nous allons présenter la structure de notre programme qui est constituée de trois parties. En se basant sur les équations de Maxwell données dans le chapitre 2, nous allons développer notre programme de simulation. Le programme développé sous l'environnement COMSOL est structuré comme suit :

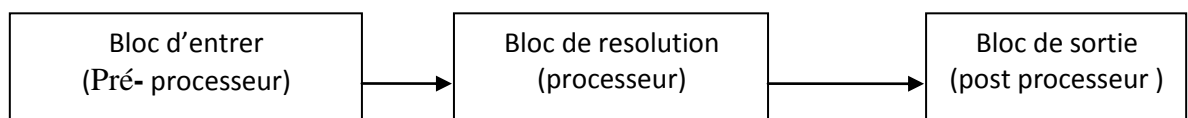


Figure IV.1 Différents blocs du programme

Pour la première application, nous avons choisi une simple représentation d'un aimant permanent avec une induction magnétique $B_r = 1\text{T}$ avec deux orientations différentes selon l'axe x et y les résultats de simulation sont représentés dans les figures suivantes :

-Les résultats de simulation de la figure IV.2 montre les lignes du potentiel scalaire magnétique avec deux polarisations différentes, ces deux polarisations expliquent la constitution des deux pôles d'un aimant permanent nord et sud «N, S»

-Pour la représentation de la distribution du champ magnétique autour de l'aimant permanent on remarque que ce dernier se dirige du pôle nord vers le pôle sud pour les deux types d'aimantation magnétique selon les deux axes x et y.

-Ainsi que l'orientation de l'induction magnétique sera comme celui du champ magnétique dans la même direction, car ces deux grandeurs sont liés physiquement

IV-3 Aimant permanent :

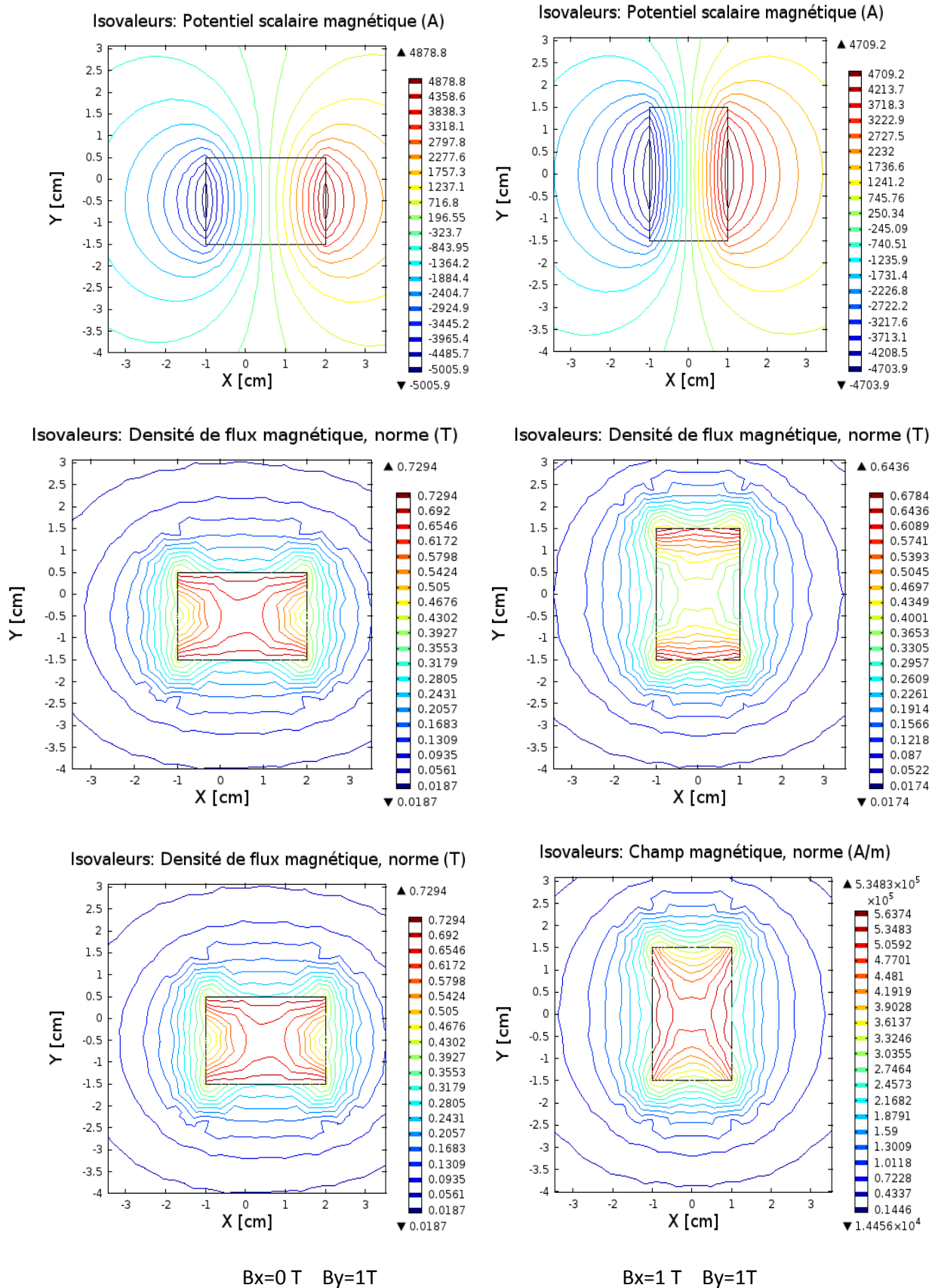


Figure IV.2 Polarisation de l'aimant permanent selon X et Y

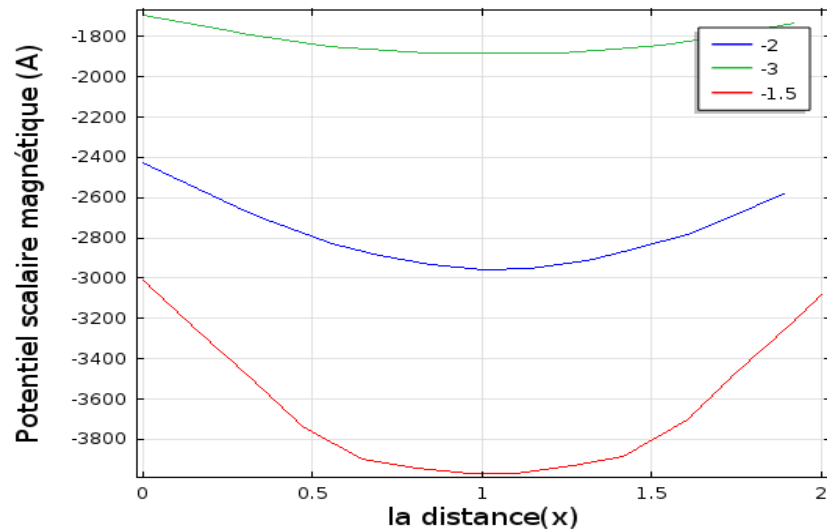


Figure IV.3 Potentiel scalaire magnétique en fonction la distance x

La mesure du potentiel scalaire magnétique en fonction de la distance x pour des trois valeurs différentes on peut conclure a travers ces résultats que: lorsqu'on s'éloigne de l'aimant permanent la valeur du potentiel magnétique se démunie

IV-4 Aimant permanent de forme U:

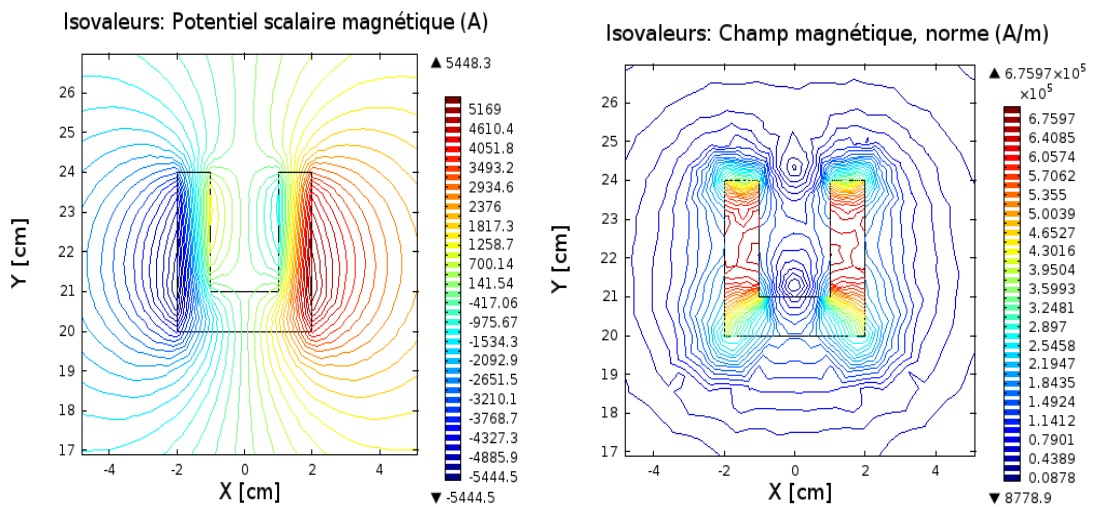


Figure IV.4 Aimant permanent de forme

La variation de la forme ou tout simplement la géométrie de l'aimant permanent sera traduit par une variation du type de la polarisation pour le cas de la forme U qui veut dire c'est une variation dans la distribution des paramètres magnétiques comme les lignes de champ magnétique.

IV-5 Présence d'une particule ferreuses proche d'un aimant permanent :

La présence d'une particule ferreuse proche d'un aimant permanent donnera une variation dans la distribution des lignes de champ magnétique ou proprement dit canalisation des lignes autour de la particules grâce a ses caractéristiques physiques.

IV-5-2 Variation de la distance de la particule selon l'axe X :

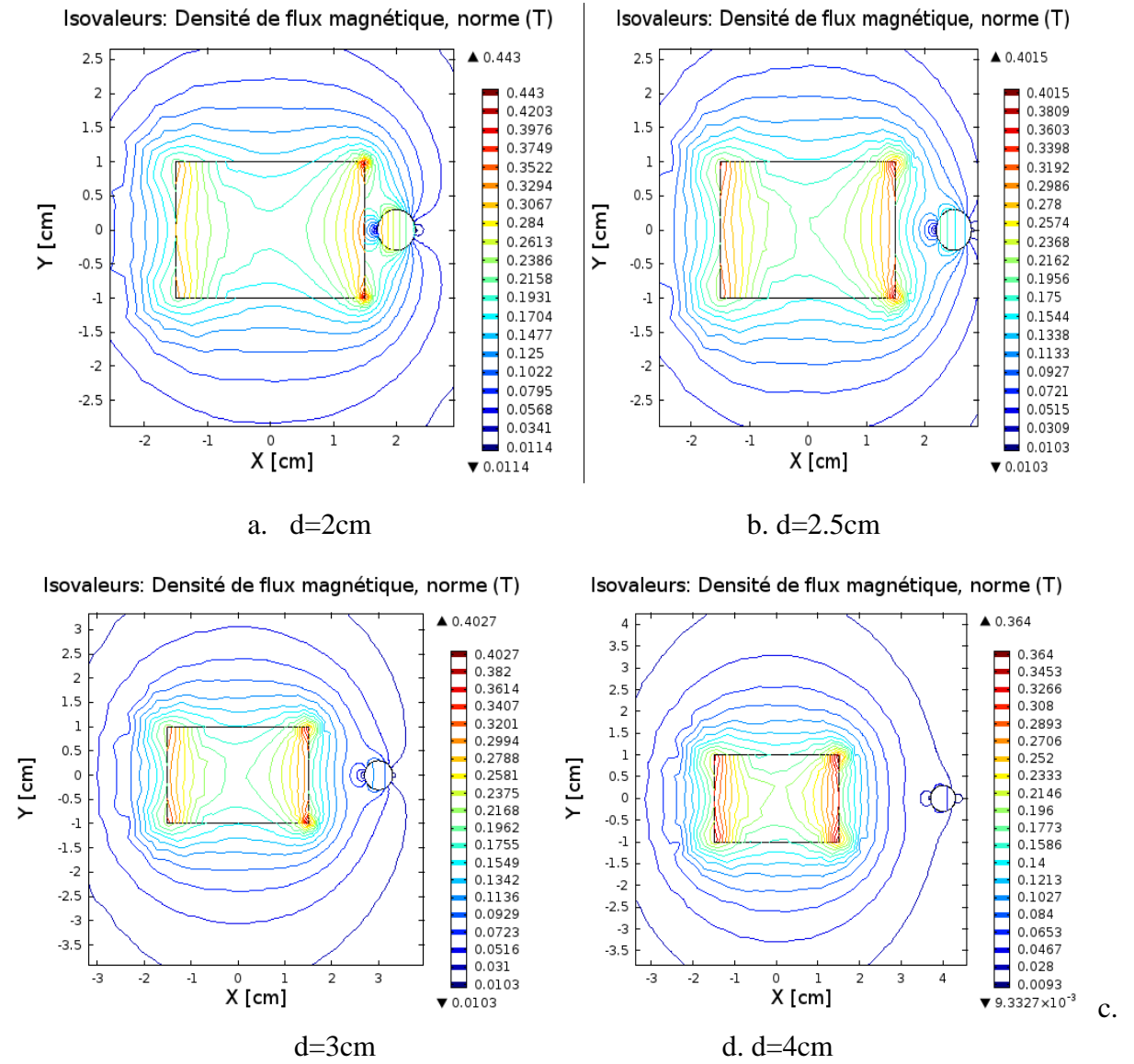


Figure IV.5 Variation de la distance X (cm)

Les résultats précédent de la figure IV.5 montre l'influence de la variation de la distance entre l'aimant permanent et la particule ferreuse. Lorsque la particule est proche de l'aimant il y aura une grande concentration des lignes de champ magnétique autour d'elle, mais si elle se trouve loin de l'aimant il y aura moins des lignes de champ magnétique avec faible concentration.

IV-5-2 Variation de la taille des particules ferreuses:

Pour voir l'influence de la variation de la taille des particules ferreuses nous avons pris quatre particules de différentes tailles dans la même position par rapport a l'aimant les résultats obtenus sont représentés dans la figure suivante :

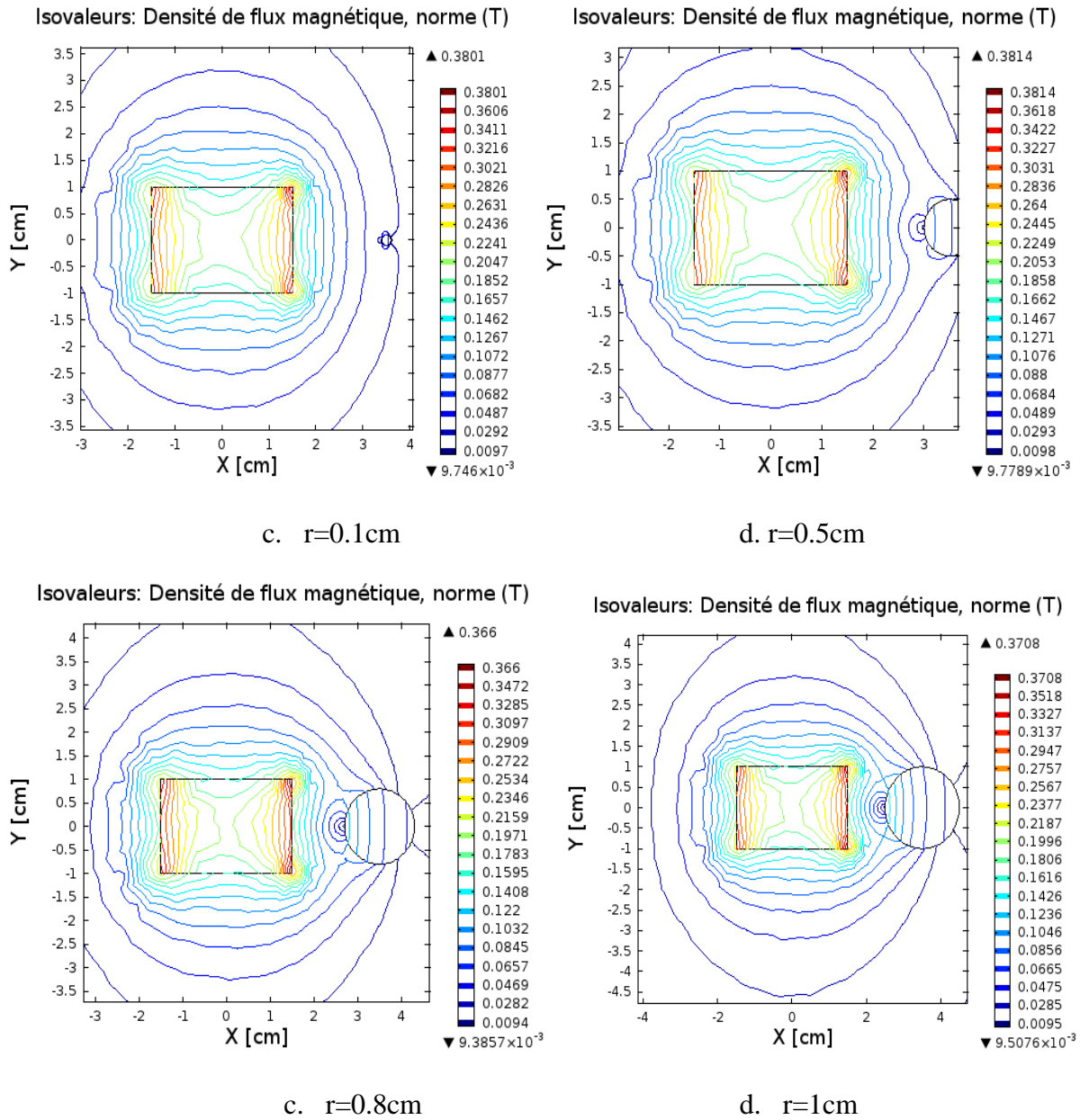


Figure IV.6 Variation du rayon (cm)

La taille de la particule (la surface en 2D et le volume en 3D) influe sur la distribution des lignes grâce a l'interaction magnétique des lignes de champ et les propriétés magnétique soit de la particules (la susceptibilité) ou pour l'aimant permanent (l'intensité de l'induction magnétique).

IV-6 Le calcul de La Force magnétique exercée sur une particule ferreuse :

- Variation de la distance

Pour le calcul de la force magnétique exercée sur une particule ferreuse on a besoin des caractéristiques magnétiques de chaque milieu : l'air, l'aimant, le fer pour créer une liaison magnétique. A travers les calculs obtenus par le logiciel COMSOL on peut calculer les composantes de la force magnétique, selon les deux axes x et y ainsi que la force résultante par le tenseur de maxwell déjà définie dans le logiciel il suffit tout simplement de sélectionner la particule pour établir l'équation de la force :

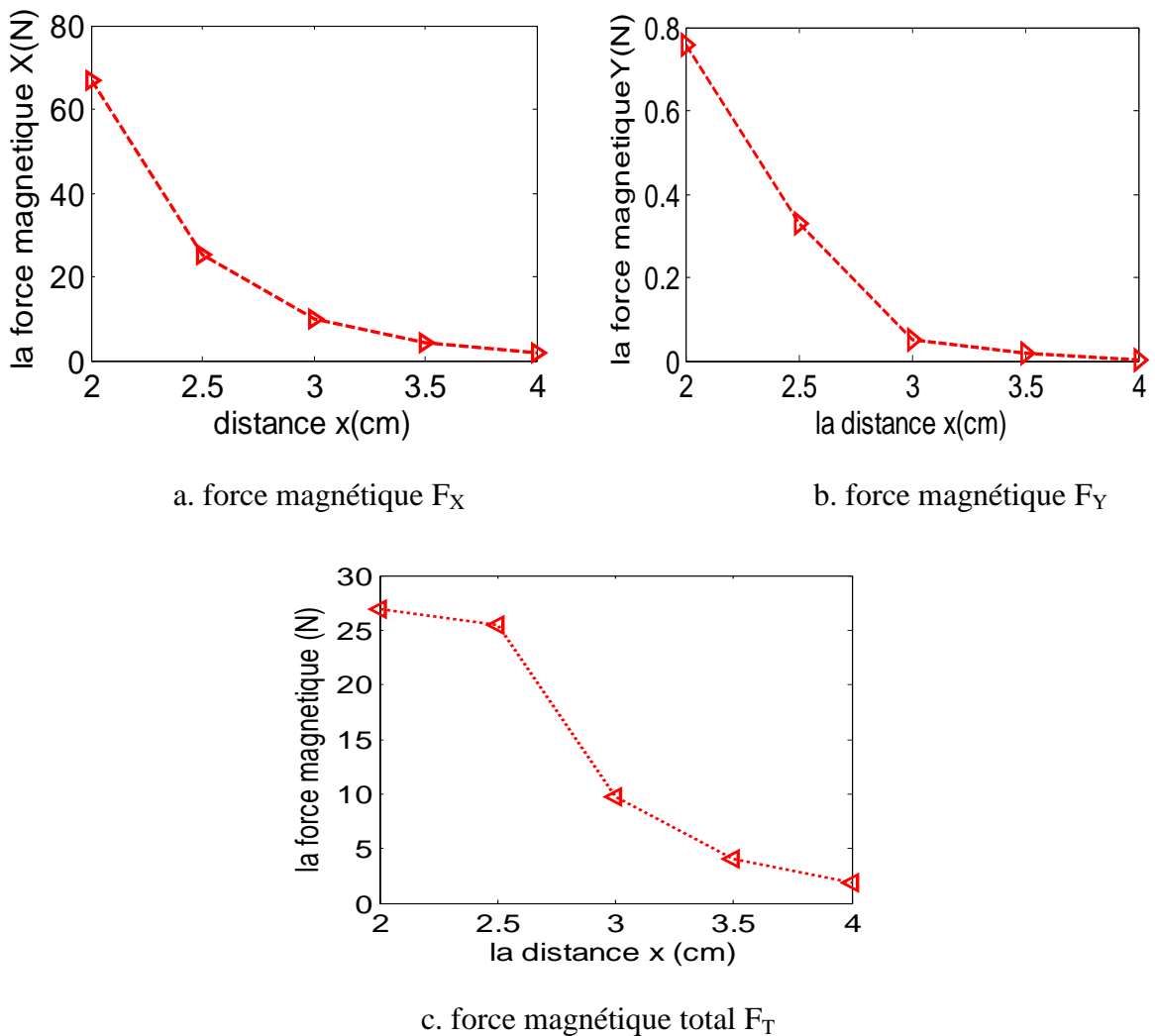


Figure IV.7 Force magnétique en fonction de la distance X

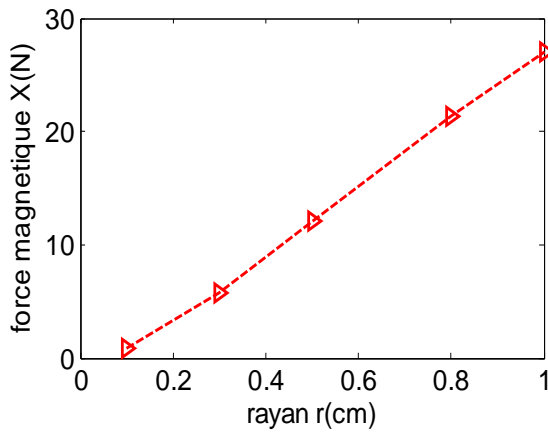
Les résultats de la figure précédente montre l'influence de la variation de la distance déjà vue dans la figure IV.5 par la déformation de la distribution des lignes de champ magnétique ce phénomène sera expliquer physiquement par une force magnétique d'attraction car cette dernière a une liaison avec la concentration des lignes de champ magnétiques.

On peut dire que si la particule ferreuse s'approche de l'aimant ce la donnera une grande force magnétique. Au contraire quand la particule s'éloigne de l'aimant la force sera moins importante et négligeable.

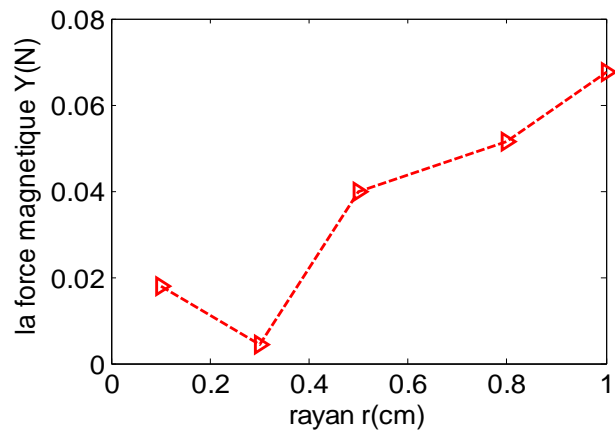
- Variation de la taille

Pour montrer l'influence de la variation de la taille des particules ferreuses déjà vue dans la figure IV.6 par une concentration différente pour chaque taille cela peut être expliquer par les résultats de calcul de la force magnétique monte dans la figure IV.8.

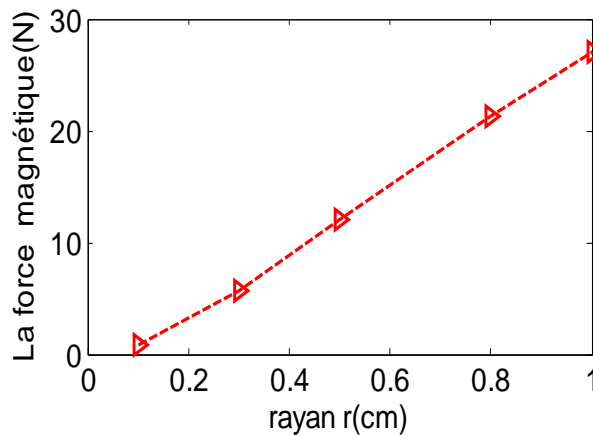
D'après les résultats de la figure IV.6 on trouve que la variation de la taille joue un rôle très important dans la distribution des lignes de champ magnétique et leur concentration, cela va influencer sur l'amplitude de la force magnétique a cause de la surface de la particule.



a. force magnétique X



b. force magnétique Y



c. force magnétique total

Figure IV.8 Force magnétique en fonction de la taille des particules ferreuses

IV-7 Simulation du séparateur magnétique :

Le séparateur déjà défini au premier chapitre, c'est un ensemble des aimants permanents nombre de pair de pole $N=5$ fixés sur la surface d'un tambour amagnétique leur rôle c'est de séparer les particules ferreuses pour la séparation magnétiques et les particules non ferreuses pour la séparation à courant de Foucault.

IV-7-1 Séparateur rotationnel a aimant permanent :

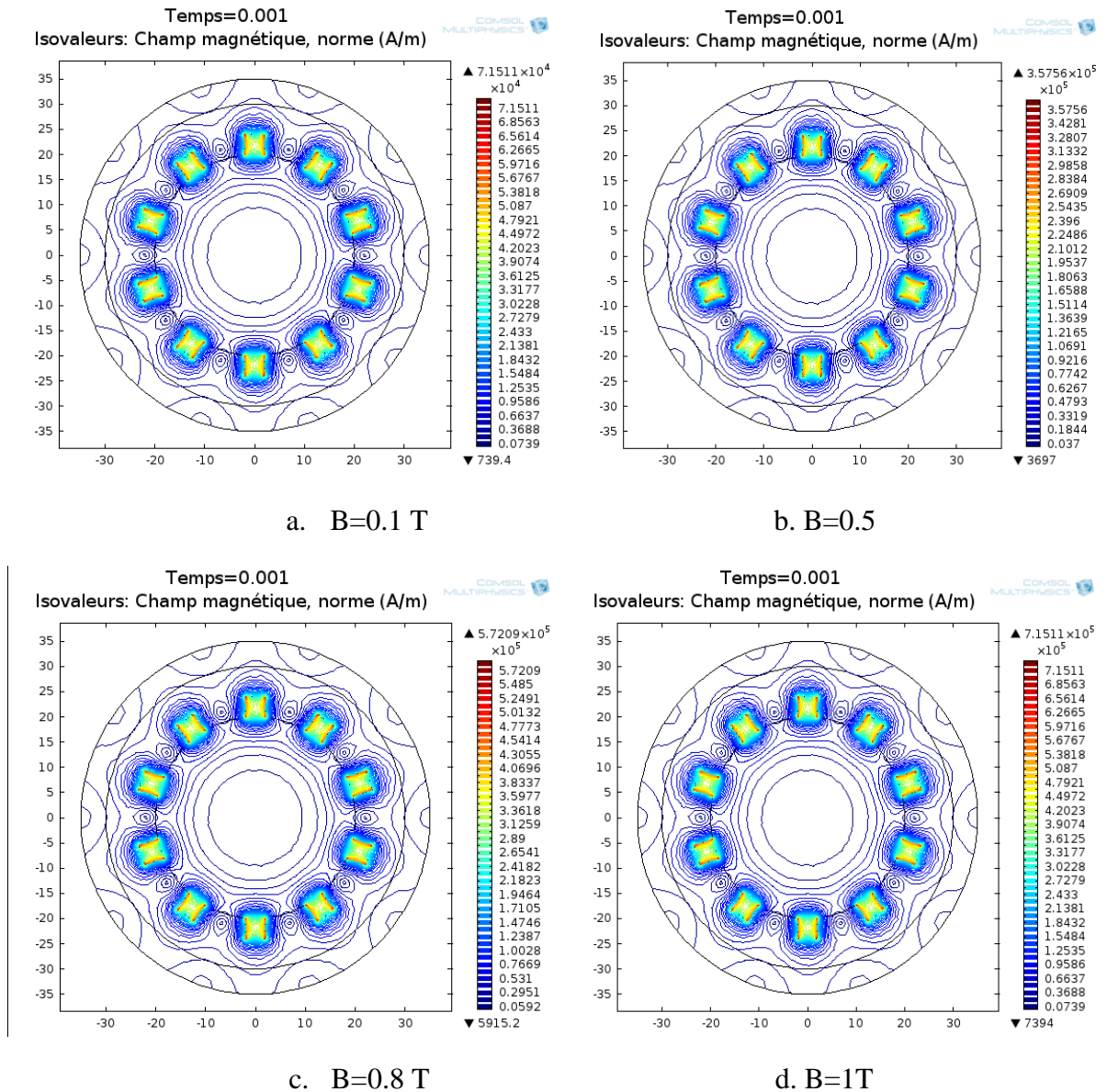


Figure IV.9 Variation de l'induction magnétique B (T).

La structure en 2D est représentée dans la figure IV.9, la simulation de l'ensemble avec différentes valeurs de l'induction magnétique B pour les aimants permanents montre une variation dans l'amplitude du champ magnétique. Cela montre l'influence du choix des

aimants permanents qui joue un rôle très important dans la séparation magnétique et sur le taux de récupération et la pureté des particules triés.

Les mesures de vecteur potentiel magnétique autour du séparateur magnétique a aimant permanent montrés dans la figure IV.10 montre deux alternances une positif et l'autre négative a cause de la polarisation des aimants permanents alternés N-S et la variation du champ magnétique en fonction de la variation de l'induction magnétique des aimants permanents.

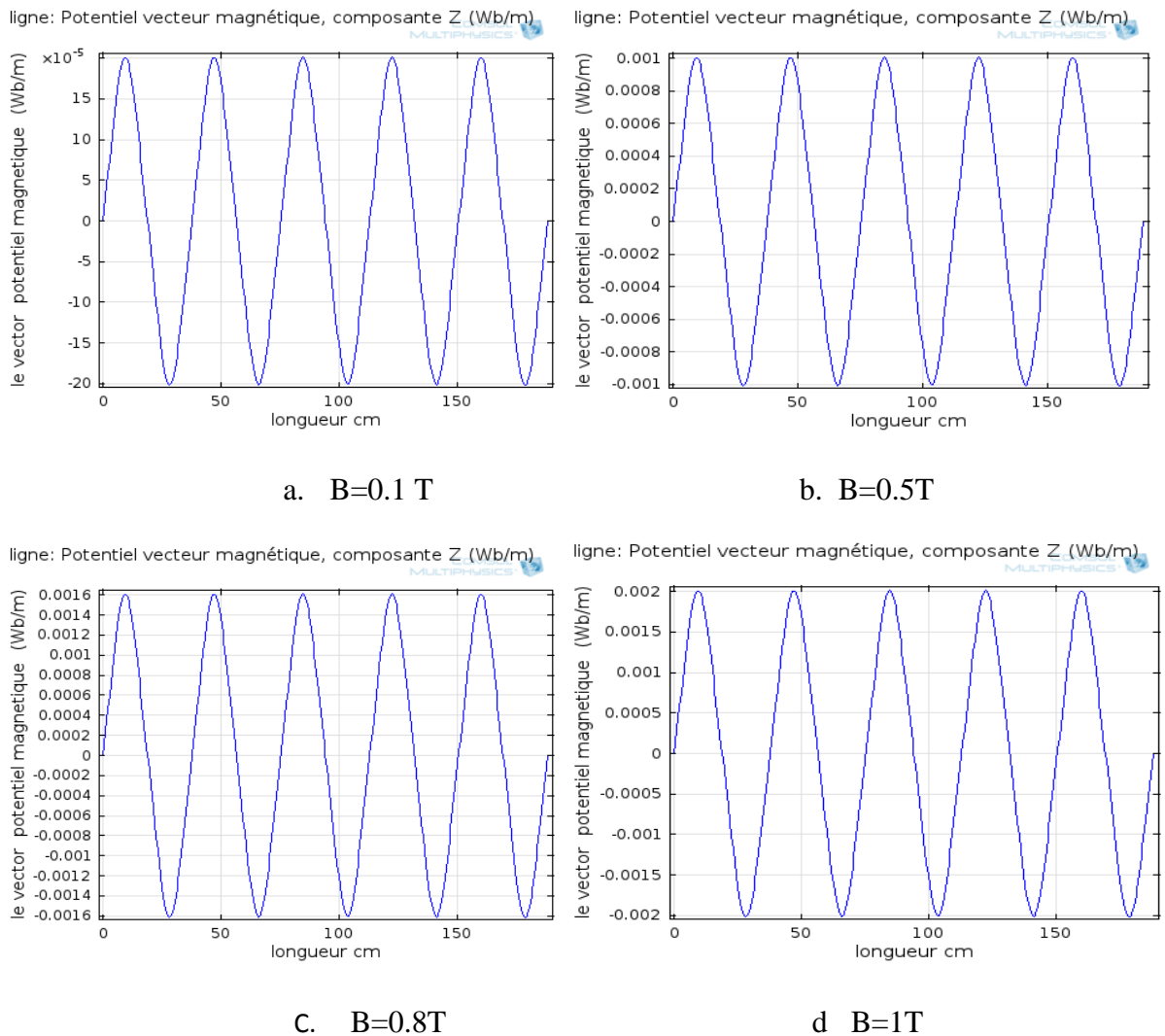


Figure IV.10 Mesure de l'induction magnétique autour du séparateur

IV-9 Conclusion:

Dans ce dernier chapitre nous avons traité la validation du modèle d'un aimant permanent, et nous avons présenté les résultats de simulation, d'où en peut conclure que :

- La présence des particules ferreuses a une grande influence sur les paramètres physiques du magnétisme tels que le champ et l'induction.
- Nous avons également étudié l'influence des paramètres géométriques (taille et distance) sur la distribution du champ magnétique.
- Les résultats de simulation numérique de la force magnétique expliquent bien le phénomène étudié concernant la taille et la distance de la particule par rapport a l'aimant.

Conclusion générale

Dans notre travail nous avons vu les différents types des aimants permanents et leurs caractéristiques magnétiques ou géométriques ainsi que leurs applications, les aimants permanents ont des différentes techniques d'orientation et formes suivant les besoins voulu. Leurs applications est vaste les moteurs alternateurs ...etc l'application étudié dans notre travail est particulièrement la séparation magnétique.

Dans un premier temps, nous avons donné une brève présentation des aimants permanents, ainsi que une simple modélisation mathématique sous forme d'équation EDP la résolution de cette dernière sera fait par la méthode numérique proposée est une extension du principe de grandeurs électromagnétiques couplées pour les systèmes symétriques contenant des milieux magnétiques. La compréhension des phénomènes physiques, mis en jeu, est l'étape principale de l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la conception des machines et des séparateurs magnétiques.

Le modèle développé est d'une grande utilité pour la modélisation des dispositifs à aimants permanents. Il est capable de traiter toutes les configurations géométriques constituées avec des aimants permanents tels que les moteurs.

Nous avons montré l'influence des différents paramètres qui s'introduisent dans l'interaction entre le séparateur magnétique et la particule ferreuse, comme la distance la taille des particules et l'aimantation des aimants. Ceci a été réalisé d'une manière numérique à l'aide du logiciel COMSOL pour le cas magnétostatique en 2D.

La technique de séparation magnétique peut être utilisée pour trier les différents métaux ferreux et non ferreux à l'aide des aimants permanents dans le secteur industriel avec des techniques différents comme l'attraction magnétique et les courants de Foucault avec des géométries différentes.

Référence

CHAPITRE I

- [1] Fichier technique "éclairage scientifique" apprendre se reprer, de la boussole au satellite @ hatier 2006
- [2] Frédéric bloch. "source de champ intense 4 tesla a aimants permanents". thèse de doctorat .electric power. institut national polytechnique de grenoble - inpg, 1999. french.
- [3] Soltane belakehal "conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux energies renouvelables" thèse de doctorat. en sciences spécialité électrotechnique de l'université de constantine 10/06/2010.
- [4] fichier technique "aimants permanents" laboratoire d'actionneurs (lai) ecole poytechnique federale de lausanne
- [5] Yacine massaoude "contribution à la modélisation multi-physique des générateurs électriques linéaires." mémoire de magister . en electrotechnique de l'université de tizi-ouzou 30/9/2012
- [6] Ounnadi mohammed "elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimant permanents" mémoire de magister .ingénieur d'état en electrotechnique de l'université de tizi-ouzou ,07 / 04 / 2011
- [7] Luc lechevallier d 2102 " aimants permanents applications et perspectives " article l'université de cergy-pontoise. techniques de l'ingénieur. 12/09/2014.
- [8] www.blsmagnet.com. " séparation magnétique sépareurs pour métaux ferreux et non ferreux" magnet attractive thechnology
- [9] www.aimants-goudsmit.com "séparateurs magnétiques pour le recyclage"..goudsmit magnetic systemes .poussés par le magnétisme depuis 1959
- [10] Leprince-ringuetd2100. " aimants permanents matériaux et applications" ingénieur de l'école nationale supérieure de chimie de paris techniques de l'ingénieur français 10/06/1990
- [11] Gérard gillet " séparation magnétique théorie et modélisation" *ingénieur ensg de nancy .laboratoire environnement et minéralurgie* techniques de l'ingénieur .français

CHAPITRE II

- [12] Hicham allag" modèles et calcul des systèmes de suspension magnétique passive-développements et calculs analytiques en 2d et 3d des interactions entre les aimants permanents –" thèse de docteur de l'université de grenoble.21 juin 2010

[13] Ryma delimi "méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique. application aux paliers magnétiques "mémoire de magister en electrotechnique. universite mentouri – constantine 2008

CHAPITRE III

[14] Fichier technique "cours de modélisation numérique gch2535 tutoriel comsol multiphysics" école polytechnique de montréal.

[15] www.comsol.com. introduction to comsol multiphysics

الملخص:

المغناطيس دائم لها خصائص مغناطيسية والهندسية. تطبيقاته تتوسع العديد من مولدات محركات ... الخ التطبيق المدرس في عملنا هو الفصل المغناطيسي بشكل خاص. النمذجة الرياضية كما EDP حلولها تكون علي طريقة عددية من أجهزة المغناطيس الدائم.

وكان الهدف هو إظهار تأثير المتغيرات المختلفة التي تدخل في التفاعل بين فاصل المغناطيسي والجسيمات الحديدية، مثل حجم الجسيمات ومغطة المغناطيس. وقد تحقق ذلك بطريقة رقمية باستخدام البرنامج "COMCOL"

لحالة مغناطيس ثنائي الأبعاد

الكلمات الدالة:

المغناطيس الدائم، العناصر المحدودة ، COMSOL ، القوة المغناطيسية .

Résumé:

Les aimants permanents ont des caractéristiques magnétiques et géométriques. leurs applications est vaste les moteurs alternateurs ...etc. l'application étudié dans notre travail est particulièrement la séparation magnétique. La modélisation mathématique sous forme d'équation EDP et résolution par la méthode numérique des dispositifs à aimants permanents. L'objectif était de montrer l'influence des différents paramètres qui s'introduisent dans l'interaction entre le séparateur magnétique et la particule ferreuse, comme la distance la taille des particules et l'aimantation des aimants. Ceci a été réalisé d'une manière numérique à l'aide du logiciel COMSOL pour le cas magnétostatique en 2D.

Mot clé :

aimant permanent, éléments finis, COMSOL, force magnétique.

Abstract:

The permanent magnets have magnetic and geometrical characteristics. their applications is vast the engines alternators... etc the application studied in our work is particularly magnetic separation. The Mathematical modeling form of devise by equation EDP and resolution from the numerical method, of the permanent magnets. The objective was to show the influence of the various parameters which are introduced into the interaction between the magnetic separator and the ferrous particle, as the distance size of the particles and the magnetization of the magnets. This was carried out in a numerical way using software COMSOL for the magnetostatic case in 2D.

Keyword:

permanent magnet, finite elements, COMSOL, magnetic force.