



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

Université Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Electrotechnique

N° de série :151/DS/2019
N° d'ordre :02/ELech/2019

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: ELECTROTECHNIQUE

Option : ELECTROTECHNIQUE

Présentée par :

OUILI Mehdi

Magister en Electrotechnique

Thème

**Optimisation du Profil de l'Induction Magnétique Pour
Application de la Séparation des Particules non Homogènes en
Voies Sèche et Humide.**

Soutenue le: 25/09/2019

Devant le jury composé de:

| | | | |
|---------------|-----------------|------|-----------------------------|
| Président | A. BOUZID | Prof | Université FM Constantine 1 |
| Rapporteur | R. MEHASNI | Prof | Université FM Constantine 1 |
| Co-rapporteur | M. FELIACHI | Prof | Université de Nantes France |
| Examineur | M. R. MEKIDECHE | Prof | Université de Jijel |
| Examineur | S. M. MIMOUNE | Prof | Université de Biskra |
| Examineur | R. BOUZERARA | MCA | Université FM Constantine 1 |
| Invité : | M.E.H. LATRECHE | Prof | Université FM Constantine 1 |

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse de doctorat ont été réalisés moyennant une co-direction effectuée au sein de deux laboratoires, le laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (LEC), Université des frères Mentouri Constantine 1, Algérie, et l'Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique (IREENA) de l'Université de Nantes, France. Cette collaboration a été réalisée dans le cadre des accords programmes Franco-Algériens PROFAS B+.

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout ce dont j'avais besoin pour l'accomplissement de cette thèse.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse Monsieur Rabia MEHASNI, Professeur au département d'électrotechnique de l'université des frères Mentouri Constantine 1, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux et pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir fait bénéficier de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, et de son dynamisme. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui.

Je tiens également à remercier mon codirecteur de thèse Monsieur Mouloud FELIACHI, Professeur Emérite à l'Université de Nantes, pour m'avoir accueilli au sein de laboratoire IREENA à Saint-Nazaire. Je lui suis également très reconnaissant pour le temps qu'il m'a accordé, pour ses qualités pédagogiques et scientifiques, pour sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés. Qu'il soit assuré de mon attachement et de ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier Monsieur Aissa BOUZID, Professeur au département d'électrotechnique à l'université des frères Mentouri Constantine 1, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Je remercie Monsieur Mohamed Rachid MEKIDECHE, Professeur à l'université de Jijel pour l'honneur qui nous a fait par l'acceptation participer à ce jury et d'examiner ce mémoire de thèse.

Je remercie Monsieur Sourî Mohamed MIMOUNE, Professeur à l'université de Biskra, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de participer à ce jury et d'examiner ce mémoire de thèse.

Je remercie Monsieur Ramdane BOUZERARA, Professeur à l'université des frères Mentouri Constantine 1, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de participer à ce jury et d'examiner ce mémoire de thèse.

Je remercie Monsieur Mohamed El Hadi LATRECHE, Professeur au département d'électrotechnique à l'université des frères Mentouri Constantine 1, pour l'intérêt qu'il a manifesté à mon travail, et en participant en qualité de membre invité à ce jury.

Je tiens à remercier :

- *Monsieur El Khider SIAHMED, Professeur à l'école polytechnique de Nantes, France,*
- *Monsieur Housseem Rafik El Hana BOUCHEKARA, Professeur à l'université Hafr Al-Batin, Arabie Saoudite,*
- *Monsieur Hichem ALLAG, Professeur à l'université de Jijel, Algérie.*
- *Monsieur Gérard BERTHIAU, Professeur à l'université de Nantes, France.*

qui ont participé à ce travail par leurs compétences immenses qui m'ont permis de gagner un temps énorme et d'éviter des calculs inutiles et surtout pour leur sympathie.

Mes remerciements les plus distingués vont mes enseignants de l'université des frères Mentouri Constantine 1 pour les contributions inestimables à ma formation et pour le savoir qu'ils m'ont inculqué.

Je pense aussi à toute les personnes avec lesquels j'ai eu le plaisir de travailler tout au long de cette thèse, Abdelbaki CHAROUANA, Ahmed BOUFEDAH-BADISSI, Abderraouf BOUMESSATA, Abdelfettah BOUSSAID, Mohamed Amine MOUSSA, Seif CHELLI, Ibrahim AZZABI...

Je remercie également mes collègues de la SARL Cirta céramique à Constantine, Nabil KHETTABI, Lamine LOUCIF, Djamel GUELLOUR, Riad SAADA, Abdesselem AOUATI Farouk NINI...

Je remercie mon ami, Nour eddine NEDJAR, que je le considère comme frère pour son intérêt permanent à mon égard et pour son soutien sur le plan humain.

Je remercie tout spécialement toute ma famille en commençant par mes parents pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, mes frères Azzedine, Ahmed et, Fethi, et mes sœurs Mouna, Ouahiba et Nassira.

Table de Matières

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENTS | I |
| TABLES DES MATIERES | III |
| LISTE DES FIGURES | VI |
| LISTE DES TABLEAUX | IX |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| 1 ETATS DE L'ART SUR LA SEPARATION MAGNETIQUE | 6 |
| 1.1 INTRODUCTION | 6 |
| 1.2 CLASSIFICATION DES SEPARATEURS MAGNETIQUES..... | 6 |
| 1.2.1 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI) | 7 |
| 1.2.2 Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI) | 7 |
| 1.2.3 Séparateur magnétique à haut gradient de champ (SMHG) | 8 |
| 1.2.3.1 Séparateur magnétique à champ à gradient ouvert | 8 |
| 1.2.3.2 Séparateur à tambour | 8 |
| 1.2.3.3 Séparateur magnétique à matrice d'extraction | 9 |
| 1.3 SEPARATION MAGNETIQUE PAR COURANTS DE FOUCAULT | 9 |
| 1.3.1 Classification des séparateurs magnétiques à courants de Foucault..... | 11 |
| 1.3.1.1 Séparateurs magnétiques à base des électroaimants..... | 11 |
| 1.3.1.1.1 Séparateurs magnétiques à base des électroaimants rotatifs..... | 11 |
| 1.3.1.1.2 Séparateurs magnétiques à base des électroaimants fixes | 12 |
| a) Séparateur magnétique par moteur à induction linéaire (LIM)..... | 12 |
| b) Séparateur magnétique à haute fréquences (HF ECS) | 12 |
| 1.3.1.2 Séparateurs magnétiques à base des aimants permanents | 13 |
| a) Système à double aimant | 13 |
| b) Séparateur magnétique à rampe coulissante (à table inclinée) | 13 |
| c) Séparateur vertical à courant de Foucault (VECS) | 14 |
| d) Séparateurs à disques rotatifs (RDS) | 14 |
| e) Séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal (HDECS).. | 14 |
| f) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS)..... | 15 |
| g) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour Vertical (VDECS) | 16 |
| h) Séparateur à tambour magnétique en voie humide | 16 |
| 1.4 APPLICATIONS DE LA SEPARATION MAGNETIQUE A COURANTS DE FOUCAULT..... | 17 |
| 1.5 HISTORIQUE SUR LA SEPARATION MAGNETIQUE A COURANTS DE FOUCAULT | 17 |
| 1.6 OBJECTIF DE NOTRE THESE ET DISPOSITIF DE SEPARATION PROPOSE..... | 21 |
| 2 MODELISATION D'UN SEPARATEUR A TAMBOUR MAGNETIQUE | 24 |
| 2.1 INTRODUCTION | 24 |
| 2.2 MODELISATION D'UN SEPARATEUR MAGNETIQUE A TAMBOUR A AIMANTS PERMANENTS | 24 |
| 2.2.1 Grandes classes de matériaux pour aimants permanents | 24 |
| 2.2.2 Modélisation du problème de la séparation à tambour magnétique | 27 |
| 2.2.2.1 Modèle mathématique régissant le problème magnétique | 27 |
| 2.2.2.1.1 Champ magnétique appliqué et équation du modèle | 27 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.2.1.2 | Forces d'origines magnétiques appliquées aux particules..... | 30 |
| a) | <i>Force appliquée à la particule magnétique.....</i> | 30 |
| b) | <i>Force inter particulaires (Dipôle-Dipôle) entre particules</i> | 32 |
| c) | <i>Force appliquée à la particule conductrice</i> | 33 |
| 2.2.2.2 | Modèle mathématique régissant le problème hydraulique | 33 |
| 2.2.2.2.1 | Equation et type de l'écoulement du liquide traité | 34 |
| a) | <i>Equation de Navier Stokes.....</i> | 34 |
| b) | <i>Equation de continuité.....</i> | 35 |
| 2.2.2.2.2 | Forces d'origine hydraulique appliquées sur les particules | 35 |
| a) | <i>Force de gravité.....</i> | 36 |
| b) | <i>Force d'Archimède.....</i> | 36 |
| c) | <i>Force de traînée.....</i> | 36 |
| d) | <i>Force de portance.....</i> | 36 |
| e) | <i>Force de Masse ajoutée.....</i> | 37 |
| 2.2.2.3 | Modèle mathématique régissant le problème dynamique particulaire | 38 |
| 2.3 | MODELE MATHEMATIQUE REGISSANT LE PROBLEME GLOBAL | 38 |
| a) | <i>Séparation magnétique en voie sèche.....</i> | 38 |
| b) | <i>Séparation magnétique en voie humide.....</i> | 38 |
| 2.4 | METHODE DE RESOLUTION | 39 |
| 2.4.1 | Principe de la méthode des éléments finis | 39 |
| 2.4.2 | Mise en œuvre de la méthode des éléments finis..... | 40 |
| 2.4.2.1 | Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis et fonction d'interpolation | 40 |
| 2.4.2.2 | Formulation intégrale et équation algébrique..... | 42 |
| 2.4.2.3 | Résolution numérique des systèmes d'équations algébriques..... | 45 |
| 2.5 | OUTILS DE CALCUL UTILISES | 45 |
| 2.5.1 | Modèle magnétique..... | 45 |
| 2.5.2 | Modèle hydraulique | 45 |
| 2.5.3 | Modèle dynamique particulaire | 46 |
| 2.5.4 | Résolution du problème global | 47 |
| 2.6 | CONCLUSION | 48 |
| 3 | SIMULATION DE LA SEPARATION DE PARTICULES NON HOMOGENES ET OPTIMISATION DU SEPARATEUR PROPOSE..... | 50 |
| 3.1 | INTRODUCTION | 50 |
| 3.2 | DISPOSITIF DE SEPARATION ETUDIE ET SPECIFICATION DU CHAMP APPLIQUE..... | 51 |
| 3.3 | JUSTIFICATION DE LA RESOLUTION 2D DU PROBLEME DE LA SEPARATION | 51 |
| 3.4 | CALCUL DES GRANDEURS ELECTROMAGNETIQUES DANS LE SEPARATEUR MAGNETIQUE PROPOSE | 53 |
| 3.4.1 | Distribution du potentiel vecteur et induction magnétiques | 53 |
| 3.4.2 | Forces d'origine magnétique appliquées aux particules métalliques | 54 |
| 3.4.2.1 | Force appliquée aux particules ferromagnétiques | 54 |
| 3.4.2.2 | Force appliquée aux particules conductrices | 55 |
| 3.4.2.3 | Force appliquée aux particules dia et paramagnétiques | 56 |
| 3.5 | VERIFICATION DE LA NATURE DU CHAMP ET DES GRANDEURS MAGNETIQUES GENERE PAR LE TAMBOUR | 57 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5.1 | Potentiel vecteur magnétique | 57 |
| 3.5.2 | Induction magnétique..... | 58 |
| 3.5.3 | Force électromotrice induite dans une bobine située au-dessus du tambour | 60 |
| 3.5.4 | Courants induits dans une particule conductrice soumise au champ généré | 61 |
| 3.5.5 | Force de Lorentz appliquée aux particules conductrice..... | 61 |
| 3.6 | VERIFICATION DES PERFORMANCES DU SEPARATEUR PROPOSE | 62 |
| 3.6.1 | Séparation magnétique en voie sèche | 62 |
| 3.6.1.1 | Trajectoires des particules conductrices et efficacité de séparation | 63 |
| 3.6.1.2 | Trajectoires des particules ferromagnétiques et efficacité de séparation | 67 |
| 3.6.1.3 | Trajectoires des particules paramagnétique et diamagnétique | 70 |
| 3.6.1.4 | Conclusion..... | 71 |
| 3.6.1.5 | Optimisation du séparateur proposé | 71 |
| | a) <i>Fonction objectif</i> | 71 |
| | b) <i>Méthode de minimisation appliquée</i> | 72 |
| | c) <i>Résultats de l'optimisation</i> | 74 |
| 3.6.2 | Séparation magnétique en voie humide | 75 |
| 3.6.2.1 | Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal..... | 75 |
| 3.6.2.2 | Trajectoire des particules conductrices et efficacité de la séparation..... | 77 |
| 3.6.2.3 | Trajectoire des particules ferromagnétiques et efficacité de la séparation | 80 |
| 3.6.2.4 | Trajectoires des particules paramagnétiques et diamagnétiques | 81 |
| 3.6.2.5 | Optimisation du séparateur proposé en voie humide..... | 82 |
| 3.7 | CONCLUSION | 84 |
| 4 | ESSAIS PRATIQUES ET VALIDATION EXPERIMENTALE..... | 86 |
| 4.1 | IDENTIFICATION DE L'AIMANTATION DES AIMANTS PERMANENTS UTILISES | 86 |
| 4.2 | VERIFICATION DE LA NATURE DU CHAMP MAGNETIQUE APPLIQUE | 90 |
| 4.3 | VERIFICATION EXPERIMENTALE DE LA SEPARATION SIMULTANEE DES PARTICULES MAGNETIQUES ET CONDUCTRICES..... | 92 |
| 4.3.1 | Prototype réalisé et protocole expérimental..... | 93 |
| 4.3.2 | Vérification de la séparation des particules magnétiques | 94 |
| 4.3.2.1 | Particules ferromagnétiques | 94 |
| 4.3.2.2 | Particules dia et paramagnétiques..... | 97 |
| 4.3.2.3 | Séparation des particules conductrices | 99 |
| 4.4 | CONCLUSION | 102 |
| | CONCLUSION GENERALE..... | 102 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 102 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1. Schéma de principe de la séparation magnétique [Gillet 2003]. | 6 |
| Figure 1.2. Tube magnétique à aimant permanent (ferrites, terres rares) [Mehasni 2007]. | 7 |
| Figure 1.3. Séparateur à haute intensité en voie humide type Jones [Gillet 2003]. | 7 |
| Figure 1.4. Séparateur magnétique à haut gradient à bobinage de cuivre [Gillet 2004]. | 8 |
| Figure 1.5. Séparateur supraconducteur à haut gradient à tambour Discos [Gillet 2004]. | 9 |
| Figure 1.6. Séparateur à haut gradient en voie humide à matrice d'extraction [Gillet 2004]. | 9 |
| Figure 1.7. Principe de la séparation par courants de Foucault [Herbulot 2001]. | 10 |
| Figure 1.8. Séparateur magnétique à courant de Foucault [Edison 1889]. | 11 |
| Figure 1.9. Séparateur magnétique à base de moteurs linéaires à induction [Morey 1979]. | 12 |
| Figure 1.10. Séparateur magnétique à haute fréquence [Smith 2019]. | 12 |
| Figure 1.11. Séparateur magnétique double aimant [Campbell 2003]. | 13 |
| Figure 1.12. Séparateur magnétique à rampe coulissante [Schloemann 1982]. | 13 |
| Figure 1.13. Séparateur à disque rotatif, (a) Vue de face, (b) Vue de côté [Braam 1988]. | 14 |
| Figure 1.14. Séparateur à courants de Foucault à tambour horizontal [Ruan 2016b]. | 15 |
| Figure 1.15. Séparateur à courants de Foucault à tambour incliné [Lung 2002]. | 15 |
| Figure 1.16. Séparateur à courants de Foucault à tambour vertical [Lung 2001]. | 16 |
| Figure 1.17. Séparateur à courants de Foucault à tambour en voie humide [Gillet 2003]. | 17 |
| Figure 1.18. Tambour magnétique utilisé pour la conception du séparateur. | 22 |
| | |
| Figure 2.1. (a) Courbe de désaimantation typique d'un aimant permanent [Le Breton 2009], (b) Courbes de désaimantation des différents types d'aimants permanents [Lechevallier 2007]. | 25 |
| Figure 2.2. Système de deux particules sphériques aimantées voisines [Ku 2016]. | 32 |
| Figure 2.3. Schéma de principe du séparateur utilisé. | 33 |
| Figure 2.4. Maillage du domaine d'étude en éléments finis triangulaires. | 40 |
| Figure 2.5. Élément type. | 41 |
| | |
| Figure 3.1. Domaine d'étude 2D du tambour magnétique. | 51 |
| Figure 3.2. Variation de l'induction magnétique le long d'une ligne située au-dessus du tambour. | 51 |
| Figure 3.3. Domaine d'étude 2D (a), Domaine d'étude 3D (b). | 52 |
| Figure 3.4. Variation de l'induction le long de la ligne horizontale (a), Variation de l'induction le long de la ligne verticale (b). | 52 |
| Figure 3.5. Distribution du potentiel vecteur magnétique \vec{A} (a), Distribution de l'induction magnétique (b). | 53 |
| Figure 3.6. Distribution de la force appliquée aux particules magnétiques. | 54 |
| Figure 3.7. Résultante de la force appliquée sur une particule ferromagnétique. | 55 |
| Figure 3.8. Variation de la force magnétique en fonction de la distance entre la particule et le tambour. | 55 |
| Figure 3.9. Résultante de la force de Lorentz appliquée sur une particule conductrice. | 56 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.10. Résultante de la force magnétique appliquée aux particules dia et paramagnétiques. a) paramagnétique, b) diamagnétique. | 56 |
| Figure 3.11. Variation du potentiel vecteur magnétique en fonction du temps pour différents cas de nombre d'aimants. (a) 8pôles, (b) 6pôles, (c) 4pôles, (d) 2 pôles. | 57 |
| Figure 3.12. Variation des composantes de l'induction magnétique pour tour complet de rotation du tambour en fonction du temps. (a) 8pôles, (b) 6pôles, (c) 4pôles, (d) 2 pôles. | 58 |
| Figure 3.13. Variations du potentiel vecteur magnétique en fonction du temps. (a) $n=2000\text{tr/min}$, (b) $n=1000\text{tr/min}$ | 59 |
| Figure 3.14. Variations de la force électromotrice induite en fonction du temps. (a) cas de tambour à 8 pôles, (b) cas de tambour à 4 pôles. | 60 |
| Figure 3.15. Variation de la densité des courants induits en fonction du temps, (a) cas du tambour à 8 pôles, (b) cas de 6 pôles, (c) cas de 4 pôles, (d) cas de 2 pôles. | 61 |
| Figure 3.16. (a) Variations de la densité de flux magnétique, (b) Variations de la force de Lorentz, $n=3000\text{tr/min}$, 8pôles. | 62 |
| Figure 3.17. Schéma de principe du séparateur proposé pour le traitement en voie sèche. | 63 |
| Figure 3.18. Trajectoires d'une particule conductrice (a) cas de tambour à 8 pôles, (b) cas de 6 pôles, (c) cas de 4 pôles, (d) cas de 2 pôles. | 64 |
| Figure 3.19. Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes vitesses de rotation du tambour. | 65 |
| Figure 3.20. Trajectoires des particules conductrices de différentes tailles. | 65 |
| Figure 3.21. Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes vitesses du tapis. | 66 |
| Figure 3.22. Variation de la distance de séparation en fonction de : (a) Nombre de pôles, (b) Vitesse de rotation du tambour, (c) Taille de la particule, (d) Vitesse du tapis. | 67 |
| Figure 3.23. Trajectoires des particules ferromagnétiques en fonction du nombre de pôles. (a) 8 pôles, (b) 6 pôles, (c) 4 pôles, (d) 2 pôles. | 68 |
| Figure 3.24. Trajectoires d'une particule ferromagnétique en fonction de la vitesse de rotation du tambour. | 69 |
| Figure 3.25. Trajectoires de la particule ferromagnétique en fonction de la vitesse linéaire du tapis. (a) Tambour à 8 pôles, (b) Tambour à 4 pôles. | 69 |
| Figure 3.26. Trajectoires de la particule paramagnétique. | 70 |
| Figure 3.27. Trajectoires des particules para et diamagnétiques en fonction de la vitesse du tapis. | 70 |
| Figure 3.28. Forme géométrique du séparateur à optimiser et condition d'optimisation. | 72 |
| Figure 3.29. Trajectoire obtenu par les paramètres obtenus par l'optimisation. | 74 |
| Figure 3.30. Schéma de principe du séparateur proposé pour les traitements de séparation en voie humide. | 75 |
| Figure 3.31. Distributions des grandeurs hydrauliques dans le canal. (a) Champ de vitesse d'écoulement (b) Nombre de Reynolds, (c) Profil de vitesse. | 76 |
| Figure 3.32. Profil de vitesse calculé au milieu du canal. | 76 |
| Figure 3.33. Trajectoires d'une particule conductrice (a) 8 pôles, (b) 6 pôles, (c) 4pôles, (d) 2 pôles. | 77 |
| Figure 3.34. Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes vitesses de rotation du tambour. | 78 |
| Figure 3.35. Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes vitesses moyennes de l'écoulement. | 79 |
| Figure 3.36. Trajectoires d'une particule conductrice de différentes tailles. | 79 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3.37. Trajectoires d'une particule ferromagnétique..... | 80 |
| Figure 3.38. Trajectoires d'une particule ferromagnétiques pour différents vitesses moyennes du liquide..... | 81 |
| Figure 3.39. Trajectoires d'une particule paramagnétique..... | 81 |
| Figure 3.40. Trajectoires d'une particule paramagnétique pour plusieurs vitesses du liquide. | 82 |
| Figure 3.41. Forme géométrique du séparateur à optimiser..... | 82 |
| Figure 3.42. Trajectoire obtenu par les paramètres obtenus par l'optimisation. | 83 |
| | |
| Figure 4.1. Banc de mesure de l'induction magnétique générée par l'aimant permanent. | 86 |
| Figure 4.2. Lignes de mesure de l'induction magnétique..... | 87 |
| Figure 4.3. Variation de l'induction magnétique le long des lignes de mesure considérées. | 87 |
| Figure 4.4. Lieux de mesure de l'induction magnétique. | 88 |
| Figure 4.5. Variation de l'induction magnétique, (a) sur la ligne 1, (b) sur la ligne 2 | 89 |
| Figure 4.6. Dispositif utilisé pour la mesure et la visualisation de la force électromotrice induite par le champ généré..... | 90 |
| Figure 4.7. Force électromotrice induite obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000\text{tr/mn}$ et paires d'aimants permanents (pôle) $p=4$. (a) résultat expérimental, (b) résultat de calcul. | 91 |
| Figure 4.8. Force électromotrice induite obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000\text{tr/mn}$ et paires d'aimants permanents $p=2$. (a) résultat expérimental, (b) résultat de calcul. | 91 |
| Figure 4.9. Force électromotrice induite obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=1800\text{tr/min}$ et paires d'aimants permanents $p=2$. (a) résultat expérimental, (b) résultat de calcul. | 92 |
| Figure 4.10. Prototype de séparation réalisé. | 93 |
| Figure 4.11. Ligne de référence de mesure des lieux de séparation..... | 94 |
| Figure 4.12. Poudre et particules magnétiques de fer traitées..... | 94 |
| Figure 4.13. Comportement de la quantité de poudre de fer lors de la mise en marche du séparateur. | 95 |
| Figure 4.14. Dépôt final des particules séparées (poudre de fer) pour différentes vitesses d'entraînement du tapis roulant. | 96 |
| Figure 4.15. Evolution des particules (taille importante) séparées. | 96 |
| Figure 4.16. Formes et tailles des particules (pièces) diamagnétiques traitées..... | 97 |
| Figure 4.17. Comportement de la pièce diamagnétique dans un champ statique, $p=2$, $v=0.47\text{ m/s}$ | 98 |
| Figure 4.18. Formes et tailles des particules conductrices traitées. | 99 |
| Figure 4.19. Comportement et lieu de séparation de la pièce conductrice obtenus pour $p=2$, $n=1800\text{ tr/mn}$, $v=0.47\text{ m/s}$ | 100 |
| Figure 4.20. Comportement et lieu de séparation de la pièce conductrice, $p=4$, $n=1800\text{ tr/mn}$, $v=0.47\text{ m/s}$ | 101 |
| Figure 4.21. Variation de la distances de séparation des particules conductrices en fonction de leurs surfaces obtenue pour une vitesse du tambour $n=3000\text{tr/min}$ | 102 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1.1. Rapport (conductivité/densité) de quelques matériaux conducteurs..... | 11 |
| Tableau 2.1. Propriétés magnétiques et mécaniques des grandes familles des aimants permanents. | 27 |
| Tableau 2.2. Coefficient de traînée pour des particules de forme géométrique simple [Gosse 1995]. | 37 |
| Tableau 3.1. Paramètres du calcul pour effectuer la comparaison entre les résultats 2D et 3D. | 52 |
| Tableau 3.2. Comparaison entre les fréquences calculées analytiquement et simulé pour des cas différents de nombre de pôles pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000\text{tr/min}$ | 59 |
| Tableau 3.3. Données de calcul de la trajectoire d'une particule conductrice..... | 63 |
| Tableau 3.4. Résultats de calcul des trajectoires d'une particule conductrice en fonction du nombre de pôles du tambour. | 64 |
| Tableau 3.5. Résultats de calcul des trajectoires en fonction de la vitesse de rotation du tambour... | 65 |
| Tableau 3.6. Lieu et temps de séparation finale en fonction de la taille de la particule..... | 66 |
| Tableau 3.7. Lieu et temps de séparation finale en fonction de la vitesse du tapis..... | 66 |
| Tableau 3.8. Résultats de calcul des trajectoires des particules magnétiques en fonction du nombre de pôles..... | 68 |
| Tableau 3.9. Paramètres utilisés pour l'optimisation. | 74 |
| Tableau 3.10. Paramètres optimaux obtenus par l'optimisation. | 74 |
| Tableau 3.11. Paramètres caractéristiques de l'écoulement hydraulique traité..... | 75 |
| Tableau 3.12. Performances de séparation d'une particule conductrice en fonction du nombre de pôles. | 77 |
| Tableau 3.13. Résultats de calcul des trajectoires en fonction du la vitesse de rotation du tambour. | 78 |
| Tableau 3.14. Résultats de calcul des trajectoires en fonction des vitesses moyennes de l'écoulement..... | 79 |
| Tableau 3.15. Résultats de calcul des trajectoires en fonction de la taille de la particule | 80 |
| Tableau 3.16. Paramètres optimaux obtenus par l'optimisation. | 83 |
| Tableau 4.1. Induction magnétique mesurée le long des lignes montrées dans la Figure 4.2. | 87 |
| Tableau 4.2. Valeurs optimales des paramètres recherchés. | 89 |
| Tableau 4.3. Distances finales de séparation des pièces conductrices. | 100 |
| Tableau 4.4. Variation de la distance finale de séparation en fonction de la vitesse de rotation..... | 101 |

Introduction Générale

Devant la demande croissante en matière de produits de consommation et le besoin d'améliorer les conditions de vie, l'homme ne cesse de créer et de mettre en place divers procédés et techniques industriels qui doivent assurer la qualité du produit requise par le consommateur. L'utilité de ces procédés doit être justifiée par la préservation de l'environnement de vie que ce soit au sein de l'unité industrielle ou ailleurs. En ce qui concerne la production alimentaire, l'existence des particules métalliques très fines dans le produit peut causer des maladies graves aux consommateurs. Pour la production cosmétique et la fabrication du papier, l'existence des impuretés métalliques peut dégrader la qualité du produit qui doit répondre à des normes d'hygiène et de pureté. Pour l'industrie lourde (métallurgie, construction mécanique, les cimenteries), la libération des particules ultrafines dans l'air peut conduire à des maladies respiratoires dans l'environnement des sites industriels. Pour les chaînes de production, l'existence des particules métalliques peut considérablement contaminer les différents milieux. L'existence des particules dans les liquides de lubrification ou au niveau des parties de contact métalliques (engrenages) conduit à la modification de l'état des surfaces fonctionnelles ce qui conduit à des contraintes mécaniques destructives pour les pièces infectées. Pour les liquides de refroidissement (dispositif de chauffage par induction), les dépôts considérables de particules peuvent conduire par exemple à des courts circuits provoquant l'arrêt d'approvisionnement en électricité ou même la destruction totale de la partie infectée. Pour le côté environnement, l'existence des particules métalliques dans les déchets industriels solides et liquides peut conduire à des catastrophes biologiques qui peuvent détruire la nature, et provoquer la contamination des sources d'eau et la pollution de l'air. Une des manières permettant l'élimination de ces particules est la séparation magnétique. La séparation magnétique est une application industrielle de l'induction électromagnétique, elle est basée sur l'application d'une force qui agit d'une manière sélective sur la composition du matériau traité. Pour permettre la séparation simultanée des particules de natures différentes, ferromagnétiques, conductrices et isolantes, un séparateur magnétique à courant de Foucault peut être utilisé.

Notre travail consiste à proposer et réaliser un séparateur magnétique capable d'extraire des particules métalliques de nature magnétique et conductrice d'un milieu globalement non magnétique et non conducteur. Pour cela, un séparateur magnétique à courant de Foucault à tambour horizontal à base d'aimants permanents est proposé. Ce dernier peut être utilisé pour des traitements en voies sèche ou humide. En voie sèche, des matériaux granulaires ou sous forme de poudre peuvent être traités en les mettant en mouvement sur un tapis roulant (traitement des minerais). En voie humide, il s'agit de l'extraction des particules d'un liquide en écoulement à surface libre.

Afin de réaliser une séparation performante, une optimisation du séparateur proposé doit être réalisée. Cette optimisation exige l'identification des paramètres clés desquels dépend la séparation, de telle identification nécessite la résolution et l'analyse des problèmes de la séparation en tenant compte la particularité d'évolution des phénomènes en présence. Il s'agit de couplage du phénomène magnétique lié au champ magnétique appliqué et la réaction des particules (aimantation des particules magnétiques et la création des courants induits dans les particules conductrices), du phénomène hydraulique lié à l'écoulement et les contraintes hydrauliques appliquées aux particules et du phénomène dynamique particulières lié au mouvement des particules sous l'effet des forces appliquées.

Dans le cadre de ce travail, nous avons réalisé une première tâche dont l'objectif est l'élaboration des modèles mathématiques qui gouvernent d'une manière précise les phénomènes précités. Il s'agit de l'équation du champ magnétique, l'équation de Navier Stokes de l'écoulement et l'équation dynamique de Newton, Ainsi que des lois permettant la prise en compte des différentes forces agissant sur chaque type de particules.

Dans une deuxième étape, nous avons procédé au développement des codes de calcul numériques développés sous environnement Matlab, et qui permettent la résolution de ces modèles mathématiques, de prendre en compte leurs couplages et la simulation du problème de la séparation magnétique. En ce qui concerne le problème hydraulique, l'équation de Navier Stokes est résolue en exploitant le logiciel Comsol multiphysiques interconnecté avec Matlab. Ces programmes sont basés sur le couplage des méthodes éléments finis 2D (EF) et Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) et permettent l'exploitation des grandeurs magnétiques et hydrauliques calculées dans la région de séparation pour la simulation du problème globale de la séparation magnétique.

Avant de procéder à la simulation du problème de la séparation (calcul du problème de la séparation), et pour traiter un cas réel, nous avons procédé à l'identification de l'induction magnétique rémanente des aimants permanents utilisés pour la conception du tambour magnétique. Pour cela, nous avons résolu un problème inverse basé sur la minimisation d'une fonction objectif qui est la somme des carrés des différences entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées de l'induction magnétique sur des points situés dans les surfaces de l'aimant permanent. Pour résoudre ce problème inverse, nous avons couplé la méthode d'optimisation d'essais particulaires OEP (PSO en Anglais) avec la méthode analytique 3D qui a donné une induction rémanente $B_r=1.1$ T.

L'analyse des résultats de simulation du comportement des particules magnétiques ($\mu_r=80$) et conductrices ($\sigma=5.9 \times 10^7$ S/m) a permis la maîtrise des phénomènes présents et l'identification des paramètres clés influant sur les performances de la séparation (nombre d'aimants permanents, vitesse linéaire du tapis, taille de la particule et vitesse de rotation du tambour). Une telle identification nous a permis de procéder par la suite à l'optimisation du séparateur proposé. Afin de réduire le temps de calcul, l'optimisation a été appliquée au cas des particules conductrices. Une telle optimisation a été réduite à la minimisation d'une fonction

objectif qui est la distance entre le point final de la séparation et une position choisie de manière à prendre en compte les spécifications du champ magnétique appliqué et les vitesses du tapis et du liquide. Pour cela, la méthode d'optimisation d'essai des particules (PSO) a été utilisée.

Afin de valider les approches et les codes de calcul développés et mis en œuvre d'une part, vérifier l'analyse théorique effectuée et les performances du séparateur conçu et définir les limites de son utilisation d'autre part, des expérimentations ont été effectuées. Le dispositif réalisé est constitué principalement d'un tambour comportant un arrangement d'aimants permanents identiques entraîné par un moteur permettant l'ajustement de la fréquence du champ généré. Pour une application en voie sèche (tri des déchets solides par exemple) le séparateur est alimenté en matériau à traiter par un tapis roulant. Pour un traitement en voie humide, le matériau liquide est véhiculé par un écoulement dans un canal ouvert (écoulement à surface libre). Dans ce travail, et en tenant compte du fait que la différence entre les cas sèche et humide réside dans l'existence des forces hydrodynamiques pour le cas humide. Les expérimentations ont été limitées au cas de traitement en voie sèche.

Le mémoire de notre thèse s'organise autour de quatre chapitres. Le premier chapitre concerne un état de l'art sur la séparation magnétique et particulièrement la séparation magnétique à courants de Foucault, le principe de fonctionnement, les différentes applications et les différents types des séparateurs à courants de Foucault.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation mathématique du comportement des particules magnétiques et conductrices dans un séparateur magnétique à tambour à aimants permanents en voies sèche et humide. Il s'agit du développement des équations régissant les phénomènes en présence et les lois permettant la prise en compte des différentes forces agissant sur chaque type de particules. Dans le même chapitre, nous présentons la méthode des éléments finis utilisée pour résoudre l'équation de la magnétodynamique (formulation A) en régime temporel et la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 RK4 utilisée pour la résolution de l'équation du mouvement de la particule (équation différentielle de second ordre).

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats de calcul obtenus. Il s'agit du traitement des deux cas de séparation en voies sèche et humide. Dans une première partie, nous présentons tout d'abord les distributions des grandeurs magnétiques, les différentes forces d'origine magnétique qui vérifient leur caractère attractif ou répulsif et les résultats de l'analyse effectuée pour estimer l'influence des paramètres de séparation (nombre d'aimants permanents, vitesse de rotation du tambour) sur la fréquence de ces grandeurs.

Dans une deuxième partie, nous présentons en premier lieu les résultats de la simulation du comportement des particules magnétiques et en représentant leurs trajectoires et cela en voies sèche et humide. On y présente les résultats concernant l'étude de l'influence de différents paramètres (nombre d'aimants permanents, vitesse de rotation du tambour, vitesse linéaire du tapis et taille de la particule) sur ces trajectoires.

A la fin de ce chapitre, nous présentons les résultats de l'optimisation effectuée après un exposé de l'approche appliquée notamment la fonction objectif minimisée et la technique de minimisation utilisée.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons le séparateur magnétique réalisé, le protocole expérimental et les essais effectués. Nous exposons tout d'abord l'approche expérimentale utilisée pour l'identification de l'induction rémanente des aimants permanents. Ensuite, nous présentons les résultats de vérification de la nature dynamique des grandeurs électromagnétique générées, justifiant les hypothèses introduites, notamment l'approche de résolution 2D, et nous déterminons les performances du séparateur proposé et les limites de son utilisation.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons les différentes conditions de calcul, les hypothèses simplificatrices introduites, les résultats obtenus, et exposons les perspectives de ce travail.

Chapitre 1

Etat de l'art sur la séparation magnétique

1 Etats de l'art sur la séparation magnétique

1.1 Introduction

Les corps étrangers dans de nombreuses industries sont la principale source de réclamation. Des efforts importants sont déployés pour assurer l'hygiène et la qualité des produits. Différentes techniques et méthodes de tri existent en vue de l'éjection de ces corps étrangers. La séparation magnétique est une technique physique et l'une des applications industrielles de l'induction électromagnétique appliquée pour la séparation des composantes des matériaux de nature magnétique différente. Elle est largement utilisée dans des domaines de plus en plus diversifiés en concentration ou en épuration, et son champ d'application s'élargit vers d'autres secteurs d'activité (environnement, recyclage, chimie, biologie, etc) [Gillet 1991]. Son principe est basé sur la génération d'un champ magnétique agissant d'une manière sélective sur la composition des matériaux traités. L'interaction entre le champ magnétique appliqué et la réaction des matériaux conduit à la création d'une force responsable de la séparation. Selon la nature des particules, cette force peut être attractive dans le cas des particules magnétiques ou répulsives dans le cas des particules conductrices. La qualité d'une telle force dépend fortement du champ appliqué, de la nature et de la granulométrie de la particule. Pour séparer des matériaux magnétiques d'un milieu globalement non magnétique, un champ magnétique statique généré par des aimants permanents ou par des électroaimants alimentés par une source de tension continue peut être utilisé. Par contre, pour séparer des matériaux conducteurs d'un milieu non conducteur ou des matériaux conducteurs entre eux, un champ magnétique dynamique doit être appliqué. Un tel champ peut être généré par des bobines alimentées en tension variable dans le temps ou par une source continue en mouvement. Le principe général du de la séparation magnétique est montré dans la Figure 1.1.

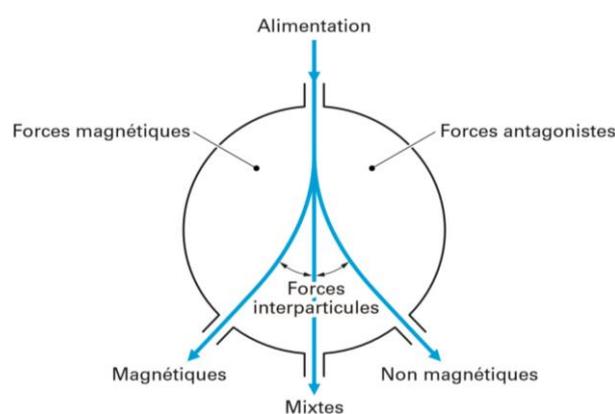


Figure 1.1. Schéma de principe de la séparation magnétique [Gillet 2003].

1.2 Classification des séparateurs magnétiques

Les séparateurs magnétiques peuvent être classés selon plusieurs critères [Gillet 2003, Svoboda 2004]:

- L'intensité de champ magnétique généré et la nature de générateur du champ.
- Les milieux d'application de la séparation (sèche ou liquide).
- Le mode de fonctionnement extraction ou déviation.

En fonction de l'intensité du champ magnétique généré, on distingue trois types principaux de séparateurs magnétiques.

1.2.1 Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)

Dans ces séparateurs, le champ magnétique est généré par des aimants permanents et développe une densité de force magnétique allant de 2×10^4 à 2×10^6 N/m³. Ce sont en général des séparateurs à construction simple, d'une dépense énergétique faible et ne peuvent convenir que pour le traitement des produits fortement magnétiques (ferromagnétiques et ferrimagnétiques) [Gillet 1991]. Un tube à aimant permanent utilisé pour capturer les particules fortement magnétiques sous forme de poudre ou de taille importante utilisé dans les deux voies sèche et humide est montré dans la figure suivante.



Figure 1.2. Tube magnétique à aimant permanent (ferrites, terres rares) [Mehasni 2007].

1.2.2 Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI)

Ces types de séparateurs sont utilisés pour la purification ou la concentration des matériaux faiblement magnétiques (paramagnétiques et diamagnétiques) qui nécessitent un champ magnétique puissant. Le générateur du champ magnétique est un électroaimant ou un aimant permanent céramique et développe une densité de force magnétique allant 2×10^7 à 4×10^9 N/m³ [Bureau 1993].

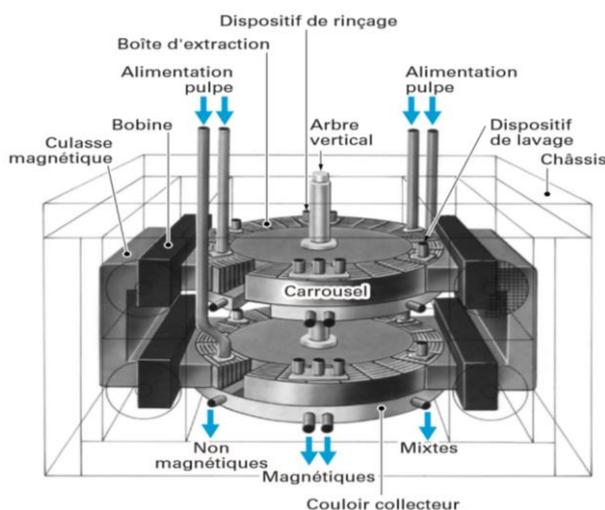


Figure 1.3. Séparateur à haute intensité en voie humide type Jones [Gillet 2003].

1.2.3 Séparateur magnétique à haut gradient de champ (SMHG)

Ces séparateurs sont utilisés pour le traitement des particules ultrafines et les particules faiblement magnétiques contenues dans une dispersion solide ou fluide. La source du champ est un solénoïde en cuivre ou supraconducteur qui permet d'atteindre une densité de force magnétique de 6×10^{10} à 10^{12} N/m³ [Bureau 1993]. La Figure 1.4 montre un séparateur magnétique à haut gradient du champ dont la source du champ est un bobinage en cuivre.

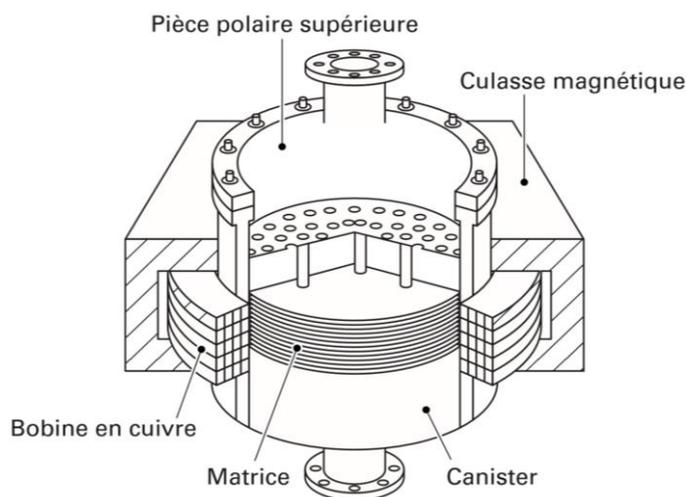


Figure 1.4. Séparateur magnétique à haut gradient à bobinage de cuivre [Gillet 2004].

Pour les séparateurs à haut gradient du champ, on trouve principalement les dispositifs suivants [Gillet 2004, Bureau 1993].

1.2.3.1 Séparateur magnétique à champ à gradient ouvert

Dans ces types de séparateurs, la séparation est effectuée sans piégeage dans une matrice d'extraction. Ils sont conçus avec une configuration spéciale composée d'un ensemble de forme cylindrique de quatre solénoïdes supraconducteurs. Cette configuration permet de générer des gradients de champ magnétique importants, donc des forces magnétiques élevées [Mehasni 2007].

1.2.3.2 Séparateur à tambour

Ils sont constitués principalement d'un tambour à l'intérieur duquel se trouve une série de bobines supraconductrices [Bureau 1993]. Le séparateur Discos (Figure 1.5) commercialisé par la firme Humboldt Wedag développe à la surface du tambour un champ magnétique de 2600 kA/m. Les bobines supraconductrices sont disposés dans un réservoir cylindrique construit en matériau isolant contenant l'hélium liquide et maintenu sous vide. Ces séparateurs peuvent fonctionner en voie sèche ou en voie humide et peuvent traiter des granulométries allant jusqu'à 100 mm [Gillet 2004].

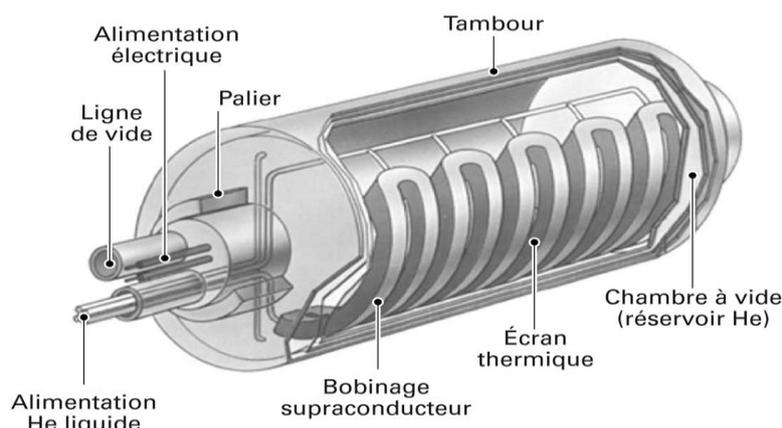


Figure 1.5. Séparateur supraconducteur à haut gradient à tambour Discos [Gillet 2004].

1.2.3.3 Séparateur magnétique à matrice d'extraction

Ces séparateurs fonctionnent dans un intervalle de champ magnétique compris entre 1600 à 4000 kA/m. La source du champ est un bobinage supraconducteur immergé dans une enceinte isolée contenant de l'hélium liquide. Dans la bobine se trouve une matrice d'extraction en laine de fer ou en métal expansé. A cause des éléments ferromagnétiques de la matrice, le champ magnétique devient fortement convergent. Il se crée, dans la matrice, des centres de force de faible portée dans lesquels les particules paramagnétiques sont piégées [Mehasni 2007].

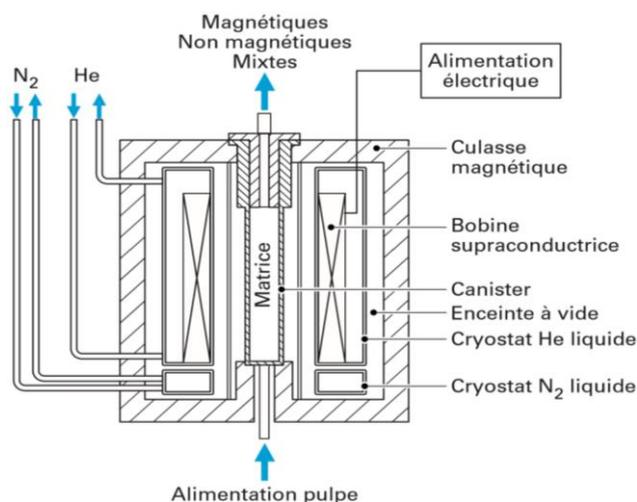


Figure 1.6. Séparateur à haut gradient en voie humide à matrice d'extraction [Gillet 2004].

1.3 Séparation magnétique par courants de Foucault

Le séparateur magnétique à courants de Foucault appelé également séparateur magnétique à courants induits est une machine destinée à la séparation des matériaux conducteurs tels que l'Aluminium, le Cuivre, le Zinc, le Laiton, etc., présents dans des flux de produits en vrac (plastic, verre, sable, bois, etc.). Son principe est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Il s'agit de la création des courants induits dans une pièce conductrice

traversée par un champ magnétique variable dans le temps ou par un déplacement de cette masse à travers un champ magnétique statique. L'interaction entre le champ magnétique appliqué et la densité des courants induits conduit à la création d'une force répulsive responsable de la séparation [Smith 2019, Ayed 2017, Ruan 2016]. Un schéma de principe de la séparation magnétique par courants de Foucault est présenté dans la Figure 1.7.

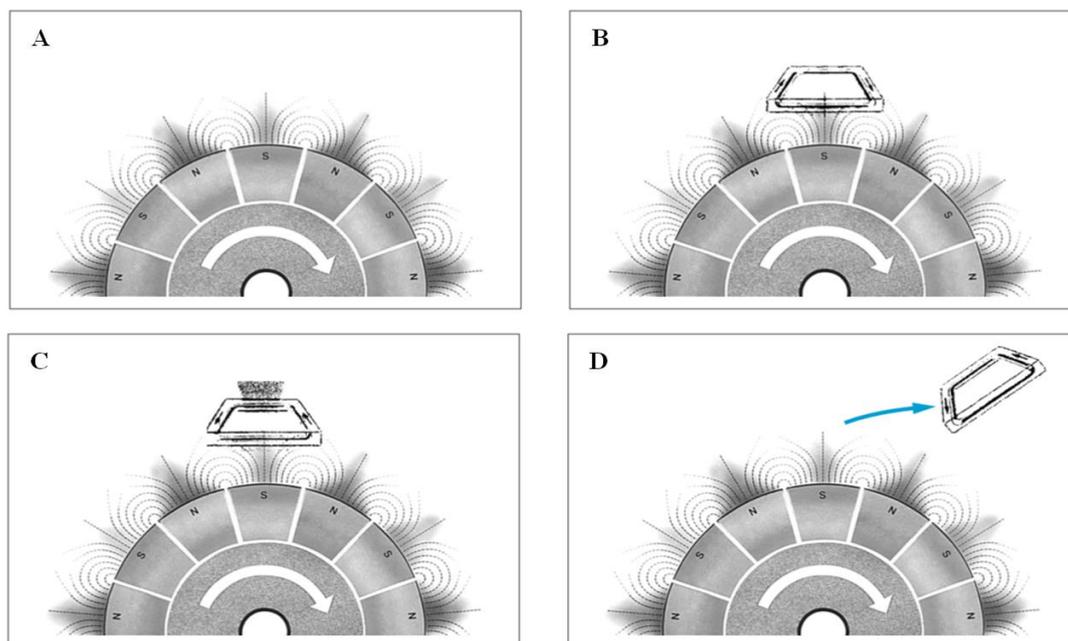


Figure 1.7. Principe de la séparation par courants de Foucault [Herbulot 2001].

A : Tambour magnétique doté des aimants permanents dans son périmètre avec une polarité alternée. Chaque aimant développe un champ magnétique.

B : Une pièce conductrice (aluminium) située à proximité va subir, du fait de la rotation du tambour, une variation du flux magnétique. Elle sera le siège d'une force électromotrice induite qui conduit à la création des courants induits dans la pièce.

C : Ces courants créent un champ magnétique induit opposé au champ magnétique inducteur généré par le tambour, ce qui conduit à la création d'une force radiale.

D : Du fait de la rotation du tambour, il y a en plus une force tangentielle qui agit dans le sens de la rotation. La résultante des forces radiales et tangentielles soulève l'objet et le projette vers l'avant.

Dans la séparation magnétique à courants induits, le rapport (conductivité/densité) représente un indice qui montre à quel point un matériau sera influencé par la force répulsive. D'après le Tableau 1.1 qui donne les rapports (conductivité/densité) pour quelques matériaux conducteurs, on voit que le rapport correspondant à l'Aluminium est égal presque à deux fois celui du cuivre, ce qui rend ce procédé de séparation idéal pour la séparation de l'Aluminium [Campbell 2003, Ayed 2017].

| Métaux | Conductivité électrique σ (10^7 S/m) | Densité de masse ρ (kg/m^3) | Rapport (σ/ρ) ($\text{m}^2/\Omega.\text{kg}$) |
|-----------|---|--|--|
| Aluminium | 3.5 | 2.7 | 13 |
| Cuivre | 5.9 | 8.9 | 6.7 |
| Argent | 6.3 | 10.5 | 6.0 |
| Zinc | 1.7 | 7.1 | 2.4 |
| Laiton | 1.4 | 8.5 | 1.7 |

Tableau 1.1. Rapport (conductivité/densité) de quelques matériaux conducteurs.

1.3.1 Classification des séparateurs magnétiques à courants de Foucault

Les séparateurs magnétiques à courants de Foucault peuvent être classés en fonction de la nature du générateur du champ en deux grandes catégories:

- Séparateurs magnétiques à base des électroaimants.
- Séparateurs magnétiques à base des aimants permanents.

1.3.1.1 Séparateurs magnétiques à base des électroaimants

Dans ces types de séparateurs, le champ magnétique est généré par des électroaimants alimentés à travers une source de tension. Pour permettre la création des courants de Foucault au niveau des particules conductrices, ces électroaimants doivent être rotatifs s'ils sont alimentés en tension continue, ou fixes s'ils sont alimentés en alternatifs.

1.3.1.1.1 Séparateurs magnétiques à base des électroaimants rotatifs

Dans les séparateurs magnétiques à courants de Foucault à base des électroaimants rotatifs, la source du champ est constituée par des bobines alimentées par une source de tension continue (bornes 1 et 2) à l'aide d'un système balais ou ressort de commutation. Le champ magnétique créé par ces bobines est continu, pour le rendre variable, les bobines sont mises en rotation. La Figure 1.8 représente le premier séparateur à base de bobines rotatives alimentées en tension continue, créé par Edison [Edison 1889]. Il est constitué par des bobines montées sur un axe vertical tournant par l'utilisation d'un système de transmission par courroie.

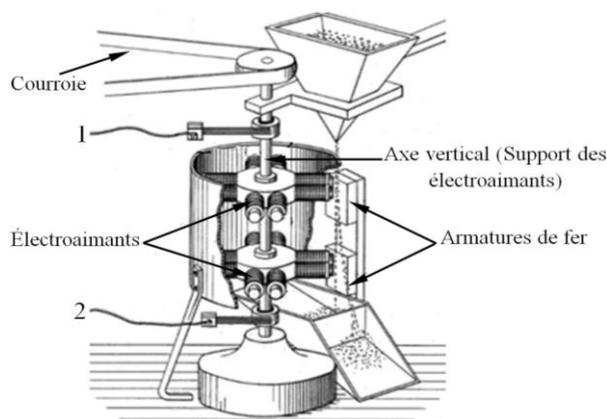


Figure 1.8. Séparateur magnétique à courant de Foucault [Edison 1889].

1.3.1.1.2 Séparateurs magnétiques à base des électroaimants fixes

a) Séparateur magnétique par moteur à induction linéaire (LIM)

Ce sont des séparateurs à courants de Foucault où la source du champ utilisé ressemble beaucoup au stator d'un moteur triphasé sauf que le moteur a été ouvert et mis à plat. Les enroulements des moteurs linéaires sont alimentés par une source de tension alternative avec une fréquence de 400 à 800 Hz. Les moteurs linéaires sont installés au-dessous et au-dessus du tapis roulant. Ils produisent un champ magnétique sinusoïdal. Lorsque les particules conductrices passent par la zone active de séparation (entre les LIM), elles sont poussées sous l'effet de la force de Lorentz loin de la source du champ [Morey 1979].

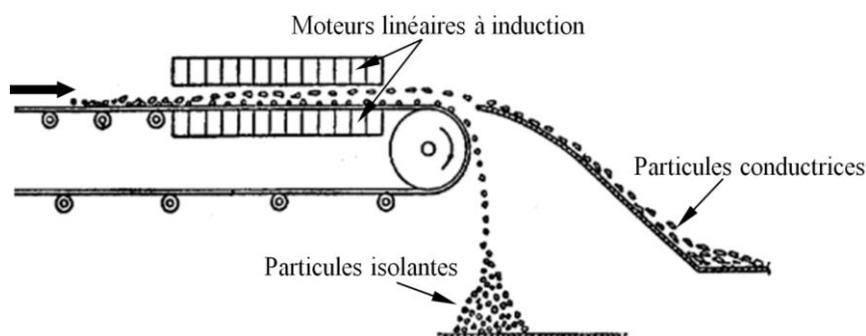


Figure 1.9. Séparateur magnétique à base de moteurs linéaires à induction [Morey 1979].

b) Séparateur magnétique à haute fréquences (HF ECS)

Dans ce type de séparateur, le champ magnétique est généré par un électroaimant fixe alimenté par une source de tension alternative de hautes fréquences (supérieurs à 50 kHz). La fréquence de fonctionnement est choisie en fonction de la résistivité spécifique du matériau qu'on veut séparer. L'avantage majeur de ce séparateur réside dans la possibilité de séparer des particules de petites tailles (<1cm) [Dholu 2016]. Son schéma de principe est montré dans la Figure 1.10.

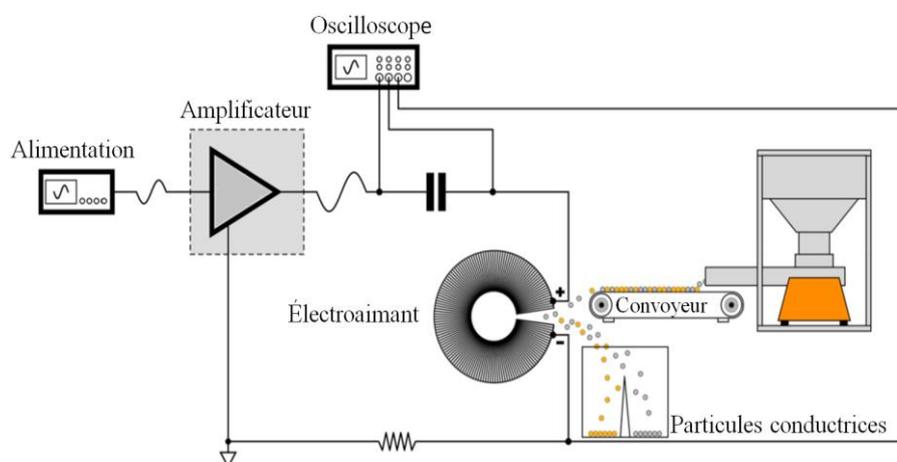


Figure 1.10. Séparateur magnétique à haute fréquence [Smith 2019].

1.3.1.2 Séparateurs magnétiques à base des aimants permanents

a) Système à double aimant

Le séparateur magnétique à double aimant est composé d'un convoyeur avec deux paires d'aimants permanents placés au-dessus et au-dessous du tapis roulant (Figure 1.11). Lorsque le matériau à traiter traverse la zone active (paires d'aimants), les matériaux conducteurs sont poussés vers les bords du tapis et le reste du matériau passe par le centre.

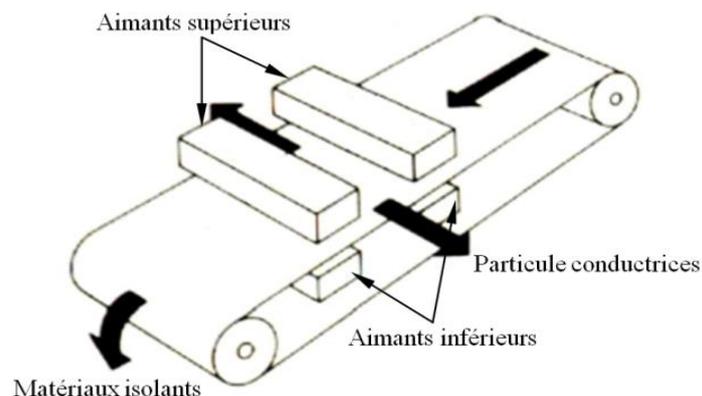


Figure 1.11. Séparateur magnétique double aimant [Campbell 2003].

b) Séparateur magnétique à rampe coulissante (à table inclinée)

Dans ce dispositif à courants de Foucault, des aimants permanents avec une polarité alternée sont intégrés à la surface d'une rampe inclinée par rapport à l'horizontal (Figure 1.12). Les particules non conductrices glissent directement sur la rampe, tandis que les particules conductrices sont déviées latéralement. La déviation des particules conductrices est fonction de la longueur et de l'inclinaison de la rampe, l'intensité du champ des aimants à la surface de la rampe, la conductivité, la densité, la forme, la taille et la vitesse initiale des particules, et le coefficient de frottement de glissement entre les particules et la rampe [Ayad 2017].

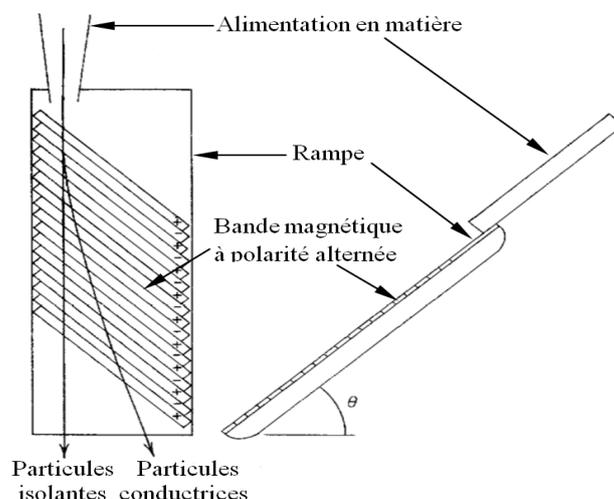


Figure 1.12. Séparateur magnétique à rampe coulissante [Schloemann 1982].

c) Séparateur vertical à courant de Foucault (VECS)

Les séparateurs verticaux à courants de Foucault sont présentés à l'origine par l'Université de technologie de Delft, aux Pays-Bas. Ce type de séparateur est composé de deux parois verticales parallèles en acier doux avec des bandes magnétiques de polarités alternées. Cette structure est similaire à une combinaison de deux séparateurs à rampes montés verticalement. Les particules conductrices traversant un champ magnétique non homogène sont déviées tandis que les particules non magnétiques tombent sous l'effet de la gravité. Ces séparateurs peuvent être considérés comme une combinaison de deux séparateurs à rampes montés verticalement [Ayed 2017].

d) Séparateurs à disques rotatifs (RDS)

Le séparateur magnétique à disques rotatifs est constitué d'aimants permanents de polarité alternée montés sur deux disques rotatifs en acier doux (Figure 1.13). L'interaction entre le mouvement rotatif des disques et le mouvement vertical des particules se traduit par une force répulsive qui agit sur les particules conductrices et conduit à leur séparation.

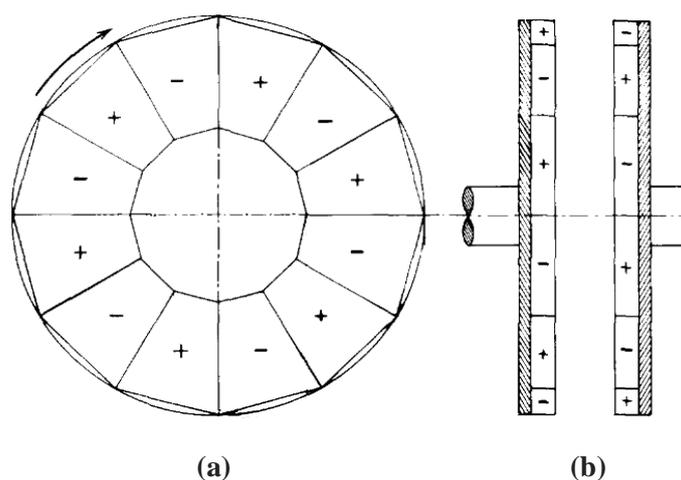


Figure 1.13. Séparateur à disque rotatif, (a) Vue de face, (b) Vue de côté [Braam 1988].

e) Séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal (HDECS)

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

et l'incapacité de séparer des particules de dimension caractéristique inférieure à 5mm [Campbell 2003].

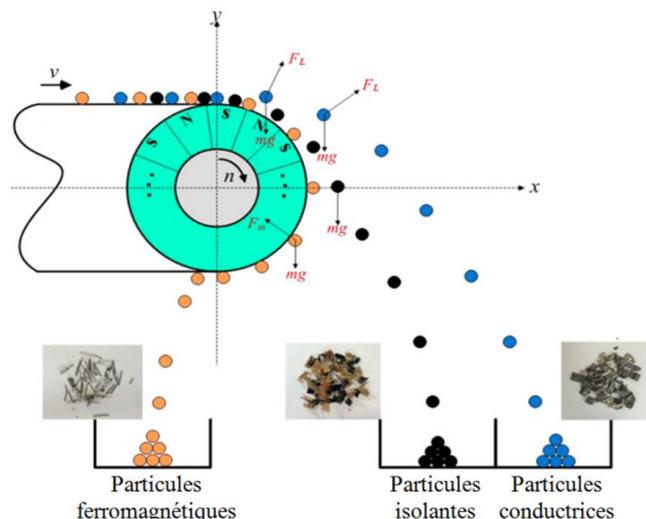


Figure 1.14. Séparateur à courants de Foucault à tambour horizontal [Ruan 2016b].

f) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS)

Le séparateur à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS) consiste en un tambour rotatif vertical incliné doté d'une succession d'aimants permanents, alternativement polarisé N – S et S – N, directement fixés sur l'axe d'un moteur électrique. Les particules à séparer sont amenées dans le champ sur une trajectoire oblique, frappent le tambour et sont déviées dans le champ variable sous l'effet des interactions électrodynamiques et mécaniques. En fonction de leur conductivité électrique, les particules fortement conductrices et faiblement conductrices adoptent des trajectoires différentes, ce qui conduit à leur séparation. L'avantages de IDECS réside dans son coût d'équipement qui est inférieur et il peut séparer des particules de petites tailles (<5mm). [Lung 2002]

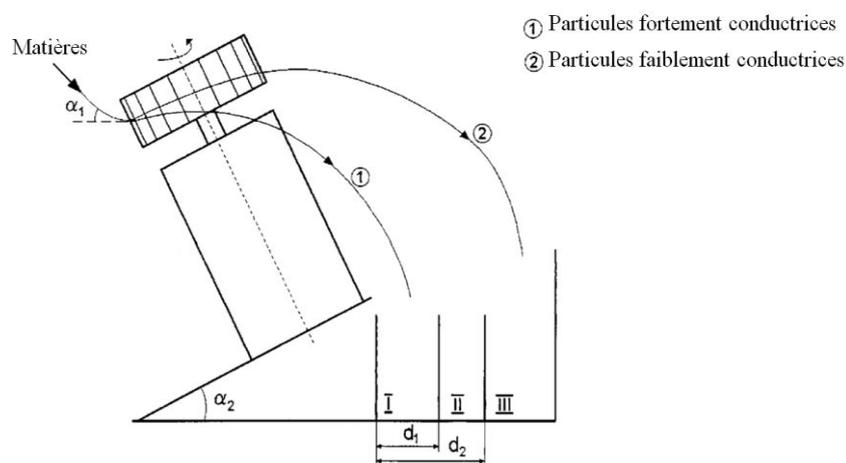


Figure 1.15. Séparateur à courants de Foucault à tambour incliné [Lung 2002].

g) Séparateur magnétiques à courants de Foucault à tambour Vertical (VDECS)

Le séparateur à courants de Foucault à tambour vertical VDECS est destiné à être utilisé pour séparer de petites particules conductrices, ayant des dimensions d'environ 2 à 8 mm. Ce séparateur est constitué par un tambour rotatif vertical entouré par des aimants permanents, alternativement orienté N – S et S – N, directement fixés sur l'axe d'un moteur électrique. Les particules à séparer sont amenées dans le champ sur une trajectoire oblique, frappent un bouclier qui entoure le tambour et réalise une déviation supplémentaire. Dans ce type de séparateur, pour augmenter l'efficacité de la séparation, un arrangement approprié des paramètres de séparation est nécessaire. Comparativement à ces résultats, Les VDECS ont un rendement proche de celui du HDECS et un coût d'équipement moins élevé. L'inconvénient est que le produit intermédiaire doit être repassé par le processus de séparation [Lung 2001].

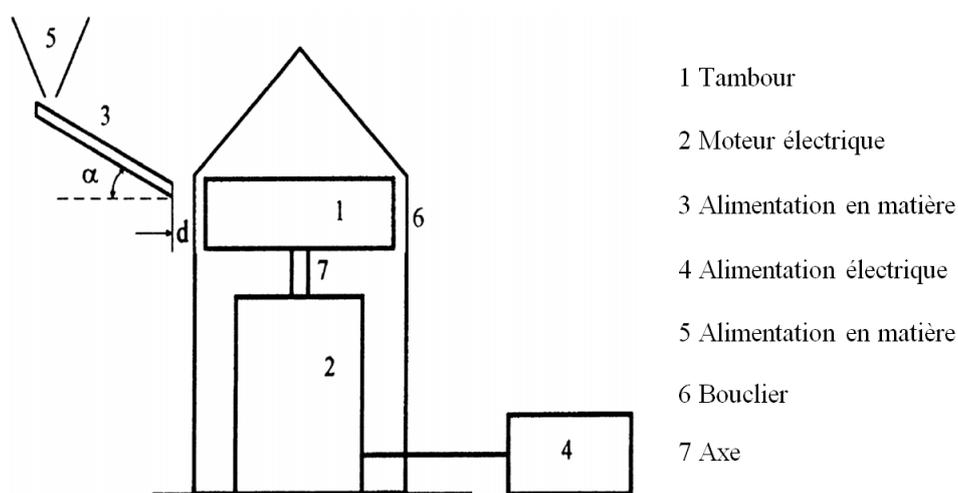


Figure 1.16. Séparateur à courants de Foucault à tambour vertical [Lung 2001].

h) Séparateur à tambour magnétique en voie humide

La séparation à tambour magnétique en voie humide est utilisée pour récupérer les matériaux ferromagnétiques solides d'une alimentation sous forme de pulpe minérale. Le tambour est en acier inoxydable, recouvert d'un revêtement en caoutchouc. Il est partiellement immergé dans un réservoir et tourne à faible vitesse autour d'un assemblage magnétique. Lors de sa rotation, il assure l'évacuation des produits magnétiques attirés par le système magnétique. Ces appareils permettent d'obtenir soit des concentrés à haute teneur, soit des stériles parfaitement épurés [Gillet 2003]. La conception des réservoirs est très importante, elle est déterminée par les objectifs du processus de séparation. Selon les dispositions de l'alimentation et l'évacuation du produit, on distingue trois types de séparateurs (Figure 1.17) [Gillet 2003, Svoboda 2003].

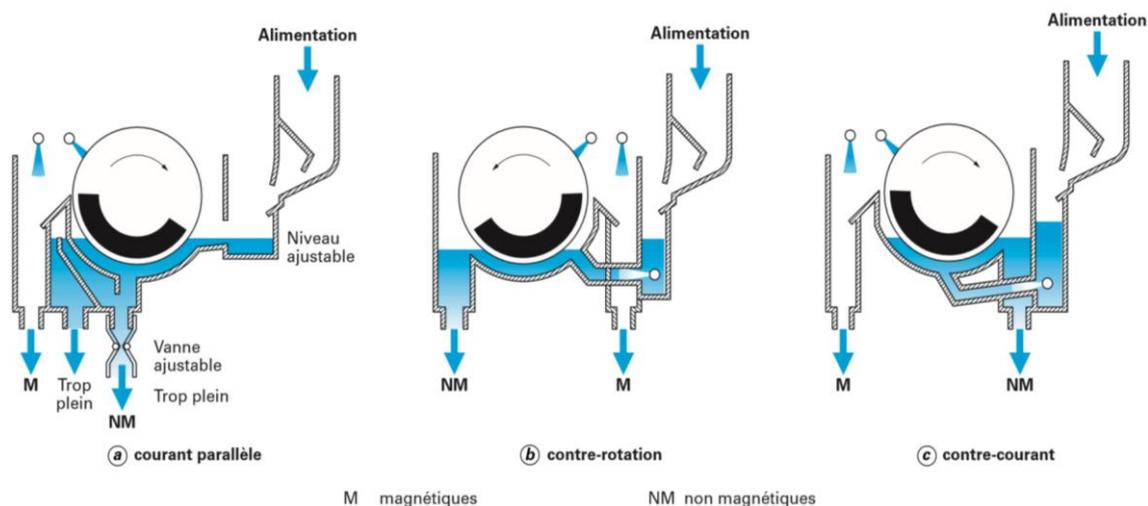


Figure 1.17. Séparateur à courants de Foucault à tambour en voie humide [Gillet 2003].

1.4 Applications de la séparation magnétique à courants de Foucault

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

- L'élimination des déchets électroniques provenant des lignes de démontage des réfrigérateurs, ordinateurs, télévisions et climatiseurs [Ruan 2016b].
- Le recyclage des circuits électroniques imprimés des téléphones mobiles usagés contenant des matériaux de valeurs. Après le broyage, le séparateur à courants de Foucault sert à séparer les circuits imprimés de la matière plastique (les carcasses et le verre des écrans) [Li 2017].
- Dans le domaine de traitement des déchets automobiles, la séparation à courants de Foucault est souvent utilisée pour séparer les blocs d'aluminium ou de cuivre des sections de voitures abandonnées [Kercher 1982].
- La séparation des canettes d'aluminium et des métaux ferreux.
- Séparation des métaux non ferreux des déchets de verre.
- Séparation des métaux non ferreux des portes et des fenêtres en plastique recyclé.
- L'élimination des poignets et charnières en cuivre dans l'industrie du recyclage du bois pour permettre ensuite l'utilisation du bois pur pour la fabrication de panneaux à base de bois ou d'autres applications pour lesquelles l'élimination des contaminants métalliques est importante.

1.5 Historique sur la séparation magnétique à courants de Foucault

La technique de la séparation magnétique par courants de Foucault (Eddy Current separation) a été introduite par Thomas A. Edison en 1889 par l'invention d'un dispositif de séparation magnétique à courants induits basé sur l'utilisation des électroaimants rotatifs alimentés en

courant continu destiné à la concentration de minerai contenant des métaux conducteurs [Edison 1889].

Dans la même année, Moffat a breveté un séparateur magnétique qui repose sur le principe de la répulsion des particules métalliques par des champs magnétiques à haute fréquence générés par des électroaimants fixes alimentés par des sources alternatifs [Naidu 2010].

Egalement, Stevens Maxim a développé une technique basée sur le mouvement d'un aimant permanent destinée à la séparation de l'or, l'argent, le cuivre et d'autres métaux diamagnétiques non ferreux des substances non métalliques [Maxim 1889].

Isbell en 1913, a inventé un séparateur magnétique polyphasé constitué par des électroaimants alimentés par des sources de tension polyphasée [Smith 2019].

McCarthy (1922) a inventé une technique basée sur l'utilisation d'un champ magnétique tournant. Ce séparateur est destiné à la concentration des produits constitués de matériaux ayant les mêmes ou différentes conductivités électriques [McCarthy 1922].

Lee (1931) a précisé le principe de la répulsion des particules métalliques soumises à des champs magnétiques puissants à haute fréquence.

Benson et Falconer (1969) ensuite ont breveté une technique de séparation électrodynamique basée sur une excitation électromotrice qui permet de séparer les particules ayant une conductivité électrique élevée des particules à faible conductivité [Saurabh 2009].

Lovell (1946, 1951) a pu montrer qu'avec une combinaison appropriée de plusieurs bobines excitées par des sources de hautes fréquences, la force de répulsion pouvait être convertie en une force d'attraction sur un volume sélectionné [Smith 2019].

Dans la fin des années 1960, l'université privée Américaine "Vanderbilt" a contribué au développement majeur des séparateurs à courants de Foucault. Une technologie destinée à la séparation des métaux conducteurs non magnétiques d'un mélange de matière organique a été développée. Les sources du champ utilisées dans ces séparateurs sont deux moteurs linéaires alimentés par une source de tension avec une fréquence de 60 Hz installés au-dessus et au-dessous d'une bande transporteuse [Saurabh 2009].

Le brevet Benowitz (1975) a développé la technique de séparation par une poulie magnétique qui attirait les pièces métalliques non magnétiques par une combinaison de bobines alimentées en haute fréquence [Smith 2019].

En raison de la complexité de construction et les coûts d'exploitation élevés, les séparateurs magnétiques à courants induits à base des aimants permanents ont remplacés les types classiques à électroaimants. Suite au développement des aimants permanents à forte intensité, des systèmes de séparation des métaux non ferreux à faible consommation d'énergie et à faible coût d'exploitation ont été développés.

La Division de Recherche Raytheon aux États-Unis dans les années 1970 a introduit des développements dans le domaine des séparateurs à base des champs magnétiques générés par des aimants permanents. Deux types de systèmes ont été étudiés: un séparateur à table inclinée ou à rampe composé d'un ensemble d'aimants permanents à polarités alternées

montés sous une tôle d'aluminium ou d'acier inoxydable; et un Séparateur rotatif à tambour pouvant être simplement envisagé comme un séparateur à rampe enroulé sous forme d'un tambour [Naidu 2010].

En (1975), Schloemann a introduit le séparateur magnétique à rampe destiné pour le retrait des métaux conducteurs non magnétiques des déchets solides. Dans ce dispositif à courants de Foucault, des aimants permanents sont intégrés à la surface d'une rampe avec une polarité alternée. Les particules non conductrices glissent directement sur la rampe, tandis que les particules conductrices sont déviées latéralement. [Braam 1988].

Morey (1979) dans l'université "Vanderbilt" a utilisé le moteur linéaire avec une gamme de fréquences de 400–800 Hz pour générer une onde de champ magnétique progressive. Des particules conductrices de taille caractéristique supérieure à 6 mm sont séparées avec succès lorsqu'elles passent à travers l'onde progressive le long de la face du moteur linéaire [Smith 2019].

Dalmijn, Voskuyl et Roorda En 1979, dans l'université de la technologie de Delft, aux Pays-Bas ont introduit le séparateur magnétique à courants de Foucault vertical (VECS), ce type de séparateur est composé de deux parois verticales parallèles en acier doux avec des bandes magnétiques de polarités alternées. Les particules conductrices traversant un champ magnétique non homogène seront déviées, alors que les particules non magnétiques tombent sous l'effet de la gravité [Braam 1988].

A la fin des années 1980, la même université a développé des séparateurs magnétiques à courants de Foucault à disque rotatif composés par des aimants permanents montés sur des disques en acier doux en rotation et exercent des forces plus fortes que celles du (VECS). Lors de leur passage par le champ magnétique, les particules conductrices sont déviées radialement. La fréquence du champ magnétique peut être augmentée en augmentant la vitesse de rotation du disque en rotation, ce qui permet d'augmenter la force de déviation [Smith 2019].

Le développement des séparateurs à disque tournant ont conduit à l'invention des séparateurs magnétiques à tambour horizontal à ceinture (BDECS) et les séparateurs à tambour tournant (RDECS) à base des aimants permanents très puissants et plusieurs articles sont publiés.

Rem (1997 et 1998), a développé des modèles mathématiques pour simuler le comportement des particules conductrices (Aluminium de 3 à 30 mm) dans un séparateur magnétique à courants de Foucault horizontal. Dans leurs modèles mathématiques développés, les auteurs ont pris en compte l'interaction mécanique entre les particules et le tapis roulant, ainsi que les forces aérodynamiques. À partir de leurs analyses, et des essais expérimentaux effectués, des conclusions qualitatives ont été tirées concernant l'influence de la taille, de la forme et de la conductivité des particules sur les trajectoires des particules [Rem 1997, Rem 1998].

[Zhang 1999] et al, ont effectué une comparaison validée expérimentalement entre la séparation à tambour magnétique horizontal à base d'un tambour qui tourne dans le même sens du mouvement du tapis roulant et le cas d'un tambour qui tourne dans le sens contraire.

Ces résultats ont prouvés que la deuxième configuration est la plus efficace, elle permet de séparer des fractions d'Aluminium de 3mm d'un déchet PVC.

[Lung 2001] a introduit une nouvelle conception d'un séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour Vertical (VDECS) qui permet de séparer des particules de petite taille de (2 à 8mm). Il s'agit d'un tambour vertical rotatif entouré par des aimants permanents de polarité alternée. Des résultats de comparaison pour certains produits traités en utilisant ce type de séparateur avec ceux obtenus par le séparateur à tambour horizontal ont montré que l'avantage du VDECS réside dans le fait que l'efficacité est proche de celle du HDECS avec un coût d'équipement plus faible.

Une année après, [Meier-Staude 2002] et al ont présenté une nouvelle technique utilisée pour la séparation magnétique de l'Aluminium à partir d'un mélange millimétrique Aluminium Cuivre. Il s'agit d'un séparateur magnétique à tambour horizontal à base d'aimants permanents placés au-dessus de la courroie d'alimentation au bout de la courroie d'alimentation plutôt qu'en dessous. Les auteurs ont conclu que cette configuration contribue positivement dans le processus de la séparation.

Dans la même année, [Lungu 2002] et al ont présenté une méthode de séparation des particules conductrices de petites tailles (inférieures à 5 mm) d'un mélange à deux composants conducteurs en utilisant un nouveau type de séparateur dynamique à courants de Foucault à aimants permanents. Le séparateur à courants de Foucault à tambour incliné (IDECS) consiste en un tambour rotatif vertical incliné entouré par des aimants permanents de polarité alternée. Les particules sont déviées dans le champ variable sous des interactions électrodynamiques et mécaniques.

[Lungu 2005] a présenté une méthode permettant de séparer les petites particules conductrices d'un mélange à deux matériaux conducteurs en utilisant un nouveau type de séparateur à courants de Foucault à tambour angulaire (ADECS). Ce séparateur est constitué d'un tambour horizontal rotatif doté des aimants permanents dans son périmètre avec une polarité alternée. Le tambour est placé en inclinaison sous la partie supérieure d'un tapis roulant horizontal. L'axe du tambour et la direction du déplacement de la bande font un certain angle, dépendant des propriétés physiques des particules soumises au processus de séparation. Le séparateur fonctionne sur la base de l'effet de saut des particules fortement conductrices qui prennent des trajectoires différentes dans la zone active du champ.

[Lungu 2009] a présenté une nouvelle méthode permettant de séparer les particules conductrices d'un mélange à deux composants en utilisant un nouveau type de séparateur à courants de Foucault à aimants permanents. La séparation se fait en deux étapes successives. Ce séparateur est composé d'un tambour horizontal rotatif entouré par des aimants permanents alternativement polarisés. Le processus de séparation se déroule en deux étapes: les particules fortement conductrices sont séparées sur la partie supérieure du tambour, puis les particules faiblement conductrices sont séparées sur la partie inférieure du tambour.

[Ruan 2011] et al ont proposé l'utilisation d'un séparateur à tambour horizontal rotatif pour la récupération des flocons d'Aluminium à partir des cartouches de toner usagé. Ils ont identifié des paramètres de fonctionnement influents sur l'efficacité de la séparation. Dans la même année, les mêmes auteurs ont proposé un modèle de forces répulsives en prenant en compte les paramètres identifiés tels que la surface de l'aimant face à la particule, et la section transversale maximale des flocons horizontal.

[Ayad 2016] a présenté une application de séparation par courants de Foucault à tambour horizontal à base des aimant permanents dans l'industrie du recyclage. Ce séparateur est destiné à la récupération des petites sphères d'or présentes dans les produits et les cartes électroniques en les séparant d'autres métaux et du sable.

[Ruan 2016b] et al ont démontré un processus permettant de récupérer les ferreux (alliage de nickel) et conducteurs (aluminium) des condensateurs usés sur des cartes des circuits imprimés après leur broyage. Le processus proposé consiste en un séparateur magnétique à tambour horizontal. Leur étude a montré que dans des conditions optimales, en écrasant ces condensateurs usés jusqu'à 5 mm, on pourrait récupérer 98,9 à 100% de la fraction conductrice.

[Li 2017] et al ont proposé la technique de la séparation magnétique par courants de Foucault basée sur des aimants permanents pour l'utiliser dans l'industrie du recyclage des déchets pour les équipements électriques et électroniques. Il s'agit de la récupération des circuits électroniques imprimés des téléphones mobiles usagés contenant des matériaux de valeur. Après le broyage, le séparateur à courants de Foucault sert à séparer les cartes de circuit imprimé du plastique des carcasses et du verre des écrans. Les auteurs ont montré que sous des conditions optimales (vitesse de rotation du tambour et vitesse du tapis roulant), on peut séparer des portions des cartes de 5 à 10mm avec un rendement de séparation de 95.54%.

1.6 Objectif de notre thèse et dispositif de séparation proposé

Le travail de notre thèse présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique à courants de Foucault. L'objectif est l'étude, l'optimisation et la réalisation d'un séparateur magnétique capable de séparer simultanément des particules de différentes natures (ferromagnétiques, conductrices, paramagnétiques et diamagnétiques) dans les deux voies sèche et humide. Pour permettre la séparation simultanée des particules précitées, un prototype d'un séparateur à courants de Foucault à tambour horizontal, doté d'une succession d'aimants permanents de type NdFeb avec une polarité alternée sur son périmètre (Figure 1.18) est proposé. En voie sèche, des matériaux granulaires ou sous forme de poudre peuvent être traités en les mettant en mouvement sur un tapis roulant. En voie humide, il s'agit de l'extraction des particules d'un liquide en écoulement dans un canal rectangulaire à surface libre.

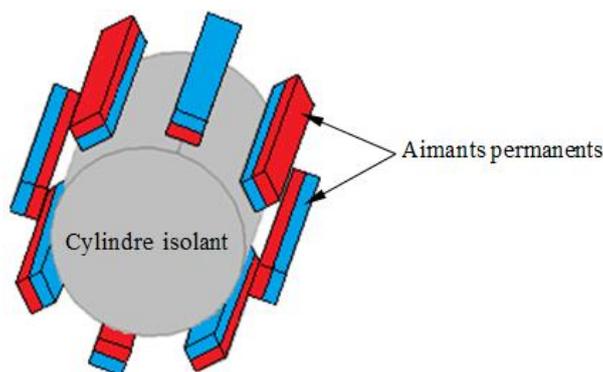


Figure 1.18. Tambour magnétique utilisé pour la conception du séparateur.

Pour aboutir au résultat final de notre thèse qui est la réalisation d'un séparateur magnétique capable d'assurer des traitements en voies sèche et humide en extrayant des particules ferromagnétique, diamagnétique, paramagnétiques et conductrices, nous procédons à:

1. L'élaboration des modèles mathématiques qui gouverne d'une manière précise les phénomènes en présence (équation du champ magnétique, l'équation de Navier Stokes de l'écoulement et l'équation dynamique de Newton). Aussi les lois permettant la prise en compte des différentes forces agissant sur chaque type des particules.
2. La simulation du comportement d'une dispersion aléatoire des particules métalliques de différentes natures (magnétique et conductrice) dans un dispositif de séparation proposé. Pour atteindre ce résultat, une modélisation exacte des phénomènes intervenant et des outils de résolution doivent être développés et mis en œuvre.
3. L'identification des paramètres influant sur la séparation à travers l'analyse des résultats de la simulation. Pour cela, des cartographies de champ électromagnétique et des champs de forces doivent être déterminées.
4. L'optimisation du séparateur proposé en vue d'améliorer ses performances en tenant compte du cahier de charges (les clés de l'optimisation sont les paramètres identifiés). Des démarches d'optimisation et des méthodes doivent être développées, mise en œuvre et comparées.
5. Réaliser le prototype et effectuer des expérimentations qui mènent au produit final. Les premiers essais feront l'objet d'une validation expérimentale des résultats de calcul (vérification des modèles, des outils de calcul et de la démarche d'optimisation). Une deuxième série d'expérimentations aura pour but la vérification de l'efficacité du séparateur réalisé.

Chapitre 2

Modélisation d'un séparateur à courants de Foucault à tambour magnétique

2 Modélisation d'un séparateur à tambour magnétique

2.1 Introduction

La modélisation consiste à la construction d'une structure mathématique basée sur des fonctions et des équations mathématiques aptes à représenter une certaine partie de la réalité. Ces équations définissent un problème réel et à partir desquelles on peut déterminer un certain nombre des grandeurs représentées par la solution de ces équations. Dans la physique de la séparation magnétique, toute particule est principalement soumise à des forces d'origines extérieures de différentes natures. Pour que la séparation ait lieu, il faut que les forces magnétiques soient dominantes devant les forces résistantes. La connaissance de l'efficacité des forces magnétiques nécessite l'estimation de l'importance de ses effets par rapport aux autres forces. La seule manière qui permette d'aboutir à cet objectif est la simulation du comportement de la particule. De telles simulations nécessitent une approche mathématique exacte de tous les phénomènes physiques générés lors de l'application de la procédure de séparation. Il s'agit ainsi de la modélisation des phénomènes en présence.

2.2 Modélisation d'un séparateur magnétique à tambour à aimants permanents

Dans les configurations des séparateurs magnétiques à courant induit à base des aimants permanents, les aimants travaillent en circuit ouvert (sans circuit magnétique de fermeture du flux), en fonction de la polarité nord ou sud et l'arrangement pour certains d'entre eux, ces aimants peuvent travailler en répulsion. Ils doivent donc avoir une aimantation M et un champ coercitif H_c suffisamment élevés. Dans cette partie, nous présentons le comportement et les propriétés de quelques aimants industriels qui ont le potentiel d'être utilisés dans les systèmes de séparation magnétique.

2.2.1 Grandes classes de matériaux pour aimants permanents

Les aimants permanents font partie des matériaux magnétiques durs qui une fois aimantés conservent à la température d'utilisation une aimantation résiduelle appelée aimantation rémanente qui est pratiquement nulle dans les matériaux doux. Les aimants permanents peuvent être des matériaux céramiques ou des matériaux métalliques.

Les matériaux magnétiques sont caractérisés par la courbe $B=f(H)$ relative à chaque matériau appelé **cycle d'hystérésis** qui diffère d'un matériau à un autre. Le cycle d'hystérésis d'un aimant permanent se caractérise par sa largeur qui traduit l'importance du champ coercitif. La caractéristique du second quadrant du cycle est appelée **courbe de désaimantation**.

Dans la Figure 2.1, nous présentons une courbe de désaimantation typique d'un aimant permanent ainsi que les courbes de désaimantation des grandes classes des aimants permanents.

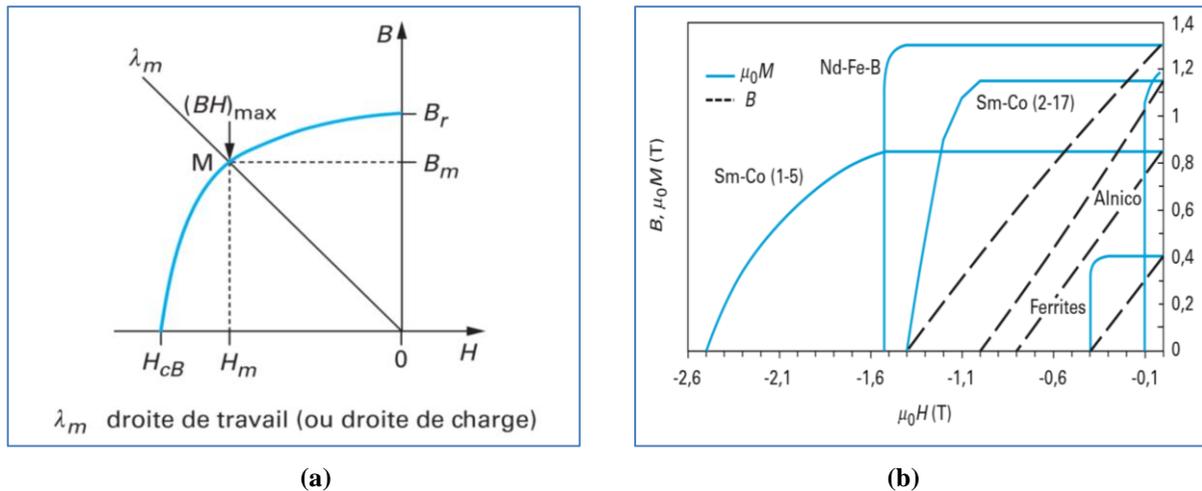


Figure 2.1. (a) Courbe de désaimantation typique d'un aimant permanent [Le Breton 2009], (b) Courbes de désaimantation des différents types d'aimants permanents [Lechevallier 2007].

La courbe de désaimantation d'un aimant permanent fournit toutes les caractéristiques magnétiques de l'aimant permanent qui déterminent le choix d'un aimant pour une application donnée [Allag 2010].

- l'**induction rémanente B_r** , elle représente l'induction magnétique résiduelle qui subsiste après l'élimination et la disparition du champ inducteur, c'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant.
- le **champ coercitif de l'induction H_{cB}** , qui représente le champ démagnétisant qui annule l'induction magnétique B , sa valeur donne une indication sur de la stabilité de l'aimant permanent, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.
- le **produit d'énergie volumique (BH)** qui représente la valeur énergétique de l'aimant par unité de volume, dont on tire la densité d'énergie volumique maximale $(BH)_{max}$ correspondant au point de fonctionnement optimal de l'aimant permanent.

A l'intérieur d'un aimant, les trois grandeurs \vec{B} , \vec{H} et \vec{B}_r sont reliées par l'équation :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.1)$$

Où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide et μ_r représente la perméabilité magnétique relative de l'aimant permanent.

Les familles de matériaux à aimant permanent ayant débouché sur une production industrielle notable et qui conduisent à l'essentiel des applications sur le marché ne sont pas nombreuses. Ce sont, par ordre chronologique d'apparition :

- **Les AlNiCo**

Désigne une famille d'alliages composés principalement d'aluminium (Al), de nickel (Ni) et de cobalt (Co). Ces aimants présentent un champ coercitif assez faible mais une aimantation permanente très élevée. Ils sont aujourd'hui de moins en moins utilisés en raison de leurs

propriétés magnétiques modestes et du coût élevé à cause du prix élevé du cobalt qui entre dans sa composition. Grâce à une excellente stabilité vis à vis la température et de leur capacité de fonctionner à des températures allant jusqu'à 450°C, ils conservent quelques rares applications, dans le domaine des hautes températures et sur le marché des appareils de mesures [N'Gotta 2015].

- **Les ferrites durs**

Les ferrites durs (Hexa ferrites de baryum ou de strontium) sont des matériaux céramiques très stables. Contrairement aux autres familles des aimants permanents, ces matériaux possèdent une très grande résistance à l'oxydation et à la corrosion mais ils sont très fragiles (ne supportent pas les chocs). Ces aimants sont les plus utilisés grâce à leur champ coercitif qui est relativement élevé et leur très faible coût qui compense leur faible aimantation rémanente [Chouarbi 2013].

- **Les aimants Samarium-Cobalt**

Les aimants samarium-Cobalt présentent des performances magnétiques très supérieures aux deux familles précédentes. L'inconvénient majeur de ce type d'aimants réside dans leur coût élevé. Le samarium est le matériau le plus cher des éléments parmi les terres rares utilisés dans les aimants permanents. Le cobalt est un matériau cher, stratégique et dont les réserves sont massivement concentrées dans un seul pays, le Zaïre [E de Lacheisserie 2000]. Leur température de Curie étant élevée et ils présentent ainsi une bonne tenue en température et résistant à la corrosion. Ces aimants conservent d'importantes applications dans les domaines où les conditions d'utilisations sont difficiles (hautes températures) [N'Gotta 2015, Lechevallier 2007].

- **Les aimants NdFeB**

Ces aimants présentent les meilleures performances magnétiques du marché grâce à la forte aimantation rémanente et ils possèdent l'énergie volumique la plus élevée. Ils sont moins chers que les aimants de la famille samarium-cobalt. Ces aimants sont caractérisés par un cycle en aimantation très carrée, leur fonctionnement est quasi idéal à la température ambiante. L'inconvénient majeur de ces matériaux réside dans leur température de Curie qui est relativement faible (~ 300°C), qui leur procure une tenue en température réduite et ne peuvent être utilisés à haute température. L'autre inconvénient de ces aimants est leur sensibilité à la corrosion et à l'oxydation, ce qui impose leur protection par un revêtement de surface [E de Lacheisserie 2000].

Pour comparer ces aimants entre eux, nous avons regroupé quelques propriétés magnétiques et mécaniques dans le Tableau 2.1 [Coey 2002, Le Breton 2009].

| Paramètres | B_r | H_{cB} | $(BH)_{max}$ | T_{max} | T_C | Résistivité | Masse volumique |
|------------------------------------|-------|---------------------|----------------------|-----------|-------|----------------------|---------------------------------------|
| Aimants | (T) | (A/m ²) | (kJ/m ³) | (°C) | (°C) | (Ω.m) | (10 ³ kg.m ⁻³) |
| Alnico | 1.25 | 52 | 43 | 500 | 800 | 60.10 ⁻⁸ | 7.3 à 7.4 |
| SrFe ₁₂ O ₁₉ | 0.41 | 265 | 34 | 300 | 450 | 104 | 4.9 à 5.1 |
| SmCO ₅ | 0.88 | 660 | 150 | 250 | 720 | 53.10 ⁻⁸ | 8.1 à 8.3 |
| Sm ₂ Co ₁₇ | 1.08 | 800 | 220 | 350 | 820 | 86.10 ⁻⁸ | 8.3 à 8.5 |
| Nd ₂ Fe ₁₄ B | 1.28 | 900 | 300 | 120 | 310 | 130.10 ⁻⁸ | 7.3 à 7.5 |

Tableau 2.1. Propriétés magnétiques et mécaniques des grandes familles des aimants permanents

Pour notre application de la séparation magnétique dans les deux voies sèche et humide, la séparation des particules conductrices de petites tailles nécessite la génération d'un champ magnétique dynamique intense. Afin de le produire, nous avons utilisé un tambour magnétique doté d'une succession d'aimants permanents du type NdFeB sous forme de barreaux rectangulaires sur son périmètre. Ce tambour tourne à une grande vitesse. Lors du passage du produit (granulaire ou liquide) au-dessus du tambour, les particules conductrices sont soumises à la variation du champ magnétique, ce qui entraîne une répulsion de cette dernière sous l'effet des courants induits, il s'agit donc d'une séparation magnétique à courants induits.

2.2.2 Modélisation du problème de la séparation à tambour magnétique

2.2.2.1 Modèle mathématique régissant le problème magnétique

2.2.2.1.1 Champ magnétique appliqué et équation du modèle

En électrotechnique, l'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les quatre équations de Maxwell qui lient les grandeurs magnétiques aux grandeurs électriques. Elles sont données par :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

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

Le système d'équations de Maxwell donné par ((2.2) -(2.5)) est indéterminé, il convient d'ajouter à ces équations, les relations exprimant les propriétés des matériaux qui s'appellent relations constitutives ou lois de comportement [Dular 1996], il s'agit de :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.8)$$

μ est la perméabilité magnétique, ε et σ sont respectivement la permittivité et la conductivité électrique.

Dans notre travail, pour permettre une séparation simultanée des particules conductrices et magnétiques, un champ magnétique dynamique doit être appliqué. Pour le générer, un tambour à aimants permanents entraîné par un moteur électrique a été utilisé. Dans l'approximation quasi-stationnaire ou approximation d'électrotechnique $\left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \right)$, le système d'équation de Maxwell réduit lié à notre application est donné comme suit :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.11)$$

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

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} = -\sigma (\vec{E} - \vec{v}_p \wedge \vec{B}) \quad (2.12)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.13)$$

\vec{J}_{ind} est la densité des courants induits, v_p est la vitesse de la particule et \vec{B}_r est la densité de flux magnétique rémanent.

La relation de la conservation du flux magnétique (2.11) implique qu'il existe un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (2.14)$$

Portant l'équation (2.14) dans (2.10) nous obtenons:

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (2.15)$$

L'équation (2.15) implique qu'il existe un potentiel scalaire électrique V tel que:

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

Il en résulte que :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.17)$$

La substitution des équations (2.12) et (2.13) dans l'équation (2.9) avec la prise en compte des équations (2.14) et (2.17) conduit à une formulation $A-V$ de l'équation EDP donnée par le système suivant :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla}V \right) - \sigma \left(\vec{v}_p \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r \\ \vec{\nabla} \cdot \left(\varepsilon \vec{\nabla}V \right) + \vec{\nabla} \cdot \left(\varepsilon \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Le système (2.18) n'a pas une solution unique, si \vec{A} est une solution, tout champ du type $(\vec{A} + \vec{\nabla}f)$, où f est une fonction scalaire quelconque est également solution de (2.18). Pour assurer l'unicité de la solution, on doit rajouter une équation scalaire, appelée condition de jauge [Dular 1996]. Les jauges couramment utilisées sont la jauge de coulomb $(\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0)$ et la jauge de Lorentz $(\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = -\mu\sigma V)$.

Pour résoudre le système l'équation(2.18), on associe des conditions aux limites qui peuvent être de type Dirichlet ou Newman ou bien mixtes.

- Dirichlet homogène : $A = 0$
- Dirichlet non homogène : $A = \text{Cte}$
- Newman homogène : $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
- Newman non homogène : $\frac{\partial A}{\partial n} = \text{Cte}$
- Dirichlet-Newman (Robin) : $\alpha A + b \frac{\partial A}{\partial n} = g$

α et β Sont des constantes.

Sur une limite de séparation entre deux milieux 1 et 2, les champs électromagnétiques pourraient être discontinus et ne sont par conséquent pas différentiables. Cependant, il est possible de dériver des conditions dites de passage ou de transmission permettant d'exprimer les relations entre deux grandeurs sur les frontières des deux milieux [Dular 1996].

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

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (2.19)$$

La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = \vec{0} \quad (2.20)$$

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

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (2.21)$$

La discontinuité de la composante normale du champ magnétique.

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (2.22)$$

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

2.2.2.1.2 Forces d'origines magnétiques appliquées aux particules

a) Force appliquée à la particule magnétique

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

Pour une particule ferromagnétique solide de volume V_p , la force magnétique appliquée est donnée par [Cao 2016, Anzi 2016, Nakai 2010]:

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} \quad (2.23)$$

Pour une configuration tridimensionnelle, et dans un système de coordonnées cartésiennes, la force appliquée sur une particule magnétique est donnée par [Heyrendt 2012]:

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p \left(M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) (H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k}) \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} F_{mx} = \mu_0 V_p \left(M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \\ F_{my} = \mu_0 V_p \left(M_x \frac{\partial H_y}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \\ F_{mz} = \mu_0 V_p \left(M_x \frac{\partial H_z}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_z}{\partial y} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2.25)$$

Ici \vec{M} représente l'aimantation volumique de la particule, elle est donnée par [Moon 1994]:

$$\vec{M} = \frac{\chi}{\mu_0} \left(\frac{B_x}{1 + \chi n_1}, \frac{B_y}{1 + \chi n_2}, \frac{B_z}{1 + \chi n_3} \right) \quad (2.26)$$

χ est la susceptibilité magnétique, elle est donnée par :

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (2.27)$$

n_1, n_2 et n_3 sont appelés les facteurs de démagnétisation. Ils dépendent de la forme géométrique de la particule. Pour une particule sphérique, $n_1 = n_2 = n_3 = \frac{1}{3}$. Par substitution dans l'équation (2.26) et la prise en compte de l'équation (2.27) on trouve :

$$\begin{cases} M_x = \frac{3\mu_r(\mu_r - 1)}{(\mu_r + 2)} H_x \\ M_y = \frac{3\mu_r(\mu_r - 1)}{(\mu_r + 2)} H_y \\ M_z = \frac{3\mu_r(\mu_r - 1)}{(\mu_r + 2)} H_z \end{cases} \quad (2.28)$$

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

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

b) Force inter particulaires (Dipôle-Dipôle) entre particules

En absence du champ magnétique, les mono-domaines qui forment une particule magnétique portent des moments magnétiques permanents orientés aléatoirement de telles sortes que le moment dipolaire total de la particule est nul. En présence du champ magnétique, tous les moments magnétiques des mono-domaines s'orientent suivant la direction du champ appliqué créant ainsi un moment magnétique global pour la particule [Ben Amira 2013]. Les particules aimantées se comportent comme des dipôles magnétiques, l'interaction entre le champ magnétique créé par chaque dipôle et les dipôles voisins se traduit par une force de nature attractive appelée force d'interaction magnétique. Une représentation d'une paire de dipôles magnétiques dans un repère tridimensionnel est montrée dans la Figure 2.2.

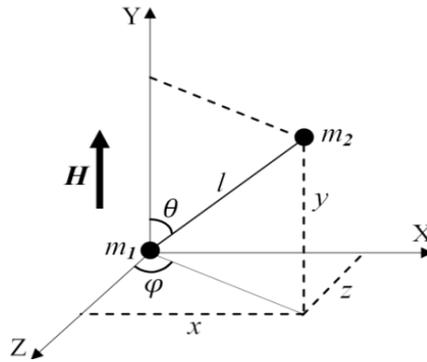


Figure 2.2. Système de deux particules sphériques aimantées voisines [Ku 2016]

Les trois composantes de la force d'interaction entre particules sont données par [Ku 2016]

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

m_x' , m_y' et m_z' sont les moments des dipôles magnétiques, ils sont donnés par [Ku 2016]:

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

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

c) Force appliquée à la particule conductrice

Lorsqu'une particule conductrice est soumise à un champ magnétique variable dans le temps, elle sera le siège d'une force électromotrice, ce qui conduit à la création des courants induits dans la particule. L'interaction entre la densité de ces courants et le champ magnétique dynamique appliqué résulte en une force magnétique de nature répulsive appelée force de Lorentz qui oblige la particule de s'éloigner de la source de champ. Pour une particule solide de volume V_p , la force de Lorentz est donnée par [Lungu 2001, Barre 2003, Dholu 2017]:

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

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

$$\begin{cases} F_{Lx} = V_p (J_y B_z - J_z B_y) \\ F_{Ly} = V_p (J_z B_x - J_x B_z) \\ F_{Lz} = V_p (J_x B_y - J_y B_x) \end{cases} \tag{2.33}$$

2.2.2.2 Modèle mathématique régissant le problème hydraulique

Afin d'exploiter le séparateur magnétique en voie humide, nous avons traité le cas d'un liquide en écoulement, il s'agit d'un mélange faiblement concentré en particules solides de fer et d'Aluminium. Ce liquide est mis en mouvement dans un canal rectangulaire ouvert coté ciel (Voir Figure 2.3), il s'agit donc d'un écoulement à surface libre. Lors de son passage sous le premier capteur aimant, les particules magnétiques sont attirées et collées à l'aimant permanent tandis que les particules conductrices passent avec le liquide. Leur passage au-dessus du tambour en rotation conduit à leur séparation sous l'effet de la force de Lorentz.

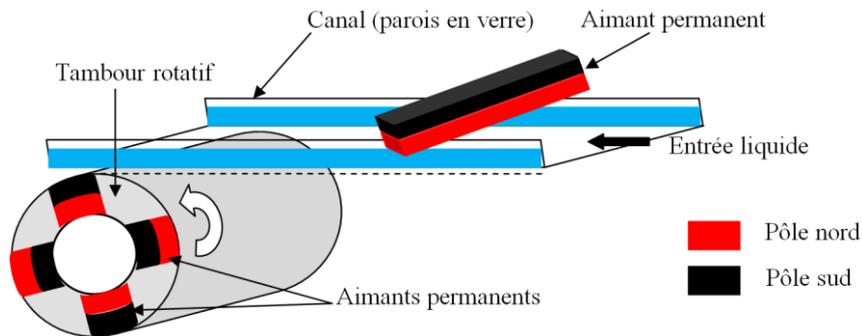


Figure 2.3. Schéma de principe du séparateur utilisé

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la filtration d'un liquide en écoulement. Afin de simplifier la modélisation du problème hydraulique lié à notre application de la séparation magnétique en voie humide, nous avons introduit les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Nous avons considéré un écoulement permanent, c'est-à-dire, à chaque instant, les paramètres tels que la profondeur d'eau h et la vitesse d'écoulement u restent constants en grandeur et en direction $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ et $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ en chaque section du canal (débit constant).
 - L'effet des particules magnétiques et conductrices sur l'écoulement est négligé.
 - L'effet des interactions de type mécanique et magnétique (Dipôle-Dipôles) est négligé.
- Pendant leurs mouvements, les particules sont soumises à des actions hydrauliques appliquées par le liquide. L'estimation de l'effet de ces actions sur le processus de la séparation repose sur la connaissance exacte des propriétés physiques du liquide et des paramètres de son écoulement.

2.2.2.2.1 Equation et type de l'écoulement du liquide traité

Dans la mécanique des fluides, le mouvement d'un écoulement incompressible est régi par l'équation de la conservation de la quantité de mouvement (équation de Navier Stocks) et l'équation de conservation de la masse (équation de continuité).

a) Equation de Navier Stockes

En hydraulique, pour un écoulement incompressible, les champs de la vitesse et de la pression sont décrits par l'équation de Navier Stockes donnée par [Ben Amira 2013, Sharifi 2015]:

$$\rho_f \frac{\partial \vec{u}_f}{\partial t} + \rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{\nabla} \vec{u}_f = -\vec{\nabla} p + \eta \Delta \vec{u}_f \quad (2.34)$$

ρ_f , \vec{u}_f , p et η représentent respectivement la masse volumique, la vitesse, la pression et la viscosité dynamique du fluide.

La projection de cette équation selon les trois directions de coordonnées x , y , z d'un repère cartésien donne [Viollet 2003] :

$$\begin{cases} \frac{\partial u_{fx}}{\partial t} + u_{fx} \frac{\partial u_{fx}}{\partial x} + u_{fy} \frac{\partial u_{fx}}{\partial y} + u_{fz} \frac{\partial u_{fx}}{\partial z} = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \Delta u_{fx} \\ \frac{\partial u_{fy}}{\partial t} + u_{fx} \frac{\partial u_{fy}}{\partial x} + u_{fy} \frac{\partial u_{fy}}{\partial y} + u_{fz} \frac{\partial u_{fy}}{\partial z} = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \Delta u_{fy} \\ \frac{\partial u_{fz}}{\partial t} + u_{fx} \frac{\partial u_{fz}}{\partial x} + u_{fy} \frac{\partial u_{fz}}{\partial y} + u_{fz} \frac{\partial u_{fz}}{\partial z} = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \Delta u_{fz} \end{cases} \quad (2.35)$$

b) Equation de continuité

L'équation de la continuité appelée aussi équation de conservation de la masse est donnée par [Gosse 1995, Chen 2019]:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (2.36)$$

Dans le cas d'un fluide incompressible, cette équation devient :

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (2.37)$$

En hydraulique, le régime d'écoulement est défini à partir du nombre de Reynolds qui représente le rapport entre les forces de frottement et les forces d'inertie. Pour un écoulement dans un canal rectangulaire, le nombre de Reynolds est donné par [Sivasubramanian 2014]:

$$R_e = \frac{\rho_f \bar{u}_f D_H}{\eta} \quad (2.38)$$

\bar{u}_f est la vitesse moyenne du liquide et D_H est le diamètre hydraulique

Pour un canal rectangulaire, le diamètre hydraulique est donné par :

$$D_H = \frac{b_e h_e}{b_e + 2h_e} \quad (2.39)$$

b_e et h_e représentent respectivement la largeur et la hauteur du canal.

En fonction du nombre de Reynolds, on distingue trois grandes catégories de régimes d'écoulement [Belounis 2016, Bigillon 2001] :

- Régime laminaire $R_e \leq 2000$.
- Régime de transition $2000 < R_e \leq 3000$.
- Régime turbulent $R_e > 3000$.

2.2.2.2 Forces d'origine hydraulique appliquées sur les particules

Le mouvement d'une particule dans un écoulement est décrit par l'ensemble des forces hydrodynamiques exercées sur cette particule et qui la maintiennent en équilibre ou provoquent son mouvement. Ces forces dépendent fortement des propriétés géométriques et physiques de la particule et de sa vitesse de déplacement. Dans les applications de la séparation magnétique en voie humides, ces forces peuvent influencer sur l'efficacité de la séparation. Pour cela, et afin de réaliser un séparateur de haute performance, ces forces doivent être introduites dans les étapes d'étude. La force totale exercée sur la particule est donnée par [Ghemmour 2011]:

$$\vec{F}_H = \vec{F}_G + \vec{F}_A + \vec{F}_T + \vec{F}_P + \vec{F}_{ma} \quad (2.40)$$

\vec{F}_G est la force de gravité, \vec{F}_A est la force d'Archimède, \vec{F}_T est la force de trainée, \vec{F}_P représente la force de portance, \vec{F}_{ma} est la force de masse ajoutée.

a) Force de gravité

Pour une particule solide de volume V_p et de masse volumique ρ_p , la force gravité ou force de gravité (pesanteur) est donnée par :

$$\vec{F}_G = \rho_p V_p \vec{g} \quad (2.41)$$

b) Force d'Archimède

La force d'Archimède est la force que subit un solide plongé dans un fluide soumis à un champ de gravité, elle est donnée en fonction de la masse volumique du fluide ρ_f par :

$$\vec{F}_A = \rho_f V_p \vec{g} \quad (2.42)$$

c) Force de trainée

En mécanique de fluides, la force de trainée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un fluide. Cette force est proportionnelle à la surface de la particule en regard de l'écoulement S , au carrée de la vitesse relative \vec{u}_r entre la vitesse locale du fluide et celle de la particule, à la masse volumique du fluide et au coefficient de trainée C_T [Ghemmour 2011].

$$\vec{F}_T = \frac{1}{2} \rho_f C_T S \vec{u}_r^2 \quad (2.43)$$

d) Force de portance

Elle représente la force subie par la particule en mouvement dans le fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du déplacement et qui a tendance à faire monter la particule vers le haut, elle est donnée par [Gosse 1995]:

$$\vec{F}_P = \frac{1}{2} \rho_f C_p S \vec{u}_r^2 \quad (2.44)$$

Ici, C_p est le coefficient de portance.

Les coefficients de trainée et de portance dépendent du nombre de Reynolds, de la forme de la particule et de l'orientation de la particule par rapport au sens du fluide. Le Tableau 2.2 donne

des valeurs du coefficient de trainée C_T pour quelques formes de particules en précisant les valeurs des nombres de Reynolds.

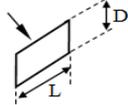
| Forme de la particule | $\frac{L}{D}$ | R_e | C_T |
|---|---------------|-------------------|--------------|
| Disque circulaire  | | $>10^3$ | 1.17 |
| Plaque rectangulaire  | 1 | $>10^3$ | 0.97 |
| Plaque circulaire de longueur L et de diamètre D <ul style="list-style-type: none"> • D'axe parallèle à l'écoulement • D'axe perpendiculaire à l'écoulement | 1 | $>10^3$ 10^5 | 0.91 0.63 |
| Hémisphère plein : <ul style="list-style-type: none"> • Base plane vers l'amont  • Base plane vers l'aval  | | $>10^3$ | 1.17 0.42 |
| Hémisphère creux : <ul style="list-style-type: none"> • Base plane vers l'amont  • Base plane vers l'aval  | | $>10^3$ | 1.43 0.38 |

Tableau 2.2. Coefficient de trainée pour des particules de forme géométrique simple [Gosse 1995].

e) *Force de Masse ajoutée*

Lorsque une particule subit des accélérations successives dans le liquide, une masse additionnelle est incluse dans le bilan de forces appliquées sur la particule. La différence entre la masse virtuelle correspond à l'augmentation de l'inertie qui résiste à l'accélération et la masse réelle est appelée masse induite ou masse ajoutée [Ghemmour 2011], cette force est donnée par [Belkhalifa 2008] :

$$\vec{F}_{ma} = -\rho_f V_p C_A \frac{d(\vec{u}_p - \vec{u}_f)}{dt} \quad (2.45)$$

Avec :

$$\begin{cases} C_A = 1.05 - \frac{0.0066}{(A_c^2 + 0.12)} \\ A_c = \frac{|\vec{u}_p - \vec{u}_f|}{d \left| \frac{d(\vec{u}_p - \vec{u}_f)}{dt} \right|} \end{cases} \quad (2.46)$$

2.2.2.3 Modèle mathématique régissant le problème dynamique particulière

Le mouvement des particules est le résultat de toutes les forces extérieures appliquées. Ce mouvement est régi par l'équation dynamique qui repose sur l'application de la deuxième loi de la dynamique de Newton donnée par :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} \quad (2.47)$$

m_p est la masse de la particule et \vec{F}_{ext} représente la résultante des forces extérieures.

Dans notre étude, nous avons considéré uniquement les forces dues à l'action de l'écoulement moyen et à la répartition des vitesses autour de la particule, les forces dues à l'accélération du liquide et à l'accélération de la particule ne sont pas prises en considération dans le processus de calcul. Compte tenu de ces simplifications, l'équation (2.47) se réécrit comme se suit :

$$m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} = \vec{F}' + \vec{F}_G + \vec{F}_A + \vec{F}_T + \vec{F}_P \quad (2.48)$$

Ici, \vec{F}' représente la force magnétique ou la force de Lorentz.

2.3 Modèle mathématique régissant le problème global

Dans la physique de la séparation magnétique dans les deux voies sèche et humide, les phénomènes en présence sont fortement couplés, l'évolution de chaque phénomène influe sur les autres. Afin de prendre en compte toutes les contraintes appliquées aux particules, on résout les systèmes d'équations suivants :

a) Séparation magnétique en voie sèche

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \left(\vec{v}_p \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r \\ \sum \vec{F}_{ext} = m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} \\ \vec{F}_{ext} = \vec{F}' + \vec{F}_G \end{cases} \quad (2.49)$$

b) Séparation magnétique en voie humide

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \left(\vec{v}_p \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r \\ \rho_f \frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \rho_f \vec{V}_f \cdot \vec{\nabla} \vec{V}_f = -\vec{\nabla} p + \eta \Delta \vec{V}_f \\ \sum \vec{F}_{ext} = m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} \\ \vec{F}_{ext} = \vec{F}' + \vec{F}_G + \vec{F}_A + \vec{F}_T + \vec{F}_P \end{cases} \quad (2.50)$$

2.4 Méthode de résolution

Nous avons vu que notre problème de la séparation magnétique est régi par des équations aux dérivées partielles EDP. La résolution des équations EDP peut se faire par l'utilisation de deux modes de calcul, méthodes exactes (analytique) et méthodes approximatives (numérique). La résolution analytique donne des résultats exacts du problème, mais elle reste limitée à des configurations simples et elle exige l'homogénéité et la linéarité des milieux en présence. Les méthodes numériques sont les méthodes les plus utilisées pour la résolution des problèmes électromagnétiques, surtout avec le développement des calculateurs. Ils ont prouvé leur capacité de prendre en compte les complexités les déformations géométriques et la possibilité de calcul des grandeurs locales. Parmi ces méthodes numériques, on peut citer les méthodes : différences finies, volumes finis, éléments de frontière et la méthode des éléments finis. Vu sa grande fiabilité et sa large utilisation dans les logiciels professionnels de résolution des problèmes physiques régis par les équations EDP, on adopte la méthode des éléments finis pour résoudre nos équations gouvernant le problème de la séparation magnétique basée sur les courants induits. Du fait que notre géométrie est invariante par translation, et que la réaction des particules (aimantation des particules magnétiques et création des courants induits) ne modifient pas le champ appliqué, donc, une résolution en 2D de l'équation EDP semble convenable.

2.4.1 Principe de la méthode des éléments finis

En électromagnétisme, La méthode des éléments finis (MEF) permet de résoudre les équations de Maxwell, son principe est basé sur la transformation des équations aux dérivées partielles (EDP) en un système d'équations algébriques linéaires [Spiteri 2002, Choua 2010]. La MEF consiste à mailler le domaine d'étude en sous domaines de petites tailles appelés éléments finis. Ces derniers peuvent être des triangles ou de quadrilatères pour la résolution 2D et de prismes ou d'hexaèdres pour la résolution 3D. Cette étape est souvent très délicate car la qualité de l'approximation par éléments finis dépend fortement de la structure de ce maillage. Les nœuds résultant de ce maillage dans lesquels on calcule l'inconnue de l'équation définissent la taille du système d'équations à résoudre. Des polynômes de Lagrange d'ordre un ou deux sont couramment utilisés pour interpoler la grandeur inconnue sur l'élément. Pour mettre sous forme intégrale l'équation EDP, on peut appliquer l'approche variationnelle basée sur la minimisation d'une fonctionnelle énergétique liée au problème traité ou par l'application de l'approche des résidus pondérés. On obtient ainsi un système d'équations dont la matrice est constituée d'intégrales. Le système obtenu peut être linéaire si les coefficients de la matrice sont indépendants de l'inconnue et non linéaire si certains coefficients dépendent de l'inconnue [Becheikh 2011]. L'utilisateur doit également imposer des conditions aux limites et une série de sollicitations. La dernière étape est la résolution du

système algébrique et l'exploitation des résultats en calculant et en représentant graphiquement une série des grandeurs dérivées [Laurent 2004].

2.4.2 Mise en œuvre de la méthode des éléments finis

2.4.2.1 Discrétisation du domaine d'étude en éléments finis et fonction d'interpolation

Le domaine d'étude est subdivisé en un nombre déterminé de petits sous domaines appelés éléments finis, Dans notre cas, et pour le calcul 2D, des éléments triangulaires sont utilisés (Figure 2.4).

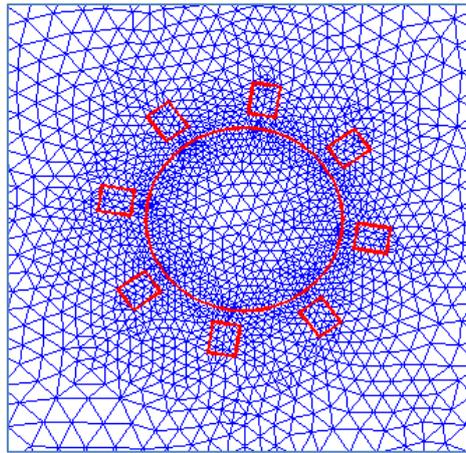


Figure 2.4. Maillage du domaine d'étude en éléments finis triangulaires

La deuxième étape après le maillage consiste à l'approximation de l'inconnue de l'équation EDP dans les éléments du maillage par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions doivent assurer la continuité entre deux éléments voisins qui ne doivent ni se chevaucher, ni laisser le vide entre eux. Il existe un grand nombre de fonctions d'interpolation possibles. Toutefois, on préfère les polynômes, puisqu'ils sont maniables sur ordinateurs et facile à dériver et à intégrer [Rapin 1993].

Dans notre cas, et pour les éléments triangulaires, on choisit une fonction polynomiale du premier ordre. En coordonnées cartésiennes, l'inconnue dans l'élément est donnée par :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy \quad (2.51)$$

Sous forme matricielle, l'équation (2.51) peut être réécrite comme suit :

$$A_e(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

x, y sont les variables de l'espace, a, b et c sont des constantes à déterminer.

Selon l'équation (2.51), la valeur de l'inconnue dans les nœuds constituant l'élément peut-être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} A_{e1} \\ A_{e2} \\ A_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Les termes A_{ei} représentent les valeurs nodales de l'inconnue et x_i et y_i représentent les coordonnées des nœuds i , ($i = 1, 2, 3$).

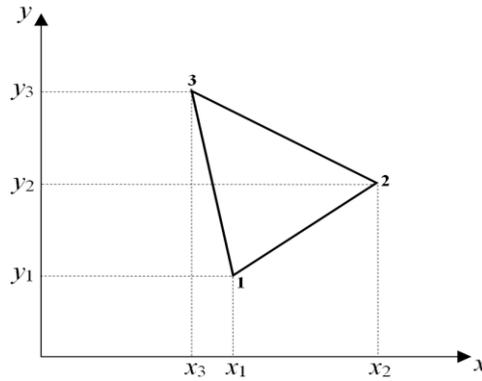


Figure 2.5. Elément type

De l'équation (2.53) on peut déduire que :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{e1} \\ A_{e2} \\ A_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

En remplaçant l'équation (2.54) dans l'équation (2.52) on obtient :

$$A_e(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{e1} \\ A_{e2} \\ A_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Il en résulte que:

$$A_e(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2S} \begin{bmatrix} (x_2 y_3 - x_3 y_2) & (x_3 y_1 - x_1 y_3) & (x_1 y_2 - x_2 y_1) \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{e1} \\ A_{e2} \\ A_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

En fonction des valeurs nodales, l'inconnue A dans un élément est donnée par [Carrió 2009]:

$$A_e(x, y) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i A_{ei} \quad (2.57)$$

Les fonctions α_i sont appelées fonctions d'interpolation ou fonctions de forme, elles sont données par [Rao 2004]:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{2S} [a_1 + b_1x + c_1y] \\ \alpha_2 = \frac{1}{2S} [a_2 + b_2x + c_2y] \\ \alpha_3 = \frac{1}{2S} [a_3 + b_3x + c_3y] \end{cases} \quad (2.58)$$

Les coefficients a_i , b_i , c_i et la section du triangle S sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} a_1 &= (x_2y_3 - x_3y_2); & b_1 &= (y_2 - y_3); & c_1 &= (x_3 - x_2) \\ a_2 &= (x_3y_1 - x_1y_3); & b_2 &= (y_3 - y_1); & c_2 &= (x_1 - x_3) \\ a_3 &= (x_1y_2 - x_2y_1); & b_3 &= (y_1 - y_2); & c_3 &= (x_2 - x_1) \\ S &= \frac{1}{2} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x_1 + (x_3 - x_2)y_1] \end{aligned} \quad (2.59)$$

Les fonctions de forme α_i ont les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} \alpha_i(x_i, y_j) = 1 \text{ si } i = j \\ \alpha_i(x_i, y_j) = 0 \text{ si } i \neq j \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \end{cases} \quad (2.60)$$

2.4.2.2 Formulation intégrale et équation algébrique

Nous rappelons que dans sa forme différentielle, l'équation aux dérivées partielles est liée à notre problème de séparation en terme de potentiel vecteur magnétique \vec{A} , et donnée par :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \left(\vec{v}_p \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r \quad (2.61)$$

Le premier terme de l'équation EDP peut être écrit comme suit:

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial A_z}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2.62)$$

A_z est la composante dans la direction z du potentiel vecteur magnétique \vec{A} .

D'une autre manière, l'équation (2.62) peut être écrite sous la forme d'une divergence d'un gradient:

$$\frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial A_z}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} A_z \quad (2.63)$$

Le second terme de l'équation EDP peut être exprimé comme suit :

$$\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = \sigma \frac{A_z(t + \Delta t) - A_z(t)}{\Delta t} \quad (2.64)$$

Le troisième terme de l'équation EDP correspond à la densité des courants induits dus au mouvement de la particule, il peut être exprimé par :

$$\sigma \left(\vec{v}_p \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) = -\sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} v_{px} - \frac{\partial A_z}{\partial y} v_{py} \right) \quad (2.65)$$

Le deuxième membre de l'équation EDP qui représente le terme source, peut être écrit comme suit :

$$\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial B_{rx}}{\partial y} \right) \quad (2.66)$$

L'équation (2.66) peut être écrite sous la forme d'une divergence :

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial B_{rx}}{\partial y} \right) = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_r \quad (2.67)$$

Avec :

$$\vec{B}_r = B_{ry} \vec{i} - B_{rx} \vec{j} \quad (2.68)$$

Finalement, l'équation EDP devient :

$$\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} A_z(t + \Delta t) - \sigma \frac{A_z(t + \Delta t)}{\Delta t} + \sigma \frac{A_z(t)}{\Delta t} - \sigma \frac{\partial A_z(t + \Delta t)}{\partial x} v_{px} - \sigma \frac{\partial A_z(t + \Delta t)}{\partial y} v_{py} = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_r \quad (2.69)$$

Pour mettre l'équation du modèle sous forme intégrale, on peut appliquer la méthode de Galerkin sur l'équation (2.69). Afin de simplifier le calcul, nous avons traité les termes de l'équation terme par terme [Bastos 2003].

Par l'application de la propriété : $a \vec{\nabla} \cdot \vec{b} = \vec{\nabla} \cdot a \vec{b} - \vec{b} \cdot \vec{\nabla} a$, le premier terme peut être décomposé en deux termes :

$$\int_S \alpha' \vec{\nabla} \cdot \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} A_z(t + \Delta t) dS = \int_S \vec{\nabla} \cdot \alpha' \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} A_z(t + \Delta t) dS - \int_S \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} A_z(t + \Delta t) \cdot \vec{\nabla} \alpha' dS \quad (2.70)$$

Après développement et calcul des intégrales, on aboutit à la forme matricielle de l'équation (2.70) donnée par [Bastos 2003] :

$$[K] = -\frac{1}{4\mu S} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_2 b_2 + c_2 c_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & b_3 b_3 + c_3 c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} \quad (2.71)$$

L'application de la méthode de Galerkin au deuxième terme de l'équation (2.69) donne :

$$\int_S \alpha' \left(-\sigma \frac{A(t+\Delta t)}{\Delta t} \right) dx dy = -\frac{\sigma}{\Delta t} \int_S \alpha' A(t+\Delta t) dx dy \quad (2.72)$$

Après calcul et développement, la forme matricielle du deuxième terme est donnée par :

$$[M] = -\frac{\sigma S}{6\Delta t} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} \quad (2.73)$$

De la même manière, les matrices correspondant au troisième et quatrième termes du premier membre de l'équation (2.69) sont les suivantes [Bastos 2003]:

$$[M'] = \frac{\sigma S}{6\Delta t} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t)} \quad (2.74)$$

$$[L] = -\frac{\sigma v_{px}}{6} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} - \frac{\sigma v_{py}}{6} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} \quad (2.75)$$

Concernant le deuxième membre, l'application de la méthode de Galerkin donne :

$$\int_S \alpha' \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_r dx dy \quad (2.76)$$

Selon le théorème de la divergence, l'équation (2.76) peut être décomposée en deux:

$$\int_S \alpha' \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_r dx dy = \int_S \vec{\nabla} \cdot \alpha' \frac{1}{\mu} \vec{B}_r dx dy - \int_S \vec{\nabla} \alpha' \cdot \frac{1}{\mu} \vec{B}_r dx dy \quad (2.77)$$

Tout calcul fait et développement, on obtient la matrice équivalente du terme source:

$$[F] = \frac{1}{2\mu} \begin{bmatrix} b_1 B_{ry} - c_1 B_{rx} \\ b_2 B_{ry} - c_2 B_{rx} \\ b_3 B_{ry} - c_3 B_{rx} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Après l'évaluation des termes donnés par les équations (2.71), (2.73), (2.74), (2.75) et (2.78) et après assemblage des systèmes élémentaires, on aboutit au système algébrique global lequel pour notre cas prend la forme suivante [Bastos 2003] :

$$[P][A]^{(t+\Delta t)} = [Q] \quad (2.79)$$

$[A]^{(t+\Delta t)}$ représente le vecteur inconnu du potentiel vecteur magnétique à l'instant $(t + \Delta t)$ et $[Q]$ représente le vecteur source résultant de l'addition des deux contributions, aimantation rémanente des aimants permanents et les courants induits de l'instant précédent (t) .

2.4.2.3 Résolution numérique des systèmes d'équations algébriques

Afin de résoudre un système d'équations algébriques linéaires, on peut utiliser les méthodes directes (exactes) et les méthodes itératives (approximatives). Les méthodes directes sont applicables pour résoudre les systèmes linéaires de petite taille, mais elles demandent beaucoup d'espace mémoire et le temps de calcul est élevé. Parmi ces méthodes on peut citer : Méthode d'élimination de Gauss, Kramer, Jordon, Crout. Pour les matrices creuses de grande taille, les méthodes itératives sont les mieux adaptées. Parmi ces méthodes on peut citer : Méthode de Jacobi, Gauss Seidel, gradient conjugué, Krylov ... etc.

2.5 Outils de calcul utilisés

2.5.1 Modèle magnétique

Afin de résoudre l'équation aux dérivées partielles liée au problème magnétique de la séparation magnétique, nous avons mis en œuvre le logiciel commercial Matlab R2013b. Pour notre cas, et pour résoudre l'équation de la magnétodynamique avec la prise en compte du terme mouvement, nous avons développé un code de calcul éléments finis 2D basé sur l'exploitation de quelques instructions de la plateforme (Partial Différentiel Equation Toolbox : PDE Tool) dont la méthode de calcul par éléments finis pour certain problèmes est déjà programmée. Pour l'exploitation des résultats trouvés, nous avons développé des sous programmes qui nous permettent de calculer d'autres grandeurs dérivées de la solution de l'équation EDP telles que la densité du flux magnétique, l'aimantation des particules magnétiques, les courants induits, la force Magnétique et la force de Lorentz.

2.5.2 Modèle hydraulique

En ce qui concerne le problème hydraulique, et pour résoudre l'équation de Navier stocks, nous avons utilisé le logiciel commercial Comsol Multiphasiques (version 3.5a). L'avantage sur lequel nous nous sommes basés pour choisir l'utilisation de ce logiciel est sa possibilité de connexion avec le logiciel Matlab. Il est possible d'exporter les résultats obtenus dans l'environnement Matlab pour les exploiter dans d'autres sous routines qui servent à calculer d'autres grandeurs qui ne sont pas prises en charge par le logiciel ou pour résoudre un autre problème comme le problème dynamique particulière lié à la séparation magnétique.

2.5.3 Modèle dynamique particulière

La trajectoire de la particule est calculée à partir de la résolution de l'équation dynamique résultant de l'application de la deuxième loi de la dynamique de Newton. Il s'agit d'une équation différentielle non linéaire à cause de la dépendance des forces appliquées de la position de la particule. Pour résoudre cette équation, nous avons appliqué la méthode itérative de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) [Christodoulou 2009]. Cette méthode nécessite la connaissance des valeurs initiales pour démarrer l'intégration de l'équation différentielle. Les coefficients de Runge-Kutta sont les plus utilisées car elles sont faciles à programmer. Pour obtenir une précision meilleure, on adapte le pas du temps. L'algorithme permettant la programmation de la méthode de Runge-Kutta est le suivant :

Résolution des modèles magnétique et hydraulique et calcul des forces.

Introduction des valeurs initiales $x_0; y_0; v_{x0}; v_{y0}; t_0; t_{final}; pas; i = 1;$

while $t_0 \leq t_f$

$$k_{1vx} = pas \cdot f(v_{x0}, v_{y0}); k_{1x} = pas \cdot v_{x0}$$

$$k_{1vy} = pas \cdot g(v_{x0}, v_{y0}); k_{1y} = pas \cdot v_{y0}$$

$$k_{2vx} = pas \cdot f\left(v_{x0} + \frac{k_{1vx}}{2}, v_{y0} + \frac{k_{1vy}}{2}\right); k_{2x} = pas \cdot \left(v_{x0} + \frac{k_{1vx}}{2}\right)$$

$$k_{2vy} = pas \cdot g\left(v_{x0} + \frac{k_{1vx}}{2}, v_{y0} + \frac{k_{1vy}}{2}\right); k_{2y} = pas \cdot \left(v_{y0} + \frac{k_{1vy}}{2}\right)$$

$$k_{3vx} = pas \cdot f\left(v_{x0} + \frac{k_{2vx}}{2}, v_{y0} + \frac{k_{2vy}}{2}\right); k_{3x} = pas \cdot \left(v_{x0} + \frac{k_{2vx}}{2}\right)$$

$$k_{3vy} = pas \cdot g\left(v_{x0} + \frac{k_{2vx}}{2}, v_{y0} + \frac{k_{2vy}}{2}\right); k_{3y} = pas \cdot \left(v_{y0} + \frac{k_{2vy}}{2}\right)$$

$$k_{4vx} = pas \cdot f\left(v_{x0} + \frac{k_{3vx}}{1}, v_{y0} + \frac{k_{3vy}}{1}\right); k_{4x} = pas \cdot \left(v_{x0} + \frac{k_{3vx}}{1}\right)$$

$$k_{4vy} = pas \cdot g\left(v_{x0} + \frac{k_{3vx}}{1}, v_{y0} + \frac{k_{3vy}}{1}\right); k_{4y} = pas \cdot \left(v_{y0} + \frac{k_{3vy}}{1}\right)$$

$$x = x_0 + \frac{1}{6}(k_{1x} + 2k_{2x} + 2k_{3x} + k_{4x}); v_x = v_{x0} + \frac{1}{6}(k_{1vx} + 2k_{2vx} + 2k_{3vx} + k_{4vx});$$

$$y = y_0 + \frac{1}{6}(k_{1y} + 2k_{2y} + 2k_{3y} + k_{4y}); v_y = v_{y0} + \frac{1}{6}(k_{1vy} + 2k_{2vy} + 2k_{3vy} + k_{4vy});$$

Stockage des résultats $X(i) = x; Y(i) = y; V_{x0}(i) = v_x; V_{y0}(i) = v_y$

Actualisation des valeurs initiales $x_0 = x; y_0 = y; v_{x0} = v_x; v_{y0} = v_y$

Incrémentation du temps et de l'indice de stockage $t_0 = t_0 + pas; i = i + 1$

end

2.5.4 Résolution du problème global

Dans la physique de la séparation magnétique dans ses deux voies sèche et humide, les phénomènes en présence sont fortement couplés, l'évolution de chaque phénomène influe sur les autres. Dans notre cas, nous avons considéré des matériaux très faiblement concentrés en particules très fines de fer. La taille et la concentration faibles des particules empêchent tout effet local sur la distribution du champ. De même, nous avons considéré que les particules d'aluminium n'influent pas sur le régime d'écoulement. Dans ces conditions, les trois phénomènes se trouvaient découplés et une résolution alternée est permise. L'algorithme qui montre les différentes étapes de la résolution est le suivant :

Résolution du problème hydraulique par le logiciel Comsol multi physiques et exportation des résultats vers environnement Matlab.

Calcul du champ de la vitesse du liquide partout dans le canal.

Construction de la géométrie fixe (tambour, domaine d'étude)

Introduction des conditions initiales $\theta = 0$; x_0 ; y_0 ; v_{x0} ; v_{y0} ; N_p ; n ; y_{\max} ; $i = 1$;

while $y_0 \geq y_{\min}$

Construction de la géométrie mobile (aimants permanents, particule).

Résolution du modèle magnétique.

Calcul des forces d'origine magnétique (magnétique ou Lorentz) et les forces hydrauliques qui dépendent de la position et vitesse de la particule et de la vitesse du liquide.

Résolution de l'équation dynamique par la méthode de Runge-Kutta et calcul des nouvelles positions et vitesses (x, y, v_x, v_y) .

Stockage des résultats $X(i) = x$; $Y(i) = y$; $V_{x0}(i) = v_x$; $V_{y0}(i) = v_y$.

Actualisation des vitesses et positions $x_0 = x$; $y_0 = y$; $v_{x0} = v_x$; $v_{y0} = v_y$.

Incrémentation $\theta = \theta + \Delta\theta$; $i = i + 1$.

end

Traçage de la géométrie et des trajectoires

Calcul de la position finale de la séparation et du temps de calcul.

$\Delta\theta$ est l'angle de rotation des aimants permanents, x_0 , y_0 , v_{x0} et v_{y0} sont les positions et les vitesses initiales de la particule, N_p et n sont respectivement le nombre de pôles et la vitesse de rotation du tambour et y_{\min} représente la hauteur de lieu final de la séparation.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les modèles mathématiques régissant les phénomènes entrant dans la physique de la séparation magnétiques. Il s'agit du phénomène magnétique lié au champ magnétique appliqué et la réaction des particules à séparer. Le phénomène hydraulique est lié au mouvement du liquide dans un canal à surface libre et les différentes forces de nature hydraulique appliquées aux particules. En ce qui concerne le phénomène dynamique particulaire, il s'agit du mouvement des particules sous l'effet des forces appliquées. Aussi, nous avons présenté le principe de la méthode des éléments finis et les outils de calcul utilisés pour la résolution de l'équation aux dérivées partielles liées à chaque phénomène. Pour calculer le comportement des particules magnétiques et conductrices traduit par leurs trajectoires, nous avons résolu le système global magnétohydrodynamique particulaire. Pour cela, nous avons couplé les méthodes numériques éléments finis 2D et Runge Kutta d'ordre 4 (RK4). La possibilité de connecter les deux logiciels Matlab et Comsol nous a permis d'exporter les résultats de la résolution de l'équation de Navier Stocks vers Matlab et les intégrer dans le calcul des trajectoires. Enfin, la présentation de la méthode de Range-Kutta a pour but de clarifier les différentes étapes de résolution des équations différentielles non linéaires.

Chapitre 3

Simulation de la séparation de particules non homogènes et optimisation du séparateur proposé

3 Simulation de la séparation de particules non homogènes et optimisation du séparateur proposé

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la simulation du processus de séparation magnétique des particules non homogènes par champ magnétique dynamique généré par un tambour à aimants permanents en voies sèche et humide. Une telle simulation est basée sur la mise en œuvre des équations mathématiques développées pour modéliser les phénomènes en présence pour chaque application (voies sèche et humide).

L'objectif de la simulation achevée est multiple. Il s'agit de la vérification de la nature du champ appliqué, les hypothèses simplificatrices introduites, la capacité des modèles mathématiques élaborés et des approches développées à prendre en charge correctement les complexités géométriques et le comportement aléatoire des milieux traités, la capacité de la technique de séparation proposée à réaliser une séparation simultanée des particules non homogènes et l'identification des paramètres principaux influant sur les performances de la séparation et les limites d'utilisation du type de séparateur utilisé.

Pour les hypothèses simplificatrices introduites, nous avons négligé l'effet des bords en supposant que la longueur de l'aimant permanent ($l_A=10\text{cm}$) est plus important que son largeur ($h_A=1\text{cm}$). Pour le traitement de la poudre fine de fer, la taille très fine des particules a permis de considérer une forme géométrique sphérique permettant facilement l'application des formules modélisant les différentes forces appliquées.

Pour les particules conductrices et magnétiques (diam, para et ferromagnétiques) de taille importante, nous avons considéré des barreaux rectangulaire à longueur plus proche de celui du tambour et section très petite.

Ces conditions géométriques imposées aux particules donnent des particules à volumes très petits permettant la négligence de l'effet du champ de réaction des particules et donc la négligence des perturbations locales du champ appliqué.

Pour le phénomène dynamique particulaire, nous avons supposé que les particules n'exercent aucune rotation lors de leur mouvement ce qui préserve l'invariance par translation de toutes les composantes du dispositif traité.

Pour l'application en voie humide, il s'agit de la purification d'un liquide en écoulement à surface libre. Nous avons supposé un canal de profondeur égale à la longueur du tambour.

Toutes ces hypothèses réunies ont permis de considérer une invariance par translation du dispositif traité et donc une étude bidimensionnelle (2D) du problème de la séparation.

Afin de réduire l'effet de l'approche de résolution 2D sur l'exactitude des résultats de calcul des différentes grandeurs notamment les forces, nous avons introduit le volume réel des particules traitées dans l'expression des forces.

3.2 Dispositif de séparation étudié et spécification du champ appliqué

Le dispositif de séparation proposé est constitué principalement d'un tambour qui est en fait un arrangement circulaire d'aimants permanents (NdFeB) formant une roue polaire. La polarité des aimants peut être choisie en fonction des spécifications du champ voulu. Le domaine d'étude permettant le calcul de la distribution du champ généré par le tambour est présenté dans la figure 3.1.

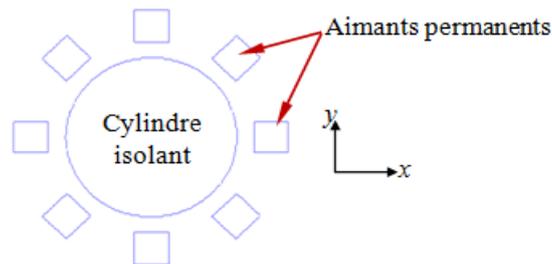


Figure 3.1. Domaine d'étude 2D du tambour magnétique

Dans un séparateur magnétique, la séparation peut se produire dans chaque lieu où le champ a un effet significatif sur les particules. De cela, et afin de connaître les limites du domaine d'étude du processus de séparation nous avons calculé et évalué la distribution du champ magnétique dans l'environnement du tambour.

La représentation des variations de la densité du flux magnétique (induction) le long d'une ligne située à une distance de 1.5cm au-dessus du tambour (Figure 3.2) montre que la séparation peut se produire à partir du point situé à 15cm du centre du tambour.

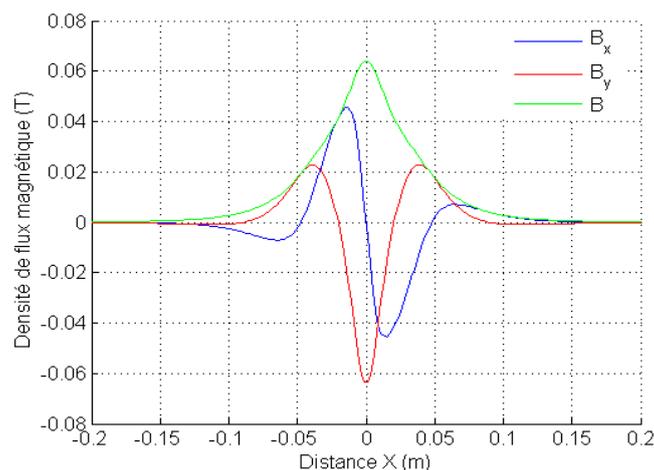


Figure 3.2. Variation de l'induction magnétique le long d'une ligne située au-dessus du tambour.

3.3 Justification de la résolution 2D du problème de la séparation

Afin de justifier l'approche de résolution 2D qui offre l'avantage de réduire le temps de calcul, nous avons effectué une comparaison entre les résultats obtenus par une résolution 2D

et ceux obtenus par une résolution 3D. Les domaines d'étude pour les deux cas 2D et 3D sont montrés dans la Figure 3.3.

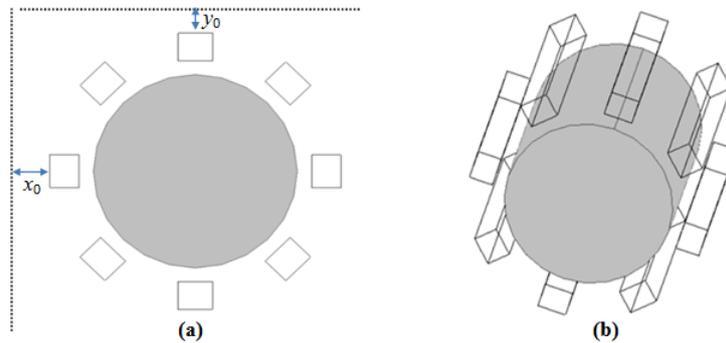


Figure 3.3. Domaine d'étude 2D (a), Domaine d'étude 3D (b).

Pour effectuer le calcul permettant la comparaison des résultats des deux résolutions, nous avons utilisé le logiciel commercial Comsol multiphysiques. Les paramètres de calcul sont regroupés dans le Tableau 3.1.

| | Dimensions du cylindre | Dimensions des aimants | Induction rémanente |
|----------|---|---------------------------------------|---------------------|
| Etude 2D | $\pi \times 3.5^2 \text{ cm}^2$ | $1.2 \times 1 \text{ cm}^2$ | 1.1 T |
| Etude 3D | $\pi \times 3.5^2 \times 10 \text{ cm}^3$ | $1.2 \times 1 \times 10 \text{ cm}^3$ | 1.1 T |

Tableau 3.1. Paramètres du calcul pour effectuer la comparaison entre les résultats 2D et 3D.

La comparaison des variations de l'induction magnétique le long de deux lignes situées au milieu du tambour et trouvées respectivement à des distances $x_0=5\text{mm}$ (variation suivant l'axe des y) et $y_0=1\text{mm}$ (variation suivant l'axe des x) du périmètre du tambour (voir Figure 3.3.a) a donné les résultats de la Figure 3.4.

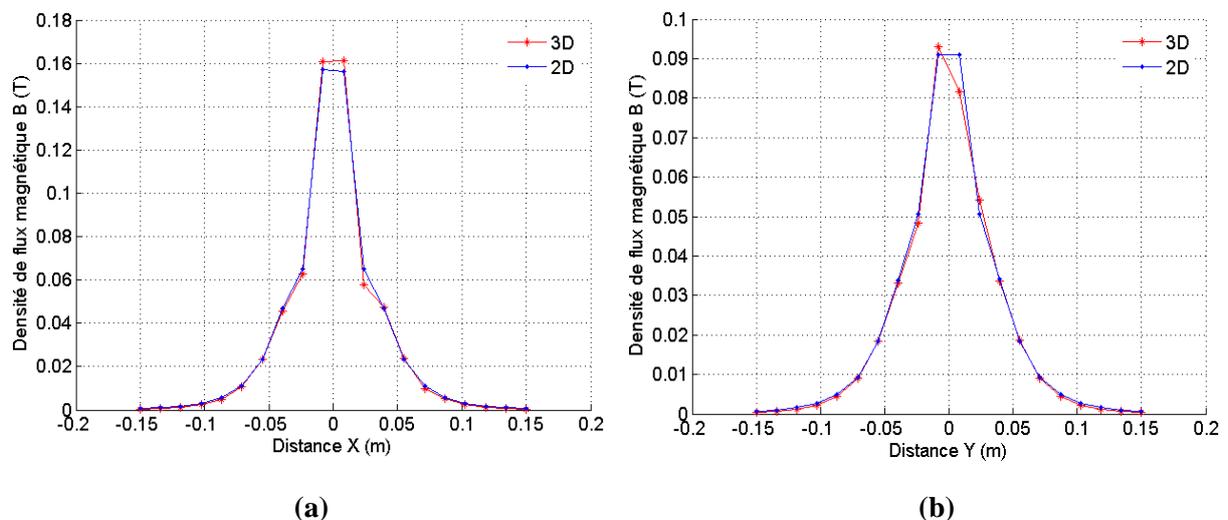


Figure 3.4. Variation de l'induction le long de la ligne horizontale (a), Variation de l'induction le long de la ligne verticale (b).

La Figure 3.4 montre des différences négligeables entre les résultats de calculs 2D et 3D, $\Delta B(x)_{\max} = 0.0047\text{T}$ et $\Delta B(y)_{\max} = 0.0094\text{T}$. Cela justifie l'avantage qu'offre l'approche de résolution 2D en termes de précision et réduction du temps de calcul.

3.4 Calcul des grandeurs électromagnétiques dans le séparateur magnétique proposé

La grandeur physique clé qui permet la vérification de la possibilité de séparation et l'estimation des performances du séparateur est la force magnétique résultat de l'interaction entre le champ appliqué et la particule. Le calcul de cette force exige la connaissance de la distribution du champ magnétique dans la zone où la séparation se produit. Une telle distribution qui peut être représentée par les termes de potentiel vecteur magnétique \vec{A} , d'induction magnétique \vec{B} ou du champ magnétique \vec{H} peut servir d'outil de vérification des modèles développés et des techniques de résolution. Pour cela, et afin de diversifier les manières de compréhension des résultats et de vérification de leur exactitude, on présente au début de cette section les distributions du potentiel vecteur et de l'induction magnétiques.

3.4.1 Distribution du potentiel vecteur et induction magnétiques

L'intérêt majeur d'une formulation en terme de \vec{A} est la dérivation d'un grand nombre de grandeurs magnétiques (densité de flux magnétique, densité des courants induits, forces magnétiques) par une simple intégration ou dérivation de la fonction potentiel vecteur magnétique à la localité d'intérêt. En plus, la colinéarité entre le potentiel vecteur magnétique et le courant d'excitation et sa valeur nulle sur les axes de symétrie permet une vérification rapide des calculs. En plus, la distribution de l'induction magnétique permet de connaître les localités à forte induction magnétique et donc la concentration des forces de nature magnétique. Pour ces raisons, on présente ces grandeurs au départ de chaque exposé des résultats de simulation. Pour une position donnée d'un tambour à huit aimants permanents identiques, la résolution du problème magnétique a conduit aux distributions du potentiel vecteur et induction magnétiques de la Figure 3.5.

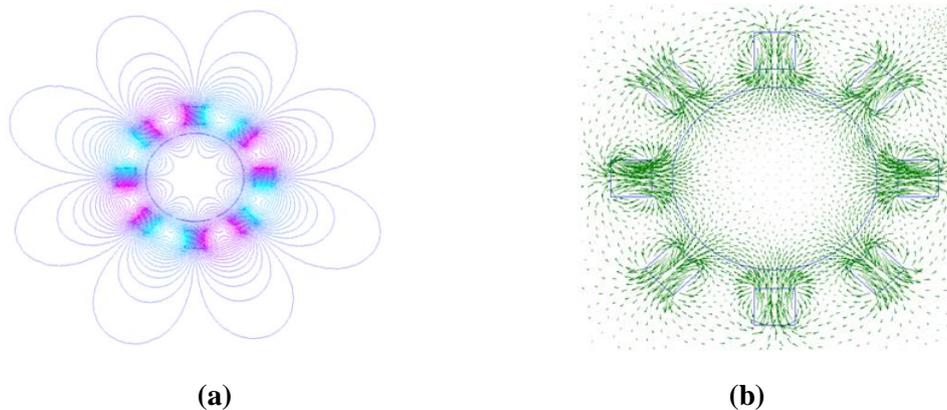


Figure 3.5. Distribution du potentiel vecteur magnétique \vec{A} (a), Distribution de l'induction magnétique (b).

Les spécifications (symétries et concentration de \vec{A} et \vec{B} qui reflètent le type de polarité des aimants choisis) que montrent les distributions de la Figure 3.5 prouvent l'exactitude des résultats obtenus ainsi que la précision de la technique de résolution appliquée. L'intensité et le gradient du champ dans l'environnement du tambour donnent une information très importante sur l'efficacité de la force qui va être appliquée au milieu à traiter.

3.4.2 Forces d'origine magnétique appliquées aux particules métalliques

Pour une séparation purement magnétique, la force d'origine magnétique est seule responsable à la capture ou la répulsion des particules. Selon la nature de la particule à séparer, en plus de sa taille, la force est fonction du champ ou de son gradient à sa localité.

3.4.2.1 Force appliquée aux particules ferromagnétiques

L'application d'un champ magnétique extérieur sur des particules magnétiques conduit à leur aimantation. L'interaction entre cette aimantation et le champ appliqué se traduit par une force qui oblige toute particule para et ferromagnétique à dévier vers la zone où le champ est très intense. De cela, et selon la Figure 3.5.b, les particules para et ferromagnétiques seront capturées au niveau des aimants permanents. Pour montrer ce fait, nous avons calculé et présenté la distribution de la densité de cette force dans l'environnement du tambour (voir Figure 3.6).

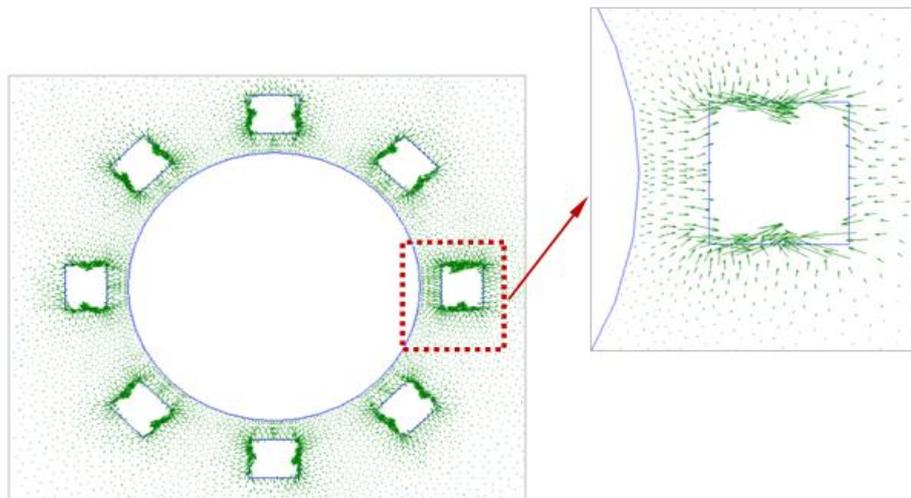


Figure 3.6. Distribution de la force appliquée aux particules magnétiques

La Figure 3.6 montre que tous les vecteurs sont dirigés vers les aimants ce qui signifie qu'ils jouent le rôle de capteurs des particules para et ferromagnétique. La résultante de la force calculée pour une particule cubique solide de taille $10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-5} \text{ m}^3$ et $\mu_r = 80$ initialement placée à une distance $d = 2 \text{ cm}$ du tambour est montrée dans la Figure 3.7. Ces conditions de calcul donnent une amplitude de $F_m = 5.92 \times 10^{-11} \text{ N}$.

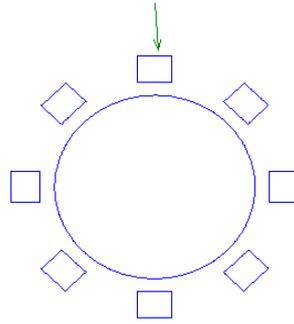


Figure 3.7. Résultante de la force appliquée sur une particule ferromagnétique

Pour voir la signification de cette force au voisinage du tambour, nous avons estimé sa valeur à des positions différentes de la particule par rapport au tambour. La variation de l'intensité de la force en fonction de la distance d entre la particule et le tambour est montrée dans la Figure 3.8.

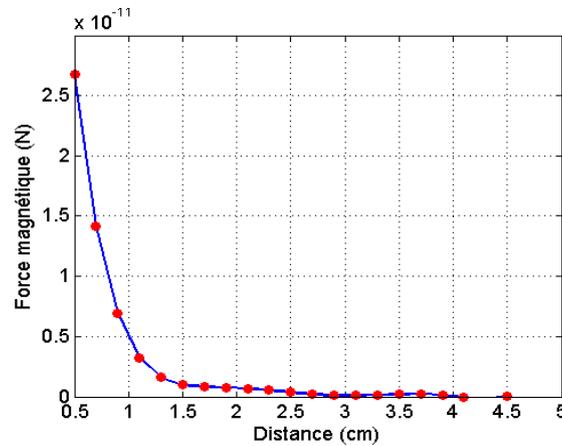


Figure 3.8. Variation de la force magnétique en fonction de la distance entre la particule et le tambour

La figure 3.8 montre que la force magnétique décroît exponentiellement avec l'augmentation de la distance entre la particule et le tambour. A une distance $d=4\text{cm}$ aucune capture ne peut se produire.

3.4.2.2 Force appliquée aux particules conductrices

L'application d'un champ magnétique dynamique sur des particules conductrices conduit à la création des courants induits. L'intensité de ces courants dépend de l'intensité du champ appliqué, de sa fréquence, de la taille et de la conductivité des particules. L'interaction entre ces courants induits et le champ appliqué se traduit par une force répulsive appelée force de Lorentz qui travaille à repousser ces particules vers la zone où le champ est plus faible.

Pour vérifier la nature répulsive de cette force, nous avons considéré une particule de forme cubique de taille $1 \times 1 \times 0.1 \text{ cm}^3$ ayant une conductivité électrique $\sigma = 5 \times 10^7 \text{ S/m}$ (dans la simulation, la particule est supposée invariante par translation, par contre pour calculer sa valeur, on multiplie la densité de la force par son volume réel). Le calcul a donné le résultat de la Figure 3.9.

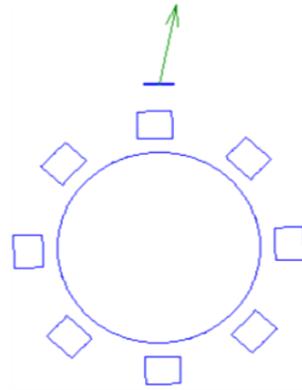


Figure 3.9. Résultante de la force de Lorentz appliquée sur une particule conductrice.

La figure ci-dessus montre clairement la nature répulsive de la force de Lorentz. Cela signifie que toute particule conductrice passant au voisinage du tambour sera repoussée plus loin.

Pour un pas du temps $dt=1\times 10^{-4}$ s qui correspond à un pas angulaire de rotation du tambour à huit aimants permanents $d\theta=1.8^\circ$, nous avons trouvé une force de valeur $F_L = 0.027$ N.

3.4.2.3 Force appliquée aux particules dia et paramagnétiques

Du fait que la susceptibilité magnétique des matériaux dia et paramagnétique est très faible par rapport aux matériaux ferromagnétiques, la force appliquée sera donc très faible (aimantation très faible). D'autre part, la susceptibilité magnétique des particules diamagnétiques est inférieure à zéro. Cela conduit au fait que contrairement aux particules paramagnétiques, la force d'interaction entre les particules diamagnétiques et le champ appliqué sera répulsive. Pour vérifier ce fait, nous avons calculé la force résultante appliquée sur une particule cubique de taille $10^{-5}\times 10^{-5}\times 10^{-5}$ m³ placée à une distance $d=2$ cm par rapport au tambour. Pour le cas de matériaux paramagnétiques ayant $\chi=2.2\times 10^{-5}$ et diamagnétiques ayant $\chi=-1\times 10^{-5}$, nous avons trouvé les résultats de la Figure 3.10.

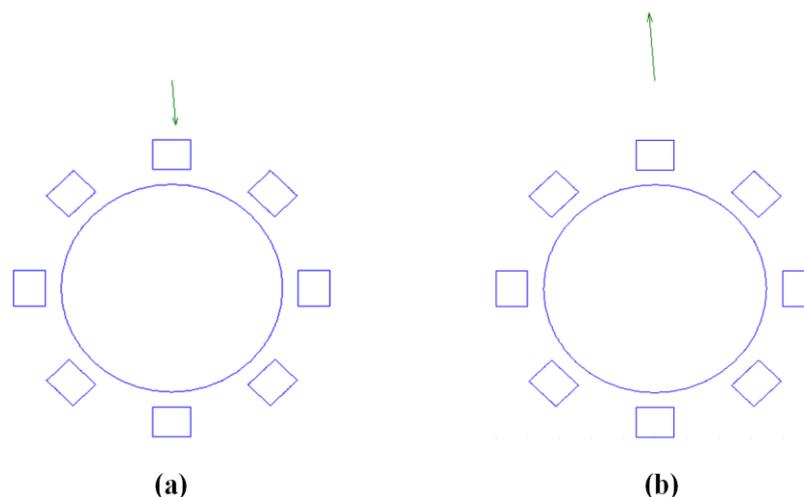


Figure 3.10. Résultante de la force magnétique appliquée aux particules dia et paramagnétiques.
 a) paramagnétique, b) diamagnétique.

Les valeurs absolues de la résultante de ces forces sont respectivement $F_{mp} = 1.6497 \times 10^{-17}$ N (particule paramagnétique) et $F_{md} = 7.4987 \times 10^{-18}$ N (particule diamagnétique).

3.5 Vérification de la nature du champ et des grandeurs magnétiques générés par le tambour

3.5.1 Potentiel vecteur magnétique

Dans cette section, on s'est intéressé à la vérification de la nature dynamique du champ généré et l'identification des spécifications des grandeurs clés de la séparation. Pour une vérification facile à comprendre et complète, nous avons commencé par le potentiel vecteur magnétique. Pour un tambour entraîné à une vitesse $n=3000$ tr/min, l'évaluation du potentiel vecteur magnétique dans un point situé au-dessus du tambour pour différents cas de nombre d'aimants a donné les résultats de la Figure 3.11.

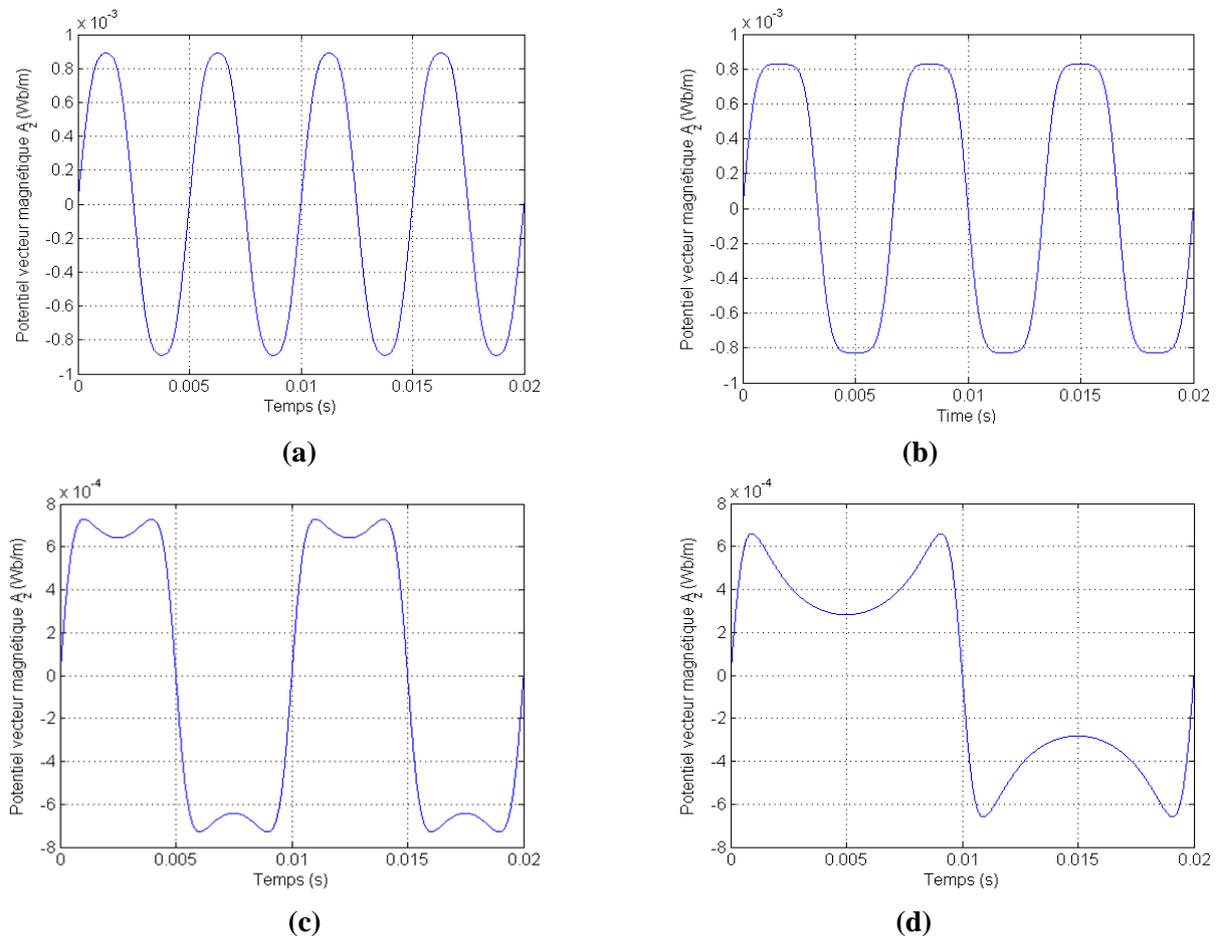


Figure 3.11. Variation du potentiel vecteur magnétique en fonction du temps pour différents cas de nombre d'aimants. (a) 8 pôles, (b) 6 pôles, (c) 4 pôles, (d) 2 pôles.

La figure 3.11 montre clairement que le potentiel vecteur magnétique est une fonction alternative. Son allure dépend fortement du nombre d'aimants et de leurs dimensions.

L'augmentation du nombre d'aimants augmente la fréquence et permet l'aboutissement à un signal purement sinusoïdal.

3.5.2 Induction magnétique

L'induction magnétique est la grandeur magnétique ayant un sens physique. Elle se dérive directement du potentiel vecteur magnétique \vec{A} . Pour une excitation dans la direction \vec{k} elle a dans le plan d'étude (x, y) les composantes suivantes:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \end{cases} \quad (3.1)$$

L'intérêt de la vérification de la nature de l'induction magnétique réside dans le fait que la force magnétique responsable de la séparation est fonction de l'induction. L'évaluation des variations des composantes de l'induction magnétique dans le temps en un point donné pour des cas différents de nombre d'aimants a donné les résultats de la Figure 3.12.

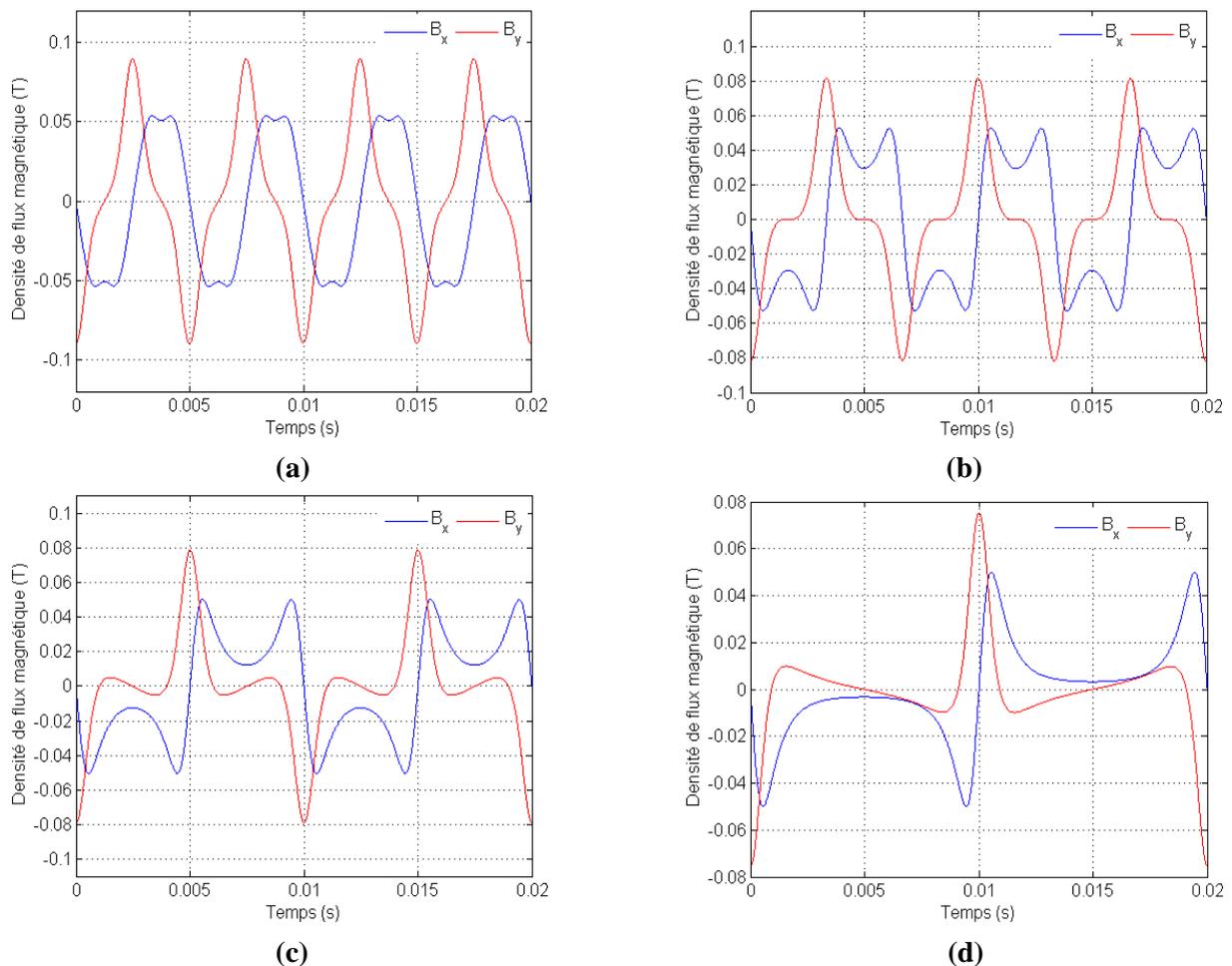


Figure 3.12. Variation des composantes de l'induction magnétique pour un tour complet de rotation du tambour en fonction du temps. (a) 8pôles, (b) 6pôles, (c) 4pôles, (d) 2 pôles.

Le résultat de la Figure 3.12 montre que l'allure de l'induction magnétique générée par le tambour en rotation a une nature alternative et quasi sinusoïdale. Plus on augmente le nombre de pôles plus on se rapproche de la sinusoïde.

Pour vérifier la valeur de la fréquence liée à chaque cas de nombre d'aimants, nous avons confronté les résultats de simulation avec ceux calculé analytiquement en se servant de la relation liant la fréquence et la vitesse de rotation [Ben Ahmed 05] :

$$f = p.n \tag{3.2}$$

Où p est le nombre de pair de pôles (aimants permanents) et n est la vitesse de rotation en tr/s.

| Nombre de pôles | Fréquence (Hz) | |
|-----------------|----------------|------------|
| | Théorique | Simulation |
| 2 | 50 | 50 |
| 4 | 100 | 100 |
| 6 | 150 | 150 |
| 8 | 200 | 200 |

Tableau 3.2. Comparaison entre les fréquences calculées analytiquement et simulées pour des cas différents de nombre de pôles pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000$ tr/min.

Le tableau montre une parfaite concordance entre les valeurs simulées et celles calculées analytiquement.

Pour étudier l'effet de la vitesse de rotation du tambour sur la fréquence du champ généré, nous avons calculé le potentiel vecteur magnétique pour le cas d'un tambour à huit aimants pour deux vitesses de rotation du tambour. Les résultats obtenus et présentés dans la Figure 3.13 montrent que l'augmentation de la vitesse conduit à l'augmentation de la fréquence du champ appliqué.

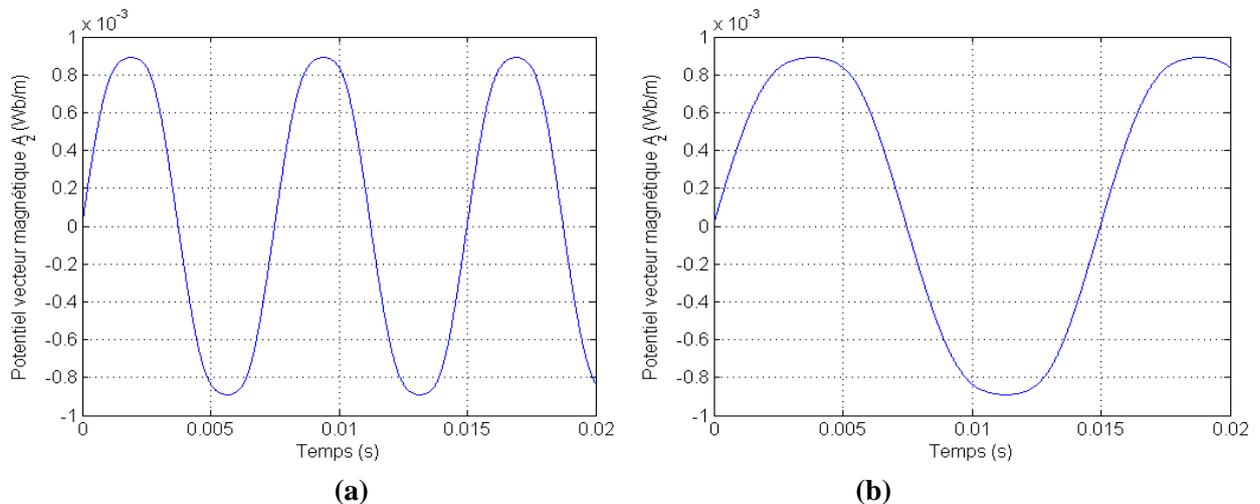


Figure 3.13. Variations du potentiel vecteur magnétique en fonction du temps. (a) $n=2000$ tr/min, (b) $n=1000$ tr/min.

3.5.3 Force électromotrice induite dans une bobine située au-dessus du tambour

Pour consolider la vérification des codes de calcul éléments finis développés et mis en œuvre, on s'est basé sur la comparaison entre les valeurs mesurée et calculée de la force électromotrice induite dans une bobine placée au-dessus tambour. Une telle force est déduite du flux magnétique généré dans la bobine à partir de la loi de l'induction magnétique globale suivant

$$e = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.3)$$

Pour une résolution numérique éléments finis d'un dispositif invariant par translation, le théorème de Stocks permet d'aboutir à une relation directe entre le flux magnétique et le potentiel vecteur magnétique. Une telle relation est donnée par [Bastos 03]

$$\varphi = (A_2 - A_1)l \quad (3.4)$$

A_1 et A_2 sont les valeurs du potentiel vecteur magnétique dans deux points symétriques par rapport au centre de la bobine et l est la profondeur de la bobine.

Pour une bobine rectangulaire en cuivre de $N=1600$ spires d'une profondeur moyenne $l=3\text{cm}$, d'une largeur interne 2cm et largeur externe 4cm, l'allure de la force électromotrice obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000\text{tr/min}$ et pour deux cas du nombre d'aimants est présentée dans la Figure 3.14.

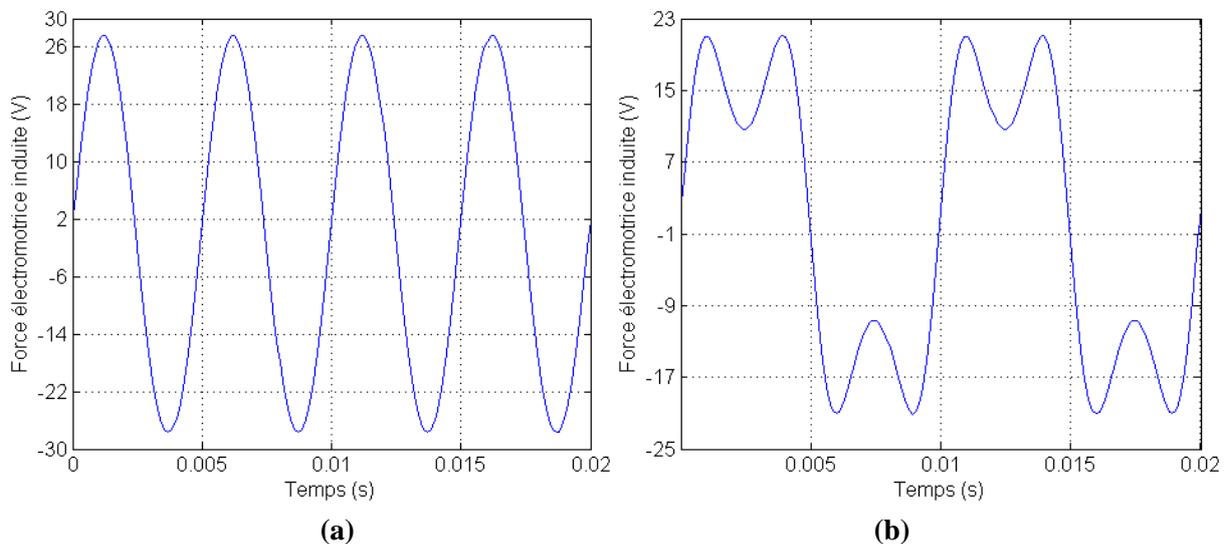


Figure 3.14. Variations de la force électromotrice induite en fonction du temps. (a) cas de tambour à 8 pôles, (b) cas de tambour à 4 pôles.

La Figure 3.14 montre une force électromotrice induite alternative dont la fréquence est fonction directe du nombre de pôles (d'aimants permanents). L'augmentation du nombre d'aimant améliore la qualité du signal en le rapprochant de la sinusoïde.

3.5.4 Courants induits dans une particule conductrice soumise au champ généré

Lorsqu'une particule conductrice est placée dans un champ magnétique variable dans le temps, elle sera siège d'une force électromotrice induite et donc des courants induits.

Pour une particule conductrice d'Aluminium ($\sigma=5 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$), de forme carrée $1 \times 1 \text{ cm}^2$ située au-dessus du tambour en rotation, le calcul de la densité des courants induits pour différents nombres de pôles du tambour entraîné à une vitesse $n=3000 \text{ tr/min}$ a donné les résultats montrés dans la Figure 3.15.

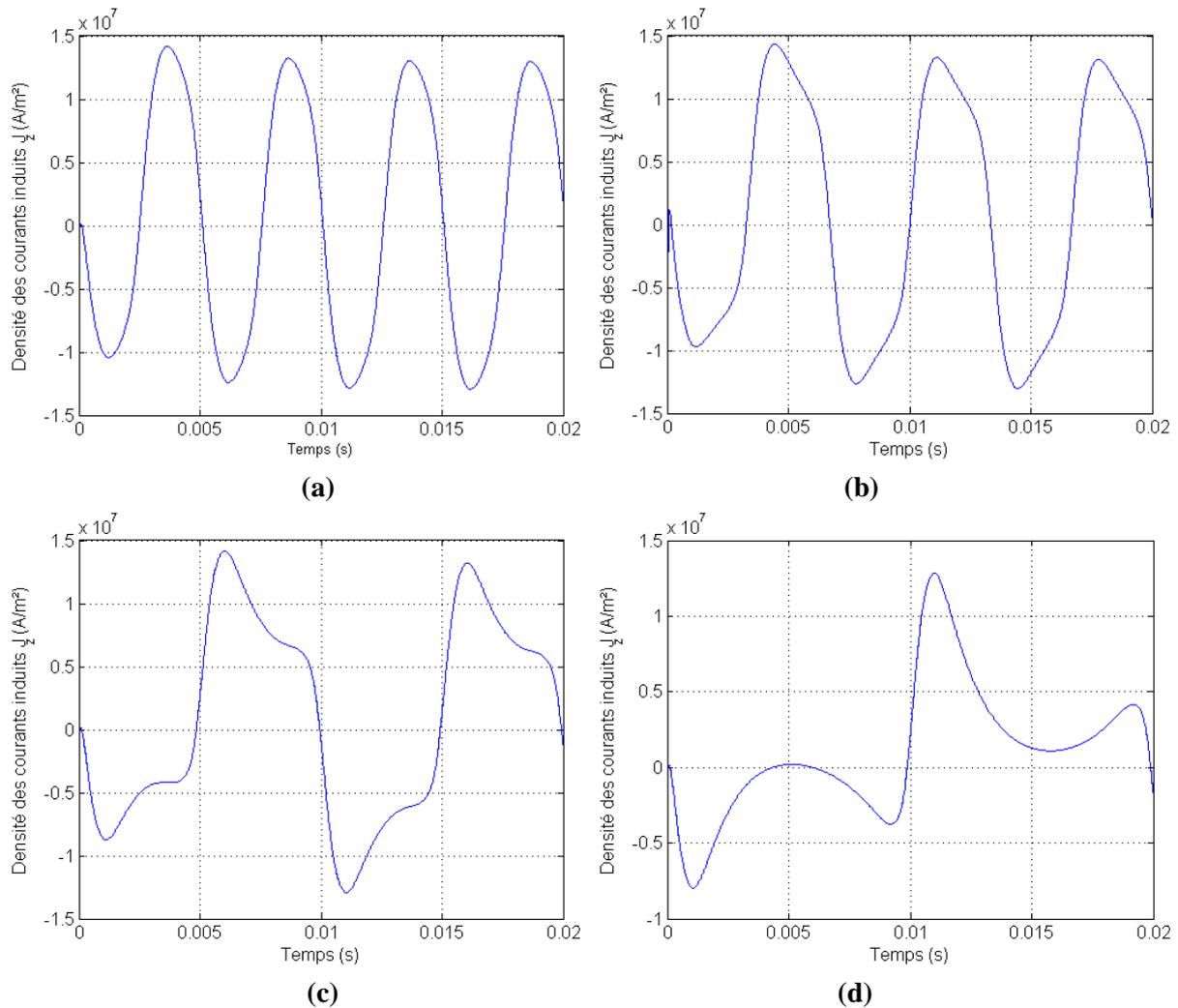


Figure 3.15. Variation de la densité des courants induits en fonction du temps, (a) cas du tambour à 8 pôles, (b) cas de 6 pôles, (c) cas de 4 pôles, (d) cas de 2 pôles.

La Figure 3.15 montre que la fréquence des courants induits est fonction du nombre de pôles. Plus on augmente le nombre de pôles plus on se rapproche du régime sinusoïdal.

3.5.5 Force de Lorentz appliquée aux particules conductrices

L'intérêt de calcul de la densité des courants induits est l'évaluation de la densité de force de Lorentz appliquée à la particule qui est aussi fonction directe de l'induction magnétique. Pour

une meilleure lecture et vérification des résultats, nous présentons dans la Figure 3.16 les variations de la densité du flux magnétique et de la force calculée (2.32) pour un tambour à 8 pôles entraîné à une vitesse $n=3000\text{tr/min}$.

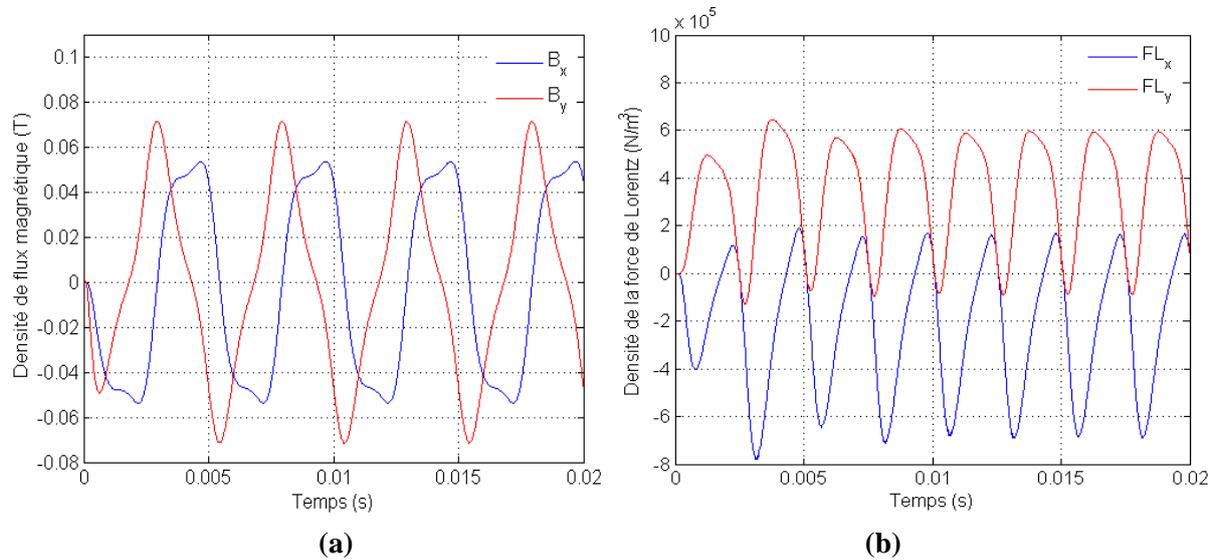


Figure 3.16. (a) Variations de la densité de flux magnétique, (b) Variations de la force de Lorentz, $n=3000\text{tr/min}$, 8 pôles.

Les résultats ci-dessus montrent que la présence de la particule perturbe la forme de l'induction magnétique. Selon la Figure 3.16.b, on voit que la composante de la force de Lorentz suivant l'axe y est presque unidirectionnelle et positive quant à la composante suivant l'axe x est presque unidirectionnelle et négative. Cela signifie que la force de Lorentz travaille dans le sens à repousser la particule vers le haut (suivant y) et dans le sens x du mouvement du tapis (de la droite vers la gauche).

3.6 Vérification des performances du séparateur proposé

Après calcul et vérification de toutes les grandeurs électromagnétiques nécessaires pour l'étude du problème de la séparation magnétique par champ magnétique dynamique, on procèdera dans cette section au calcul du comportement des particules dans le séparateur proposé. Pour cela, on s'est basé sur le calcul des trajectoires des particules qui permettent à la fois de vérifier la capacité du séparateur à séparer simultanément des particules magnétiques et conductrices, évaluer ses performances (vitesse et lieu de séparation) et identifier les limites de son utilisation.

3.6.1 Séparation magnétique en voie sèche

Pour la séparation en voie sèche, il s'agit d'un traitement des milieux granulaires globalement non magnétiques et non conducteurs contenant des particules magnétiques et conductrices solides. Pour permettre l'alimentation continue du séparateur, ces milieux sont supposés portés au niveau du tambour par un tapis roulant.

Théoriquement, le passage du milieu au voisinage du tambour où le champ est important conduit à la capture des particules para et ferromagnétiques et à la répulsion des particules diamagnétiques et conductrices.

Le schéma clarifiant le principe de fonctionnement du séparateur proposé est montré dans la Figure 3.17.

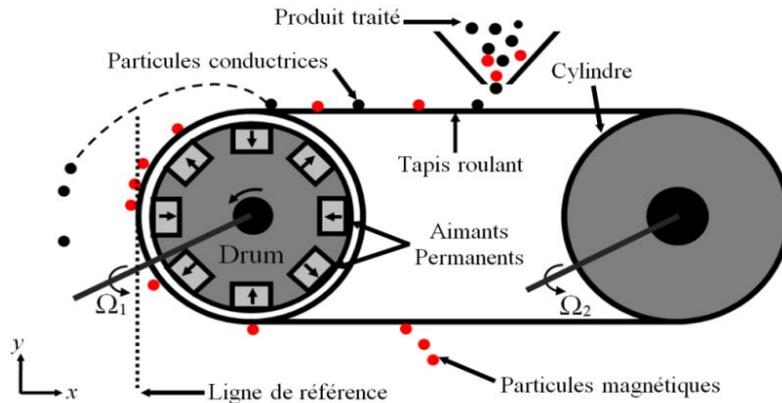


Figure 3.17. Schéma de principe du séparateur proposé pour le traitement en voie sèche

3.6.1.1 Trajectoires des particules conductrices et efficacité de séparation

Dans cette première partie, on procèdera au calcul du comportement des particules conductrices qui nous permettra de vérifier la possibilité de leur séparation, estimer les performances de séparation et identifier les limites d'utilisation de ce séparateur pour ce type de matériaux. Pour cela, nous avons considéré des particules en Aluminium de forme rectangulaire.

Les données de calcul des trajectoires conductrices sont regroupées dans le Tableau 3.3.

| | |
|---|-------------------|
| Induction magnétique rémanente (T) | 1.1 |
| Vitesse de rotation du tambour (tr/min) | 3000 |
| Vitesse linéaire du tapis (m/s) | 0.47 |
| Taille de la particule (cm ³) | 4×4×0.1 |
| Conductivité électrique de la particule (S/m) | 5×10 ⁷ |
| Densité de masse de la particule (kg/m ³) | 2700 |

Tableau 3.3. Données de calcul de la trajectoire d'une particule conductrice.

Pour les données de calcul du Tableau 3.3, la résolution du système global magnétodynamique pour un tambour à huit, six, quatre et deux pôles conduit au résultat de la Figure 3.18.

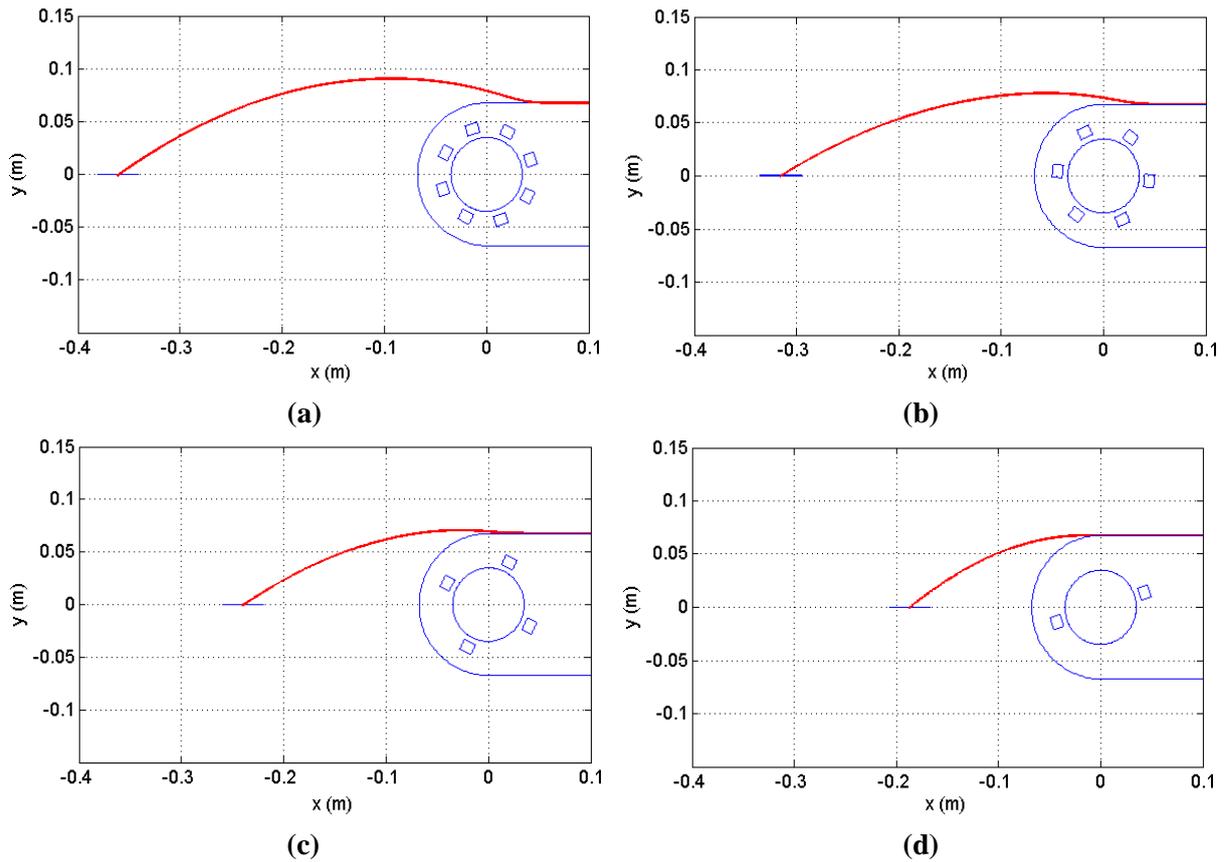


Figure 3.18. Trajectoires d’une particule conductrice (a) cas de tambour à 8 pôles, (b) cas de 6 pôles, (c) cas de 4 pôles, (d) cas de 2 pôles.

Les résultats de la figure ci-dessus montrent que dans tous les cas, la particule est repoussée loin du tambour magnétique. Le nombre de pôles influence fortement sur la distance finale de la séparation, plus on augmente le nombre de pôles plus la particule s’éloigne du tambour. Les distances de séparation par rapport à la ligne de référence (voir Figure 3.17), la hauteur maximale et le temps de calcul pour chaque cas sont regroupées dans le Tableau 3.4.

| Nombre de pôles | Distance maximale x_{\max} (m) | Hauteur maximale y_{\max} (m) | Temps de calcul (s) |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 8 | 0.3033 | 0.0944 | 956.05 |
| 6 | 0.2751 | 0.0814 | 872.00 |
| 4 | 0.1848 | 0.0739 | 827.61 |
| 2 | 0.1285 | 0.0689 | 809.86 |

Tableau 3.4. Résultats de calcul des trajectoires d’une particule conductrice en fonction du nombre de pôles du tambour.

Pour étudier l’effet de la vitesse de rotation du tambour sur l’efficacité de la séparation, nous avons tracé la trajectoire de la particule pour un tambour doté de huit aimants permanents pour différentes vitesses de rotation. Les résultats trouvés sont montrés dans la Figure 3.19.

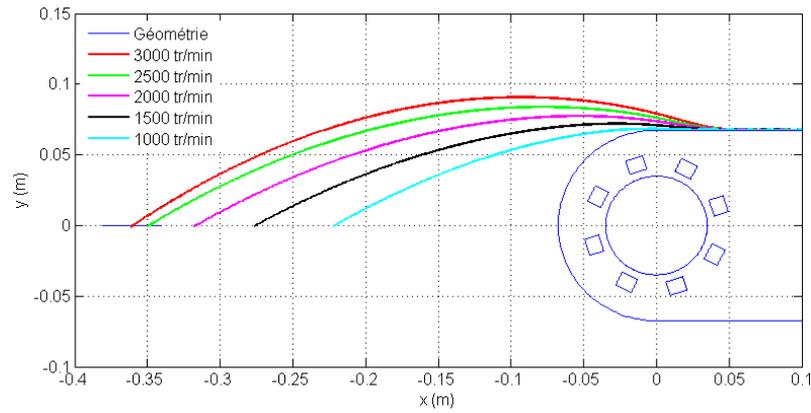


Figure 3.19. Trajectoires d’une particule conductrice pour différentes vitesses de rotation du tambour.

Le résultat de la Figure 3.19 montre que le lieu final de la séparation varie proportionnellement avec la vitesse de rotation du tambour. Plus la vitesse du tambour est élevée, plus la distance d'éloignement de la particule est importante.

L'évolution des performances de séparations en termes de distances de séparation, de la hauteur maximale et du temps de calcul en fonction de la vitesse du tambour est montrée dans le Tableau 3.5.

| Vitesse de rotation du tambour (tr/min) | Distance maximale x_{max} (m) | Hauteur maximale y_{max} (m) | Temps de calcul (s) |
|---|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 3000 | 0.3033 | 0.0944 | 956.05 |
| 2500 | 0.2825 | 0.0841 | 872.00 |
| 2000 | 0.2703 | 0.0801 | 869.06 |
| 1500 | 0.2390 | 0.0737 | 803.75 |
| 1000 | 0.1687 | 0.0690 | 756.75 |

Tableau 3.5. Résultats de calcul des trajectoires en fonction de la vitesse de rotation du tambour.

Pour estimer l'effet de la taille de la particule, nous avons calculé les trajectoires des particules conductrices de différentes tailles. Le résultat trouvé pour un tambour doté de huit aimants permanents et qui tourne à une vitesse $n=3000\text{tr/min}$ est montré dans la Figure 3.20.

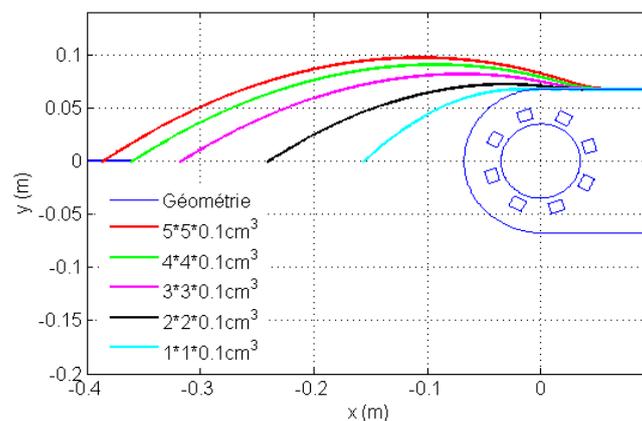


Figure 3.20. Trajectoires des particules conductrices de différentes tailles.

La comparaison quantitative entre les performances de séparation pour les cas de tailles traitées de la particule est montrée dans le Tableau 3.6.

| Taille de la particule (m ³) | Distance maximale x_{\max} (m) | Hauteur maximale y_{\max} (m) | Temps de calcul (s) |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 0.05×0.05×0.001 | 0.3193 | 0.0976 | 976.42 |
| 0.04×0.04×0.001 | 0.3033 | 0.0944 | 956.05 |
| 0.03×0.03×0.001 | 0.2510 | 0.0822 | 880.24 |
| 0.02×0.02×0.001 | 0.1737 | 0.0726 | 801.51 |
| 0.01×0.01×0.001 | 0.0891 | 0.0681 | 782.73 |

Tableau 3.6. Lieu et temps de séparation finale en fonction de la taille de la particule

Les résultats ci-dessus montrent clairement que plus la taille de la particule est grande plus les performances de séparation sont meilleures. Cela est pratiquement vrai pour des particules de petite taille parce que pour des particules de très grandes tailles le poids peut dominer la force de Lorentz ce qui empêche sa séparation.

Pour estimer l'effet de la vitesse du tapis roulant sur l'efficacité de séparation, nous avons calculé les trajectoires de la particule pour différentes vitesses linéaires d'entraînement du tapis. Les trajectoires obtenues sont présentées dans la Figure 3.21.

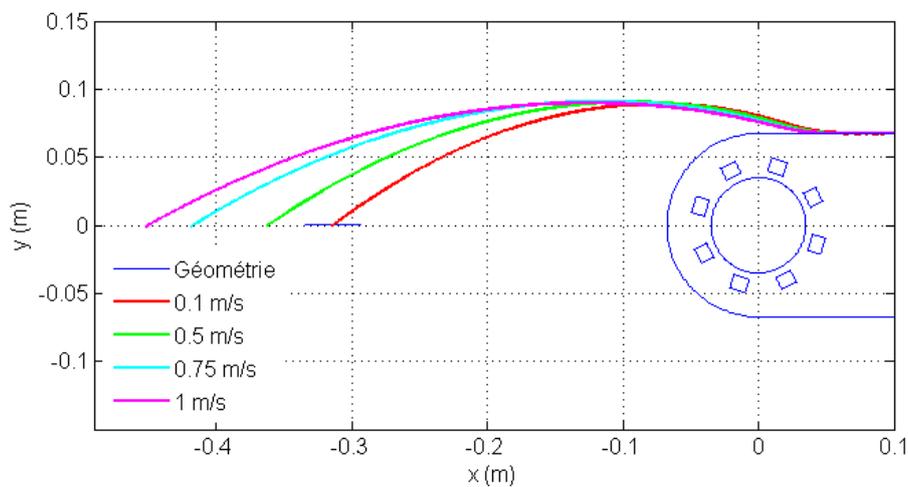


Figure 3.21. Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes vitesses du tapis.

La comparaison quantitative entre les performances de séparation pour les cas de vitesses du tapis traités est montrée dans le Tableau 3.7.

| Vitesse linéaire du tapis (m/s) | Distance maximale x_{\max} (m) | Hauteur maximale (m) | y_{\max} | Temps de calcul (s) |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|------------------------|
| 0.1 | 0.2518 | 0.0976 | | 976.42 |
| 0.5 | 0.2953 | 0.0910 | | 906.36 |
| 0.75 | 0.3510 | 0.0914 | | 818.18 |
| 1 | 0.3844 | 0.0903 | | 762.56 |

Tableau 3.7. Lieu et temps de séparation finale en fonction de la vitesse du tapis.

La Figure 3.21 montre que le lieu final de séparation dépend de la vitesse du tapis introduite comme vitesse initiale de la particule dans le calcul. Plus la vitesse du tapis est grande plus l'éjection de la particule est importante. Pour une meilleure compréhension de l'analyse effectuée, nous présentons dans la Figure 3.22 les variations de la distance de séparation en fonction des paramètres de fonctionnement du séparateur.

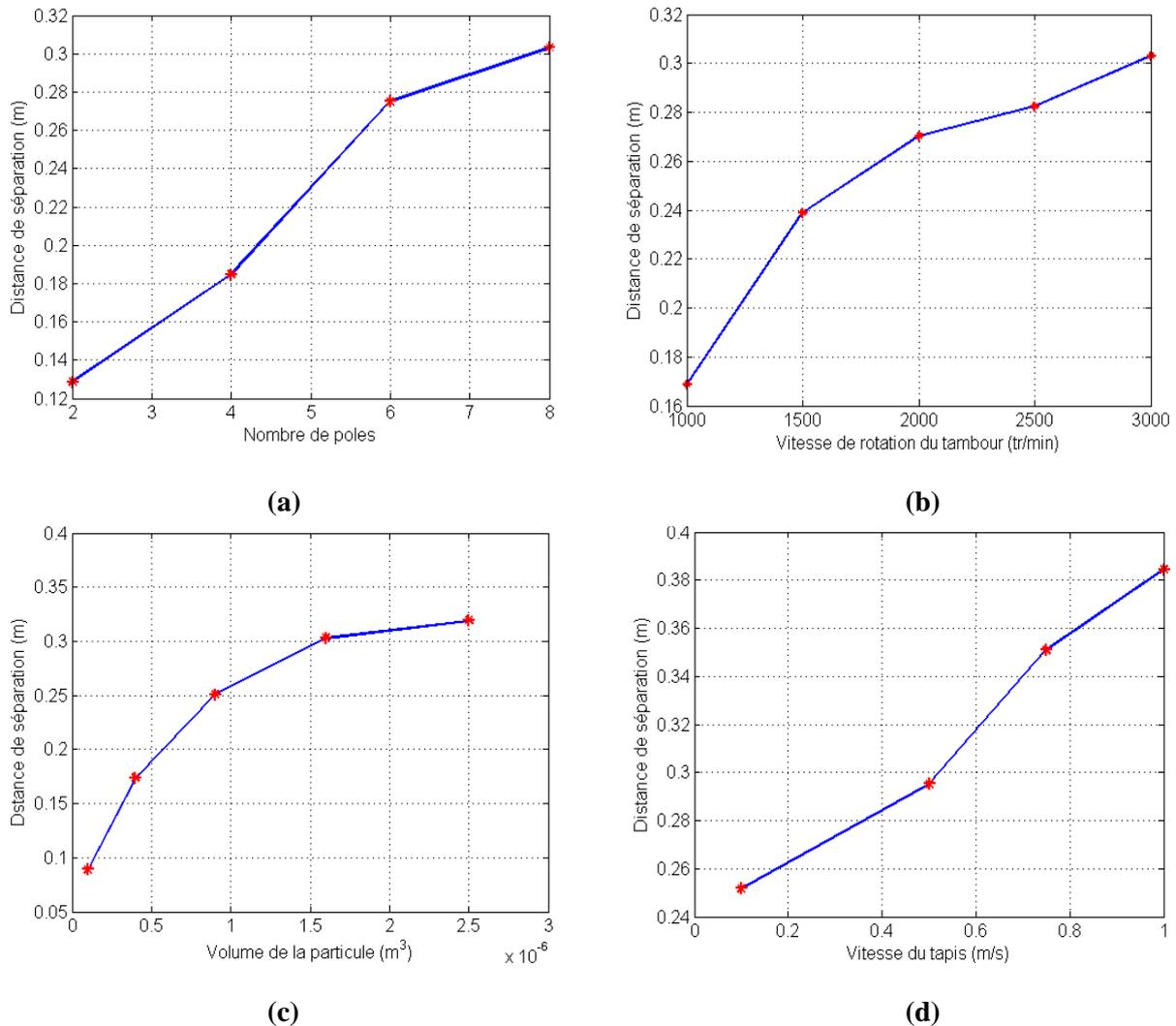


Figure 3.22. Variation de la distance de séparation en fonction de : (a) Nombre de pôles, (b) Vitesse de rotation du tambour, (c) Taille de la particule, (d) Vitesse du tapis.

3.6.1.2 Trajectoires des particules ferromagnétiques et efficacité de séparation

Dans cette section on présente les résultats de calcul du comportement des particules ferromagnétiques traduits par leurs trajectoires et l'estimation des effets des différents paramètres de fonctionnement du séparateur sur l'efficacité de séparation.

Pour une particule ferromagnétique de taille $10^{-6} \times 10^{-6} \times 10^{-6} \text{ m}^3$ et de perméabilité magnétique relative $\mu_r=80$, les trajectoires obtenues sont montrées dans la Figure 3.23.

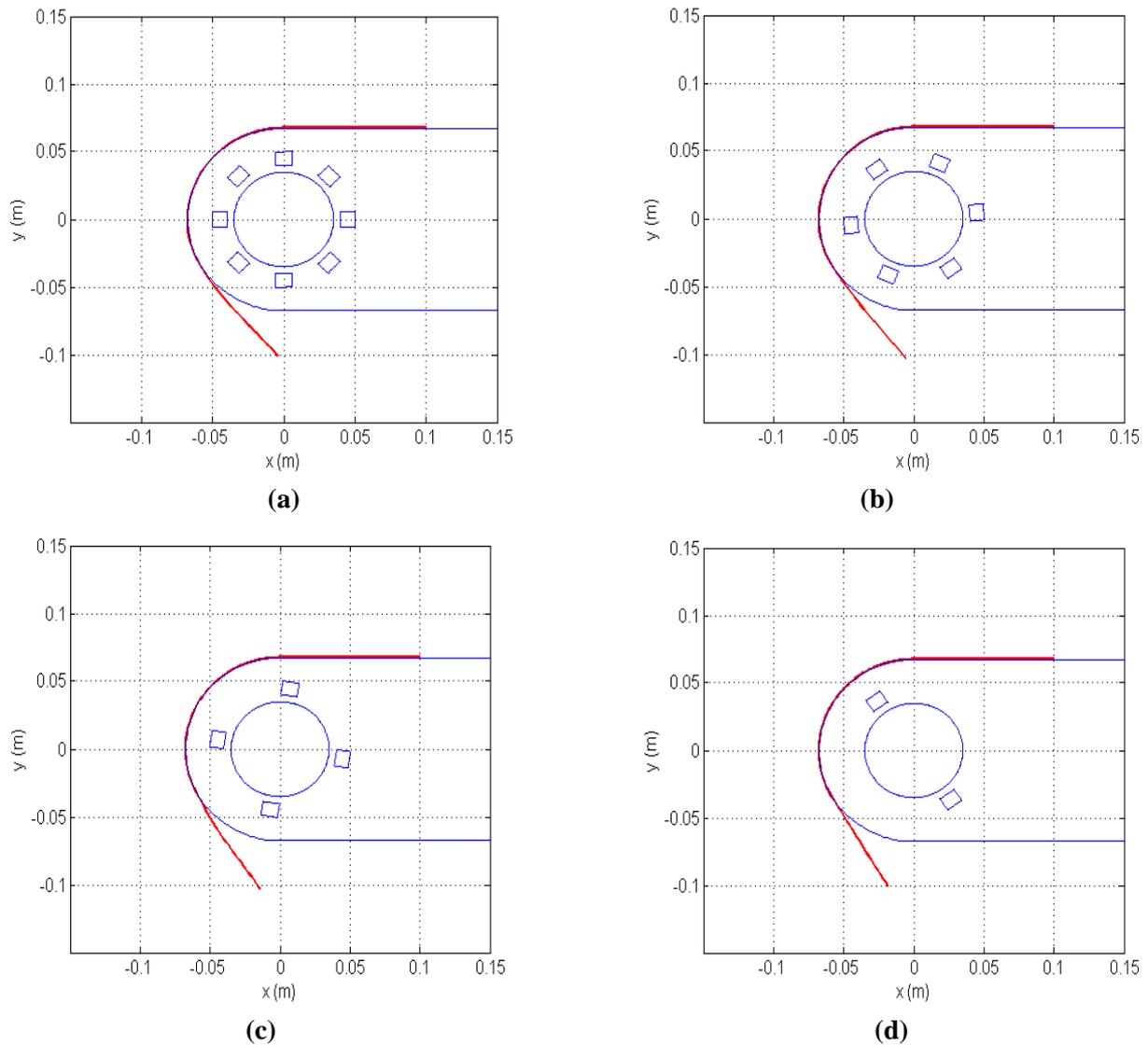


Figure 3.23. Trajectoires des particules ferromagnétiques en fonction du nombre de pôles.
(a) 8 pôles, (b) 6 pôles, (c) 4 pôles, (d) 2 pôles.

Les distances de séparation calculées par rapport à la ligne de référence sont données dans le Tableau 3.8.

| Nombre de pôles | 02 | 04 | 06 | 08 |
|----------------------------------|---------|--------|--------|--------|
| Distance maximale x_{\max} (m) | 0.04861 | 0.0508 | 0.0615 | 0.0633 |
| Temps de calcul (s) | 226.12 | 174.97 | 156.82 | 162.61 |

Tableau 3.8. Résultats de calcul des trajectoires des particules magnétiques en fonction du nombre de pôles.

Le résultat de la Figure 3.22 montre que le nombre de pôles influe sur le lieu final de la séparation des particules ferromagnétiques. La distance finale de séparation augmente avec l'augmentation du nombre de pôles. Pour estimer l'effet de la vitesse de rotation du tambour sur l'efficacité de la séparation, nous avons tracé les trajectoires de la particule magnétique pour plusieurs cas de vitesses de rotation du tambour (voir Figure 3.24).

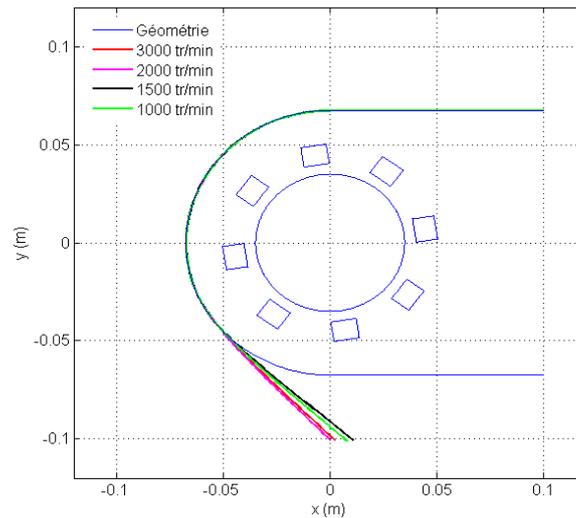


Figure 3.24. Trajectoires d'une particule ferromagnétique en fonction de la vitesse de rotation du tambour.

Selon les résultats de la figure ci-dessus, on constate que la vitesse de rotation du tambour a un effet négligeable sur le lieu final de la séparation d'une particule ferromagnétique.

Pour montrer l'effet de la vitesse du tapis sur les performances de la séparation, nous présentons dans la Figure 3.25 les trajectoires d'une particule ferromagnétique de taille $10^6 \times 10^{-6} \times 10^{-6} \text{ m}^3$ obtenues pour différentes vitesses linéaires du tapis.

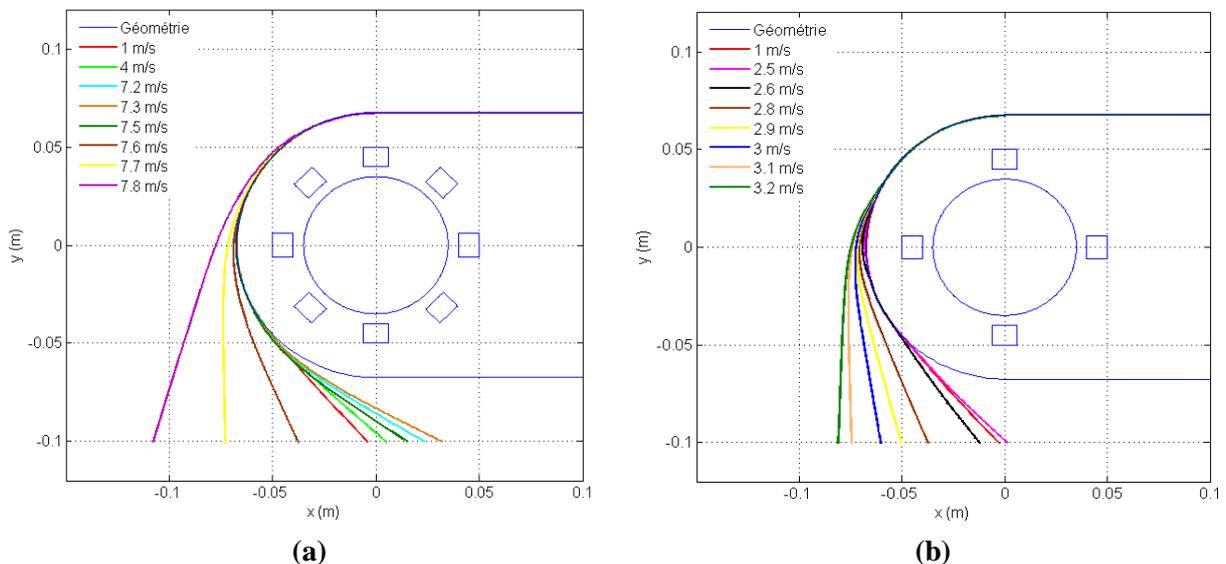


Figure 3.25. Trajectoires de la particule ferromagnétique en fonction de la vitesse linéaire du tapis. (a) Tambour à 8 pôles, (b) Tambour à 4 pôles.

La Figure 3.25 montre que le nombre de pôles du tambour et la vitesse du tapis ont une influence considérable sur l'efficacité de la séparation. Pour un tambour doté de huit aimants, l'augmentation de la vitesse du tambour améliore l'efficacité de séparation jusqu'à la vitesse $v=7.3\text{m/s}$. Au-delà de cette valeur de vitesse l'efficacité de séparation commence à se dégrader jusqu'à la vitesse $v=7.7 \text{ m/s}$ où la séparation devient impossible. Pour un tambour à

quatre pôles, les meilleures performances de séparation sont obtenues pour une vitesse $v=2.5\text{m/s}$. Au-delà de cette vitesse, la séparation se dégrade et devient impossible à une vitesse $v=3.1\text{ m/s}$.

3.6.1.3 Trajectoires des particules paramagnétiques et diamagnétiques

Afin de vérifier la capacité du séparateur proposé à séparer les particules paramagnétiques et diamagnétiques, nous avons calculé et tracé leurs trajectoires. Pour des particules paramagnétiques et diamagnétiques de susceptibilité magnétique $\chi=2.2\times 10^{-5}$ et $\chi=-1\times 10^{-5}$ respectivement, nous avons trouvé la même trajectoire présentée dans la Figure 3.26.

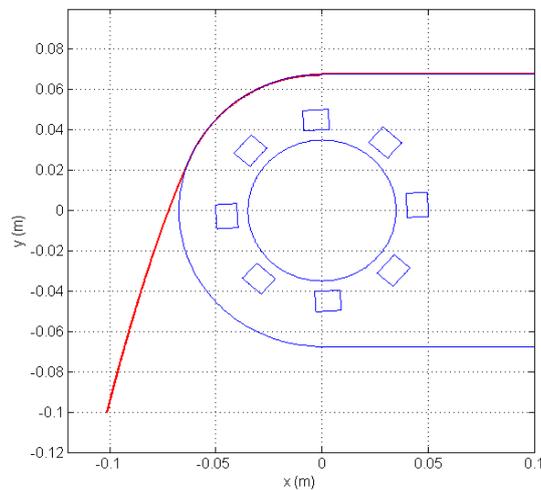


Figure 3.26. Trajectoires de la particule paramagnétique.

La trajectoire de la Figure 3.26 montre que la particule est tombée à une distance de 0.0265 m par rapport à la ligne de référence. Pour vérifier que l'origine de l'éjection de la particule à cette distance est la force centrifuge qui dépend de la vitesse du tapis, nous avons tracé la trajectoire de la même particule pour différentes vitesses du tapis. Les résultats obtenus pour le cas d'un tambour à 8 pôles sont montrés dans la Figure 3.27.

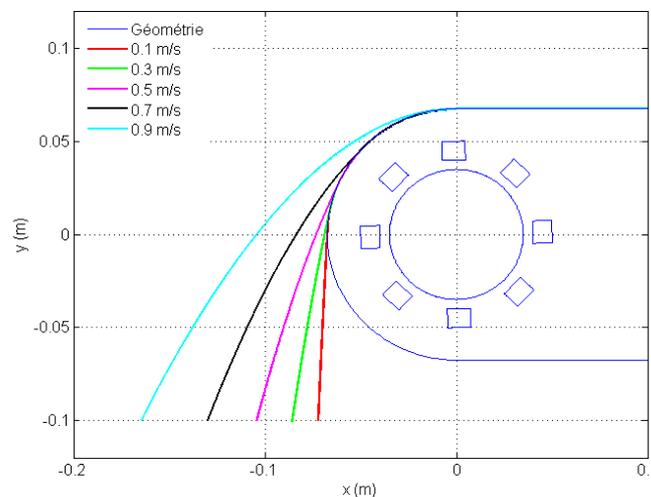


Figure 3.27. Trajectoires des particules para et diamagnétiques en fonction de la vitesse du tapis.

3.6.1.4 Conclusion

Le calcul du problème de la séparation des particules non homogènes en voie sèche a montré que les paramètres clés de la séparation sont le nombre d'aimants du tambour, la vitesse de sa rotation, la vitesse du tapis alimentant le séparateur en matériau à traiter et de la taille des particules. Nous avons vu que pour les particules conductrices, la taille des particules est très importante pour obtenir une séparation de haute performance. Plus la taille est grande plus la séparation est efficace. De même, l'augmentation de la vitesse du tambour améliore considérablement l'efficacité de séparation. La vitesse de rotation influe directement sur la signification des courants induits dans la particule.

Pour les particules ferromagnétiques, nous avons vu que la vitesse du tambour a un effet négligeable parce que la force dépend de l'intensité du champ et de son gradient et non pas de sa fréquence. Par contre, la vitesse du tapis a une grande influence. L'augmentation de la vitesse améliore considérablement l'efficacité de séparation, mais au-delà d'une valeur critique, la séparation devient impossible.

Pour les particules para et diamagnétiques, les conditions de fonctionnement du séparateur proposé donnent un champ magnétique incapable de séparer ces particules. De meilleures performances pour les types de particules traitées peuvent être obtenues par optimisation du séparateur proposé.

3.6.1.5 Optimisation du séparateur proposé

La réalisation d'une séparation magnétique de hautes performances exige l'application d'un champ magnétique efficace qui peut être obtenu par l'optimisation du dispositif proposé. D'après les résultats présentés précédemment, nous avons vu que le champ magnétique nécessaire pour réaliser la séparation simultanée des particules conductrices et magnétiques et leurs grandeurs dérivées dépendent fortement de deux paramètres qui sont la vitesse de rotation du tambour et le nombre des aimants permanents. Ainsi, ces derniers sont considérés comme paramètres clés de l'optimisation du séparateur proposé.

Du fait que les aimants utilisés ne permettent pas la génération d'un champ capable de séparer des particules paramagnétiques et diamagnétiques, l'optimisation aura pour objectif la recherche des paramètres qui assurent la séparation simultanée des particules conductrices et ferromagnétiques. Du fait que ces dernières sont relativement faciles à séparer, l'optimisation sera effectuée pour des particules conductrices.

a) Fonction objectif

Le but pratique de la séparation des milieux est le tri et la récupération des éléments séparés. Pour cela, notre optimisation concerne la recherche des paramètres (la vitesse et le nombre de pôles du tambour) qui permettent l'éjection des particules conductrices d'une taille donnée à un endroit défini.

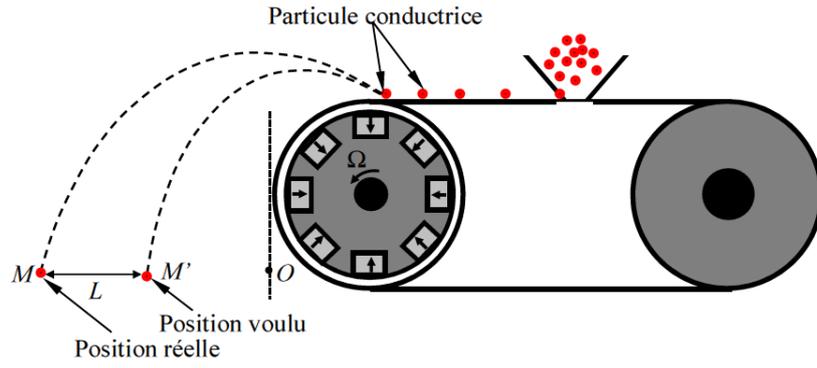


Figure 3.28. Forme géométrique du séparateur à optimiser et condition d'optimisation.

La force de Lorentz responsable de la séparation des particules conductrices dépend de l'induction magnétique et de la densité des courants induits. L'intensité de ces derniers dépend fortement de la fréquence du champ appliqué qui est fonction du nombre de pôles et de la vitesse de rotation du tambour. On peut alors écrire :

$$F_L = f(p, n) \quad (3.5)$$

Le mouvement de la particule est le résultat de la force de Lorentz appliquée. Alors, la position finale de sa séparation M dépend du nombre de pôles et de la vitesse de rotation du tambour. Pour cela, et en considérant un point de référence O situé sur la ligne de référence, la distance entre le point de référence et la position de séparation M est fonction de paramètres recherchés.

$$\|\vec{OM}\| = f(p, n) \quad (3.6)$$

Si on choisit une position M' comme lieu désiré de séparation finale de la particule, la distance entre les points M et M' représente ainsi la fonction objectif à minimiser F_{obj} .

$$F_{obj} = L = \|\vec{OM}\| - \|\vec{OM'}\| = \|\vec{MM'}\| = f(p, n) \quad (3.7)$$

b) Méthode de minimisation appliquée

Pour minimiser une fonction objectif, plusieurs méthodes d'optimisation peuvent être appliquées [Boudjefdjouf 2015, Kumsawat 2005, Restrepo 2015, Kuo 2017, Campelo 2006, Xiang 2015, Coelho 2012, Boucekara 2018]. Dans notre cas, et tenant compte de sa simplicité à mettre en œuvre, nous avons appliqué la méthode métaheuristique d'essaims particuliers OEP (Particle Swarm Optimization PSO en anglais).

La méthode d'optimisation OEP permet d'obtenir une valeur approchée de la solution optimale en un temps raisonnable. Elle a été proposée et développée par Kennedy et Eberhart en 1995 [Hajlaoui 2018]. Son principe vient des observations faites lors des simulations de déplacement des animaux évoluant en essaim tel que les nuées d'oiseaux, des poissons et des

abeilles. Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus (particules) d'un groupe (essaim) en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux des individus voisins [Guillaume 2009]. L'algorithme OEP commence par une génération aléatoire d'une population (essaim) des candidats (particules). Chaque particule a sa position et sa vitesse. A tout instant t , chaque particule connaît sa meilleure position obtenue individuellement P_{best} , la position du meilleur voisin P_{gbest} et la valeur qu'elle donne à la fonction objectif (fitness) car, à chaque itération, il faut comparer la valeur du critère donné par la particule courante et la valeur optimale [Serra 2017]. A chaque itération, chaque particule met à jour sa vitesse et sa position en utilisant les modèles mathématiques donnés par [Zheng 2017]:

$$v_m(t+1) = \omega v_m(t) + c_1 r_1 (P_{pbest}(t) - x_m(t)) + c_2 r_2 (P_{gbest}(t) - x_m(t)) \quad (3.8)$$

$$x_m(t+1) = x_m(t) + v_m(t+1) \quad (3.9)$$

v et x sont respectivement la vitesse et la position de la particule, ω est une constante appelée coefficient d'inertie, c_1 et c_2 sont des coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires générés uniformément entre 0 et 1 à chaque itération. L'algorithme sur lequel nous sommes basés pour programmer la méthode OEP est donné par [Brownlee 2011].

```

1  Input: Problem Size; Population Size
2  Output: Pgbest
3  Population ← ∅
4  Pgbest ← ∅
5  for i=1: population Size
6      Pvelocity ← Random Velocity
7      Pposition ← Random Position
8      Ppbest ← Pposition
9      if cost(Ppbest) ≤ cost(Pgbest)
10         Pgbest ← Ppbest
11     End
12 End
13 while (Stop condition)
14     for each P ∈ Population
15         Pvelocity ← Update Velocity(Pvelocity, Pgbest, Ppbest)
16         Pposition ← Update Position(Pposition, Pvelocity)
17         if cost(Pposition) ≤ cost(Ppbest)
18             Ppbest ← Pposition
19             if cost(Ppbest) ≤ cost(Pgbest)
20                 Pgbest ← Ppbest
21             end
22         end
23     end
24 end
25 return Pgbest

```

Les paramètres utilisés dans le processus d'optimisation sont regroupés dans le tableau 3.9 [Pedersen 2010].

| Paramètres | Valeurs |
|--------------------------------|---------|
| Nombre de populations générées | 10 |
| Coefficient c_1 | -0.6504 |
| Coefficient c_2 | 2.2073 |
| coefficient d'inertie ω | -0.4349 |

Tableau 3.9. Paramètres utilisés pour l'optimisation.

c) Résultats de l'optimisation

Pour une particule conductrice de taille $4 \times 4 \times 1$ mm, une vitesse linéaire du tapis $v=0.4712$ m/s, et pour une distance voulue $d=25$ cm par rapport au centre du tambour, nous avons obtenu les résultats du Tableau 3.10.

| Nombre de pôles | Vitesse de rotation (tr/min) | F_{obj} | Nombre d'itérations | Temps de calcul (s) |
|-----------------|------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| 6 | 1648 | 0.00077 | 4 | 361000 |

Tableau 3.10. Paramètres optimaux obtenus par l'optimisation.

Pour vérifier ces résultats, nous avons calculé la trajectoire de la particule, nous avons obtenu le résultat de la Figure 3.29.

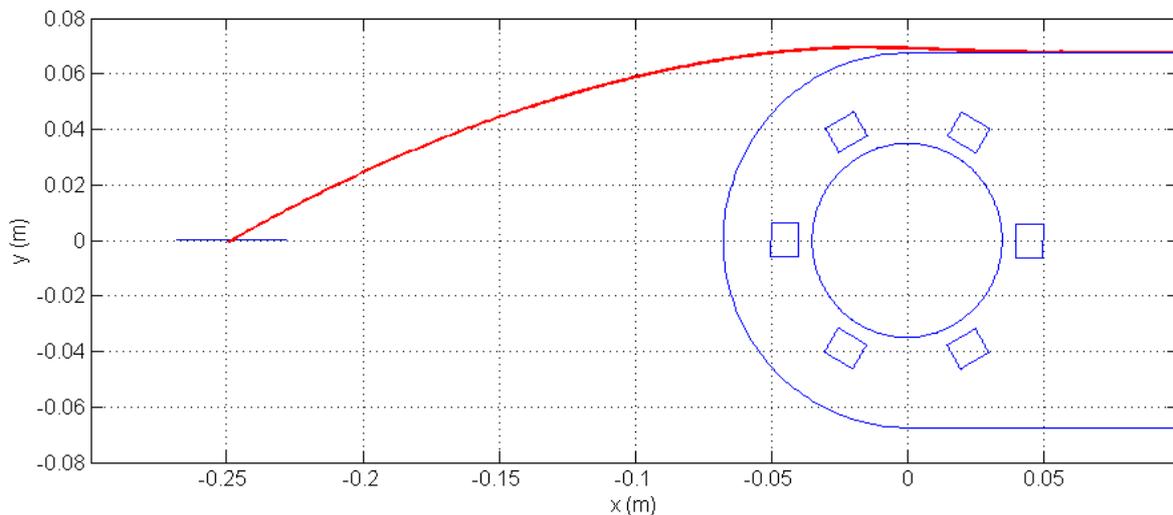


Figure 3.29. Trajectoire obtenue par les paramètres obtenus par l'optimisation.

La Figure 3.29 montre que la particule tombe très proche de la position désirée, ce qui signifie l'exactitude des paramètres trouvés et la fiabilité de la méthode d'optimisation appliquée.

3.6.2 Séparation magnétique en voie humide

Dans cette partie de notre travail, nous présentons les résultats de simulation de la séparation des particules magnétiques et conductrices immergées dans un liquide. Ce liquide est en écoulement dans un canal à surface libre installé au-dessus du tambour.

Afin d'améliorer les performances de la séparation du dispositif proposé d'une part et éviter l'agglomération des particules ferromagnétiques lors de leur passage au-dessus du tambour qui peut perturber l'écoulement d'autre part, nous avons trouvé utile d'installer un aimant permanent à l'entrée du tambour (voir Figure 3.30). Cet aimant sert à capturer les particules ferromagnétiques avant leur passage au-dessus du tambour. Dans ce cas, le tambour est chargé de séparer les particules conductrices.

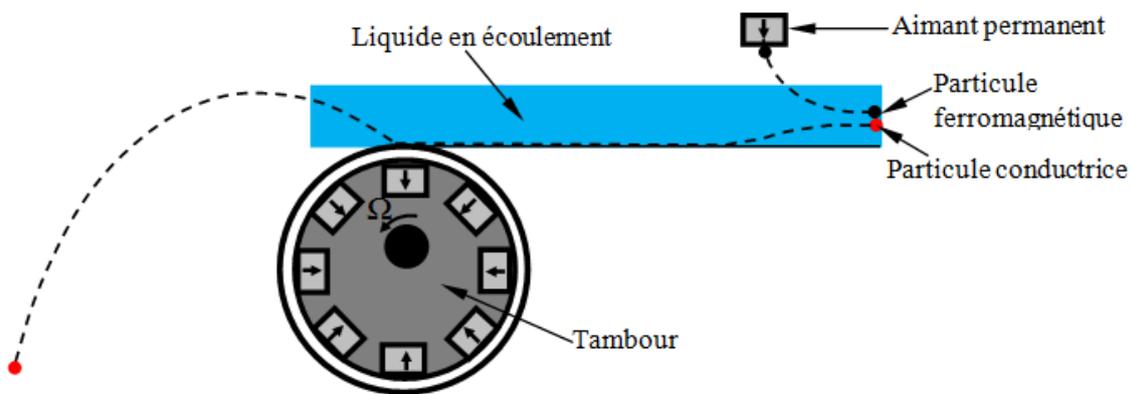


Figure 3.30. Schéma de principe du séparateur proposé pour les traitements de séparation en voie humide.

3.6.2.1 Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal

Les forces hydrodynamiques appliquées à une particule en mouvement dans un liquide en écoulement dépendent directement de la vitesse d'écoulement à sa localité. Pour prendre en compte ces forces dans le calcul des trajectoires des particules, on doit calculer le champ de la vitesse d'écoulement dans la partie d'intérêt du canal (partie où le champ magnétique est appliqué). Afin de simplifier notre étude, nous avons négligé l'effet de la particule sur l'écoulement.

Pour le problème hydraulique, nous avons choisi un écoulement dont les paramètres caractéristiques sont regroupés dans le Tableau 3.11.

| | |
|--|-------|
| Hauteur du canal h (cm) | 2 |
| Longueur du canal l (cm) | 25 |
| Masse volumique de l'eau ρ (kg/m ³) | 1000 |
| Viscosité dynamique de l'eau η (kg/m.s) | 0.001 |
| Vitesse moyenne de l'écoulement v_f (m/s) | 0.3 |

Tableau 3.11. Paramètres caractéristiques de l'écoulement hydraulique traité.

Pour les paramètres du Tableau 3.11, la résolution de l'équation de Navier Stokes qui régit le problème hydraulique par le logiciel commercial Comsol multiphysiques a donné les distributions du champ de vitesse, du nombre de Reynolds et le profil de vitesse montrées dans la Figure 3.31.

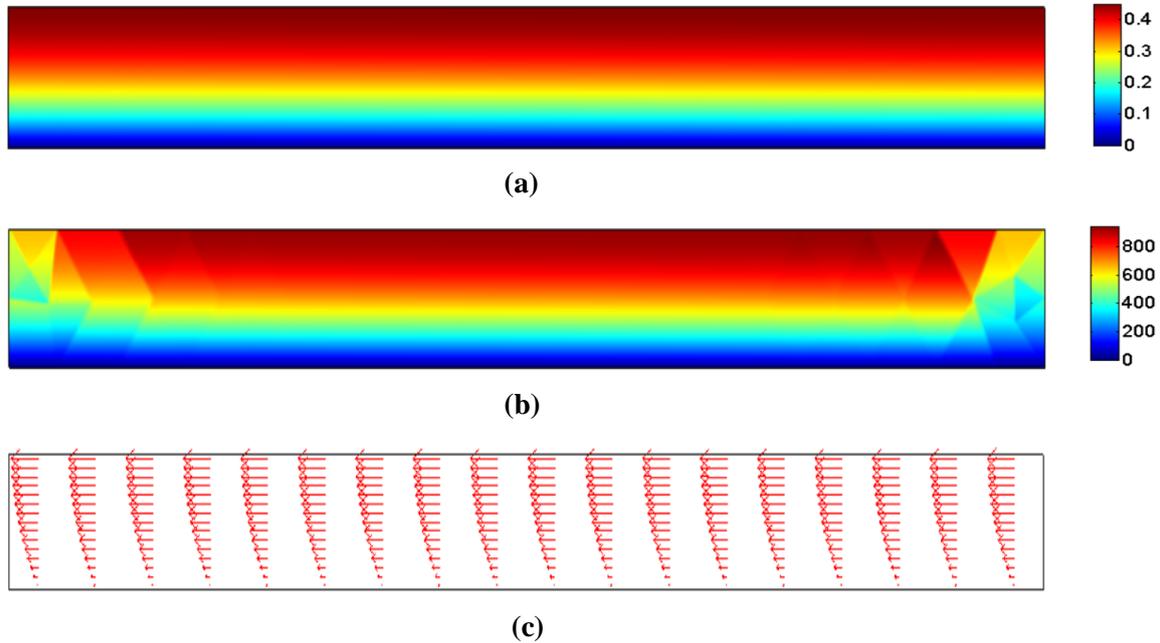


Figure 3.31. Distributions des grandeurs hydrauliques dans le canal. (a) Champ de vitesse d'écoulement (b) Nombre de Reynolds, (c) Profil de vitesse.

Les distributions de la vitesse et du nombre de Reynolds de la Figure 3.31 montrent que les données de calcul adoptées ont permis d'obtenir un écoulement laminaire ($Re < 2000$).

Pour mieux comprendre le régime d'écoulement et pour une lecture quantitative, on présente dans la Figure 3.32 le profil de vitesse calculé au milieu du canal en fonction de la hauteur.

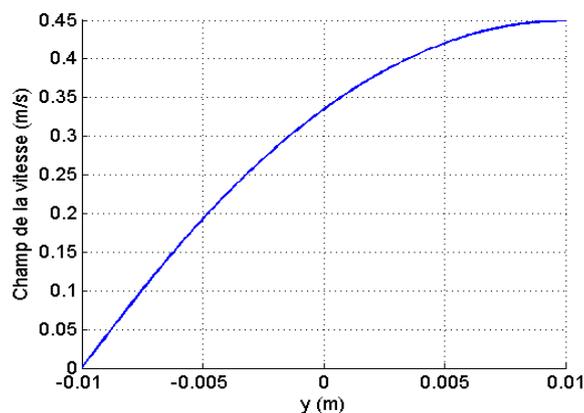


Figure 3.32. Profil de vitesse calculé au milieu du canal

Le résultat de la Figure 3.32 vérifie bien le régime laminaire de l'écoulement à surface libre. La vitesse est nulle au niveau de la base du canal et elle augmente exponentiellement pour atteindre sa valeur maximale à la surface libre.

3.6.2.2 Trajectoire des particules conductrices et efficacité de la séparation

Le calcul des trajectoires d'une particule d'Aluminium de forme rectangulaire de taille $4 \times 4 \times 0.1 \text{ cm}^3$ pour les cas de tambour à huit, six, quatre et deux pôles a donné les résultats de la Figure 3.33.

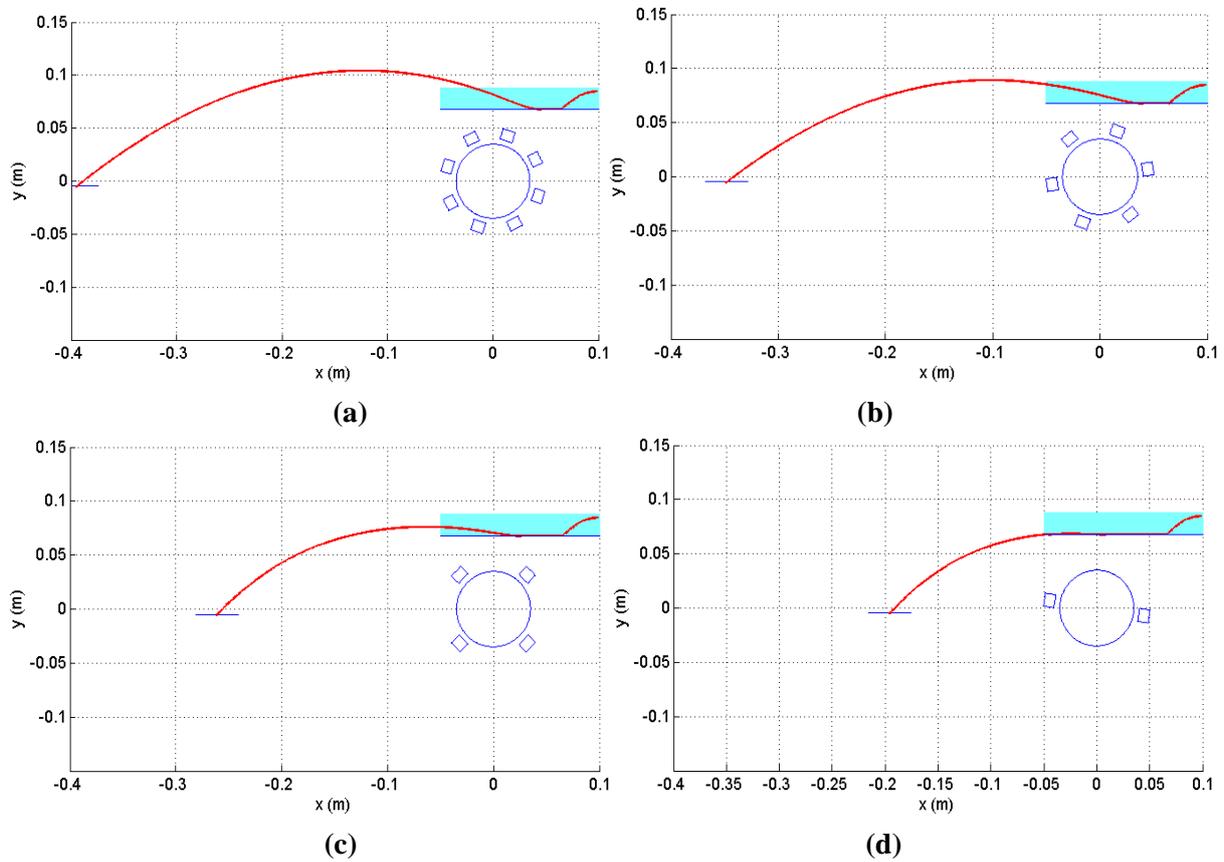


Figure 3.33. Trajectoires d'une particule conductrice (a) 8 pôles, (b) 6 pôles, (c) 4poles, (d) 2 pôles.

Les résultats de la Figure 3.33 montrent que dans tous les cas, la particule est repoussée loin du tambour magnétique. Le nombre de pôles influe fortement sur la distance finale de la séparation. Plus on augmente le nombre de pôles plus la particule s'éloigne du tambour.

Les distances de séparation par rapport à la ligne de référence (voir Figure 3.17), la hauteur maximale et le temps de calcul pour chaque cas sont regroupés dans le Tableau 3.12.

| Nombre de pôles | Distance maximale | Hauteur maximale y_{\max} | Temps de calcul (s) |
|-----------------|----------------------|-----------------------------|---------------------|
| | $x_{\max}(\text{m})$ | (m) | |
| 8 | 0.3279 | 0.1047 | 1076 |
| 6 | 0.2814 | 0.0896 | 977 |
| 4 | 0.1942 | 0.0850 | 1040 |
| 2 | 0.1286 | 0.06850 | 961 |

Tableau 3.12. Performances de séparation d'une particule conductrice en fonction du nombre de pôles.

Pour estimer l'effet de la vitesse de rotation du tambour sur l'efficacité de la séparation, nous avons présenté dans la Figure 3.34, la trajectoire de la particule pour un tambour doté de huit aimants permanents pour différentes vitesses de rotation.

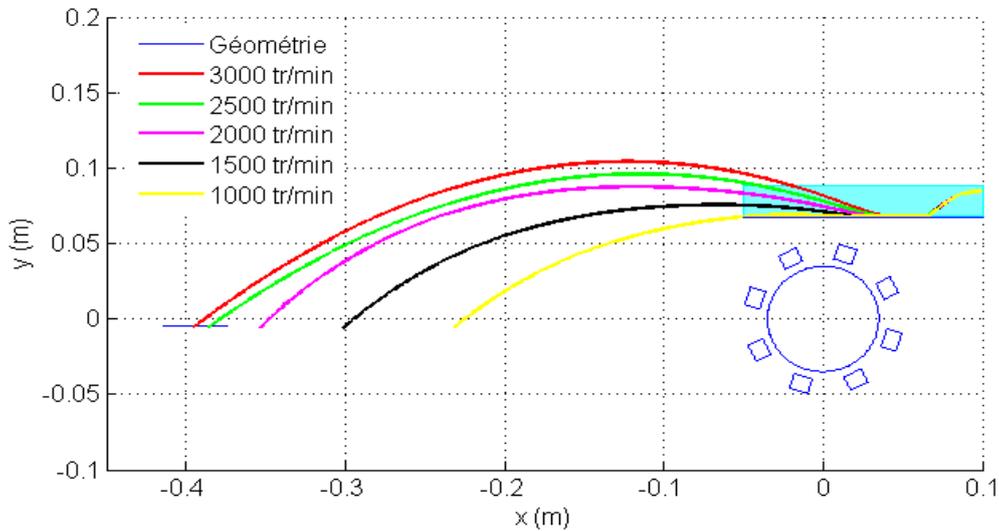


Figure 3.34. Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes vitesses de rotation du tambour.

La Figure 3.34 montre que le lieu final de la séparation varie proportionnellement avec la vitesse de rotation du tambour. Plus la vitesse du tambour augmente, plus la particule conductrice s'éloigne du tambour.

Pour une lecture quantitative des résultats ci-dessus, nous présentons les paramètres de séparation pour chaque cas dans le Tableau 3.13.

| Vitesse de rotation du tambour (tr/min) | Distance maximale | Hauteur maximale | Temps de calcul (s) |
|---|-------------------|------------------|---------------------|
| | x_{\max} (m) | y_{\max} (m) | |
| 3000 | 0.3279 | 0.1047 | 1076 |
| 2500 | 0.3185 | 0.0965 | 1027 |
| 2000 | 0.2863 | 0.0880 | 1024 |
| 1500 | 0.2341 | 0.0850 | 987 |
| 1000 | 0.1643 | 0.0850 | 857 |

Tableau 3.13. Résultats de calcul des trajectoires en fonction de la vitesse de rotation du tambour.

Afin d'estimer l'effet de l'écoulement sur l'efficacité de séparation, nous avons calculé les trajectoires de la particule pour différentes vitesses moyennes du liquide (toujours pour un régime laminaire) et cela pour le cas d'un tambour à 8 pôles. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3.35.

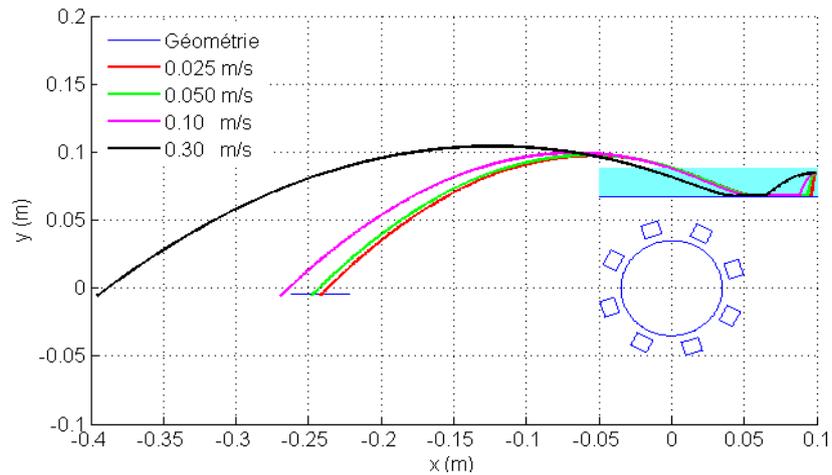


Figure 3.35. Trajectoires d’une particule conductrice pour différentes vitesses moyennes de l’écoulement.

La figure ci-dessus montre une variation proportionnelle entre la vitesse moyenne de l’écoulement du fluide et le lieu final de la séparation. Les résultats quantitatifs de la séparation sont regroupés dans le Tableau 3.14.

| Vitesse moyenne du fluide (m/s) | Distance maximale x_{\max} (m) | Hauteur maximale y_{\max} (m) | Temps de calcul (s) |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 0.025 | 0.1748 | 0.0976 | 1921 |
| 0.050 | 0.1707 | 0.0982 | 1604 |
| 0.1 | 0.2022 | 0.0998 | 1357 |
| 0.3 | 0.3281 | 0.1047 | 1040 |

Tableau 3.14. Résultats de calcul des trajectoires en fonction des vitesses moyennes de l’écoulement

Pour estimer l’effet de la taille de la particule sur la séparation, nous avons tracé dans le Figure 3.36 les trajectoires obtenus pour différentes tailles et cela pour le cas d’un tambour à huit aimants permanents entraînés à une vitesse $n=3000$ tr/min.

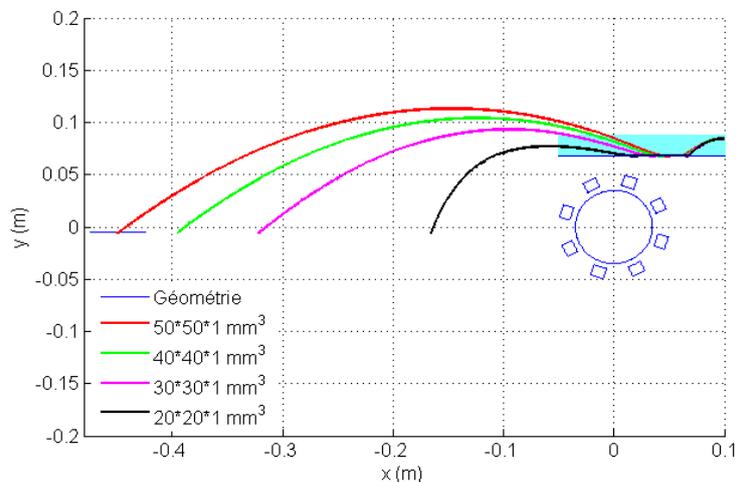


Figure 3.36. Trajectoires d’une particule conductrice de différentes tailles.

La Figure 3.36 montre que l'augmentation de la taille de la particule conduit à un éloignement plus important de la particule. Les valeurs numériques exactes du calcul sont regroupées dans le tableau 3.15.

| Taille de la particule (mm ³) | Distance maximale x_{\max} (m) | Hauteur maximale y_{\max} (m) | Temps de calcul (s) |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 50×50×1 | 0.3824 | 0.1137 | 1115 |
| 40×40×1 | 0.3279 | 0.1047 | 1076 |
| 30×30×1 | 0.2543 | 0.0938 | 1006 |
| 20×20×1 | 0.0982 | 0.0850 | 974 |

Tableau 3.15. Résultats de calcul des trajectoires en fonction de la taille de la particule

Les premières séries des simulations qui concernent la séparation des particules conductrices montrent la capacité du séparateur étudié à séparer des pièces conductrices de taille supérieur à 10×10×1 mm³. L'efficacité de la séparation traduite par le lieu final de la séparation dépend de la vitesse de rotation du tambour, le nombre des aimants permanents et la vitesse moyenne de l'écoulement du fluide. Ces paramètres vont être les paramètres clés d'une optimisation qu'on va effectuer sur le séparateur étudié.

3.6.2.3 Trajectoire des particules ferromagnétiques et efficacité de la séparation

Dans cette section, on considère des particules magnétiques micrométriques de taille $10^{-6} \times 10^{-6} \times 10^{-6} \text{ m}^3$, de masse volumique $\rho=7860 \text{ kg/m}^3$ et de perméabilité relative magnétique $\mu_r=80$. Pour un écoulement à surface libre avec une vitesse moyenne $v_l=0.08\text{m/s}$, la trajectoire de la particule est donnée par la Figure 3.37.

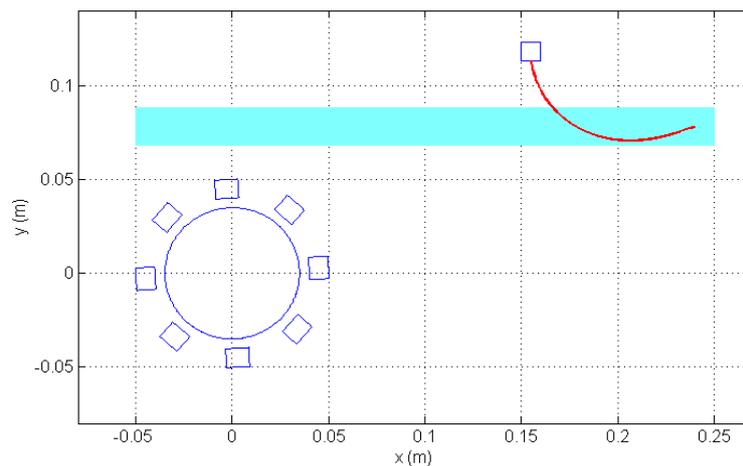


Figure 3.37. Trajectoires d'une particule ferromagnétique.

La Figure 3.37 montre que la particule magnétique est capturée par l'aimant permanent. Celui-ci joue ainsi le rôle d'un capteur des particules ferromagnétiques. Pour différentes vitesses moyennes de l'écoulement, les trajectoires de la particule pour chaque vitesse sont représentées dans la Figure 3.38.

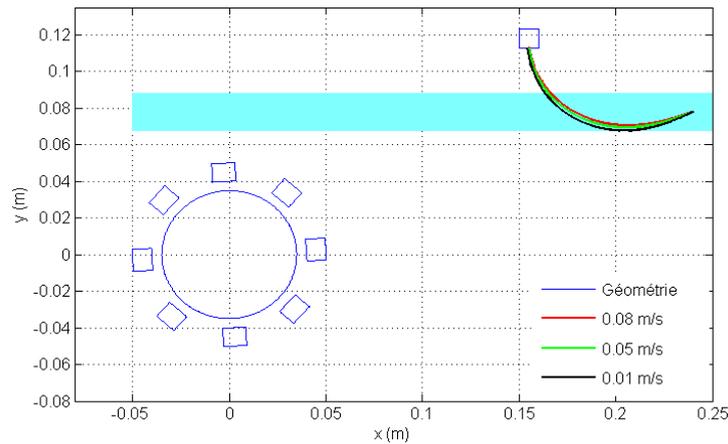


Figure 3.38. Trajectoires d’une particule ferromagnétiques pour différents vitesses moyennes du liquide.

La Figure 3.38 montre que pour les vitesses de l’écoulement adoptées qui garantissent un régime laminaire, la particule magnétique est capturée par l’aimant permanent.

3.6.2.4 Trajectoires des particules paramagnétiques et diamagnétiques

Pour vérifier la capacité du séparateur étudié à séparer des particules paramagnétiques et diamagnétiques immergées dans un écoulement à surface libre, nous avons tracé leurs trajectoires. Pour une particule paramagnétique de taille $10^{-6} \times 10^{-6} \times 10^{-6} \text{ m}^3$, de masse volumique $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ et d’une susceptibilité magnétique $\chi=2.2 \times 10^{-5}$ et pour un écoulement à surface libre avec une vitesse moyenne $v_l=0.3\text{m/s}$, la trajectoire de la particule est donnée par la Figure 3.39.

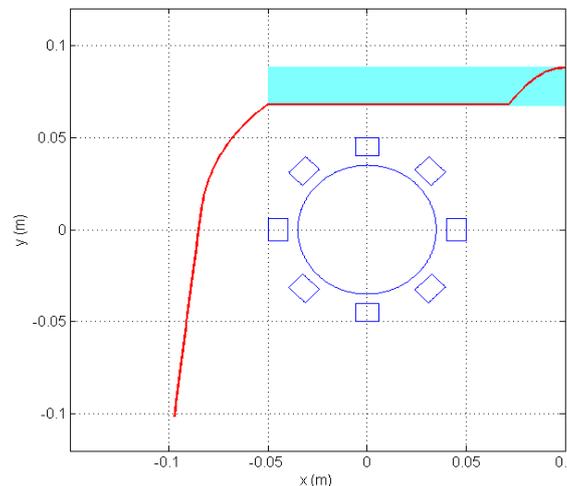


Figure 3.39. Trajectoires d’une particule paramagnétique.

La Figure 3.39 montre que la particule est portée avec le liquide et elle n’est pas influencée par la force magnétique grâce à sa faible susceptibilité magnétique puis elle tombe sous l’effet de la pesanteur. Pour voir que la distance d’éjection de la particule est due à la vitesse du liquide, on présente dans la Figure 3.40 les trajectoires de la particule paramagnétique pour plusieurs vitesses moyennes de l’écoulement. Les trajectoires trouvées montrent que la

position d'éjection de la particule dépend de la vitesse du liquide. Pour une particule diamagnétique de même taille et d'une masse volumique $\rho=8960\text{kg/m}^3$ et d'une susceptibilité magnétique $\chi=-1\times 10^{-5}$, nous avons trouvé les mêmes trajectoires des Figures 3.39 et 3.40.

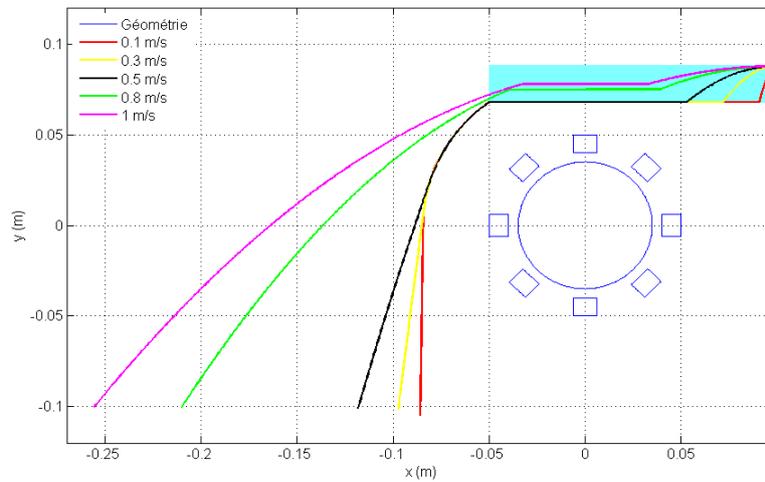


Figure 3.40. Trajectoires d'une particule paramagnétique pour plusieurs vitesses du liquide.

3.6.2.5 Optimisation du séparateur proposé en voie humide

Dans cette partie, nous avons effectué une optimisation sur le séparateur proposé pour le cas des particules conductrices immergées dans un liquide en écoulement laminaire. Les résultats présentés précédemment pour le cas des particules conductrices montrent que le lieu final de la séparation dépend de la vitesse de rotation du tambour, la vitesse de l'écoulement du liquide, la taille de la particule et le nombre d'aimants permanents. Dans notre étude, et afin de réduire le temps de calcul, nous avons effectué l'optimisation pour le cas des particules conductrices dont les paramètres d'optimisations choisis sont le nombre de pôles et la vitesse de rotation du tambour. La vitesse de l'écoulement et la taille de la particule sont fixées à des valeurs déterminées. Comme dans le cas de la séparation en voie sèche, dans cette optimisation, nous avons considéré que la séparation est parfaite si toutes les particules séparées sont tombées dans un seul endroit choisi par l'utilisateur du séparateur. Le schéma représentatif du dispositif étudié est montré dans la Figure 3.41.

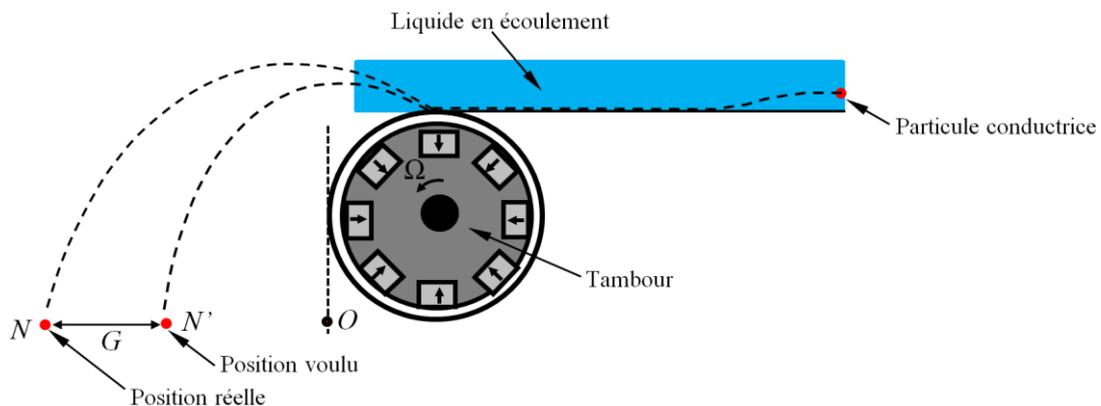


Figure 3.41. Forme géométrique du séparateur à optimiser.

Alors, la position de sa capture N est donc influencée par le nombre de pôles et la vitesse de rotation du tambour. Pour cela, et en considérant un point de référence O situé sur la ligne de référence, la distance entre le point de référence et la position de capture M' est fonction de paramètres recherchés.

$$\|\vec{ON}\| = f(p, n) \quad (3.10)$$

Tenant compte du point de séparation voulu M' , la distance entre ce point et la position de séparation M représente ainsi la fonction objectif à minimiser F_{obj} exprimée par :

$$F_{obj} = G = \|\vec{ON}\| - \|\vec{ON'}\| = \|\vec{NN'}\| = f(p, n) \quad (3.11)$$

Pour minimiser la fonction objectif (3.11), nous avons appliquées la méthode d'essaims particulaires (OEP ou PSO en anglais) grâce à sa simplicité à mettre en œuvre.

Pour une particule conductrice de taille $4 \times 4 \times 0.1 \text{ cm}^3$, une vitesse moyenne du liquide $v_l = 0.3 \text{ m/s}$, et pour une distance voulue $d = 25 \text{ cm}$ par rapport au centre du tambour, nous avons obtenu les résultats du Tableau 3.16.

| Nombre de pôles | Vitesse de rotation (tr/min) | F_{obj} | Nombre d'itérations | Temps de calcul (s) |
|-----------------|---------------------------------|-----------|------------------------|------------------------|
| 5 | 2287 | 0.00057 | 5 | 45803 |

Tableau 3.16. Paramètres optimaux obtenus par l'optimisation.

Pour vérifier ces résultats, nous avons calculé la trajectoire de la particule, nous avons obtenu le résultat de la Figure 3.42.

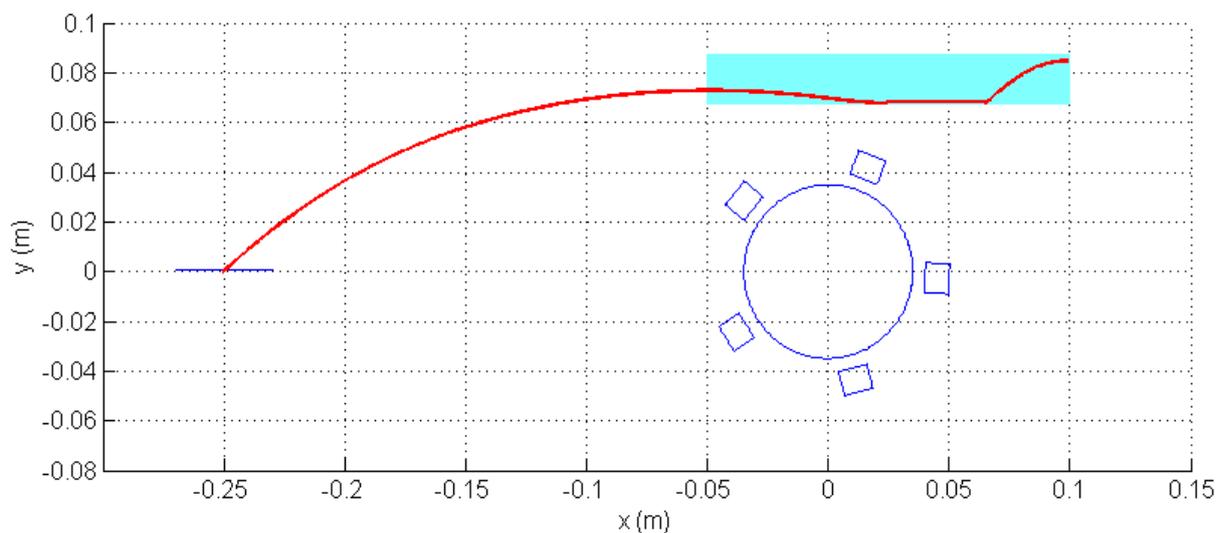


Figure 3.42. Trajectoire obtenue par les paramètres obtenus par l'optimisation.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un séparateur à tambour magnétique appliqué dans les deux voies sèche et humide. Il s'agissait du calcul du comportement des particules de différentes natures (ferromagnétiques, conductrices, diamagnétiques et paramagnétiques) par la mise en œuvre des codes de calcul développés et les outils de calculs présentés dans le chapitre précédent. Une telle simulation nous a permis d'estimer la capacité des modèles mathématiques développés à prendre en compte d'une manière réelle les effets des actions appliquées sur les particules. Un premier calcul est effectué pour calculer les grandeurs magnétiques, connaître leur nature et déterminer les paramètres influents sur l'intensité et la fréquence de ces grandeurs. Ces paramètres sont utilisés comme des variables d'entrées dans les programmes d'une optimisation effectuée sur le séparateur étudié. La méthode d'optimisation appliquée permet de déterminer les paramètres optimaux qui minimisent la fonction objectif adoptée. Pour la validation des résultats obtenus par la simulation, nous allons présenter dans le chapitre suivant les résultats obtenus par les essais expérimentaux.

Chapitre 4

Essais pratiques et validation expérimentale

4 Essais pratiques et validation expérimentale

Dans ce chapitre, nous présentons les tâches pratiques achevées pour vérifier les performances du séparateur conçu et valider les résultats théoriques obtenus. Pour cela, un prototype de séparateur et des bancs de mesure ont été réalisés et employés. Dans une première tâche, nous avons procédé à l'identification de l'aimantation rémanente réelle de l'aimant utilisé et de son orientation ce qui nous a permis d'effectuer une simulation de la séparation avec des conditions de calcul valables.

Dans la deuxième tâche, nous avons effectué des essais expérimentaux dont l'objectif est la vérification de l'efficacité de la technique de séparation proposée ainsi que les performances du prototype réalisé. Une telle vérification a concerné la nature du champ magnétique généré dans le séparateur et la capacité de ce dernier à assurer une séparation simultanée des particules magnétiques et conductrices de différentes granulométries.

4.1 Identification de l'aimantation des aimants permanents utilisés

Dans le séparateur proposé, le champ appliqué est généré par un arrangement de barreaux d'aimant permanent en $NdFeB$. Pour permettre un calcul exact du champ appliqué et une vérification théorique consistante de la possibilité de séparation, nous avons procédé à l'identification de l'aimantation rémanente exacte de l'aimant permanent utilisé. Il s'agit en fait de l'évaluation des trois composantes de son induction magnétique rémanente B_{rx} , B_{ry} et B_{rz} . Pour aboutir à cet objectif, nous avons développé et appliqué une approche de résolution d'un problème inverse basé sur la minimisation d'une fonction objectif exprimée en fonction des paramètres à rechercher.

Dans la résolution inverse, on calcule itérativement les trois composantes de l'induction B_{rx} , B_{ry} et B_{rz} générée en des lieux (points) choisis de l'aimant permanent et on les compare avec celles obtenues par les mesures. Pour cela, nous avons réalisé et utilisé le banc expérimental présenté dans la figure 4.1.

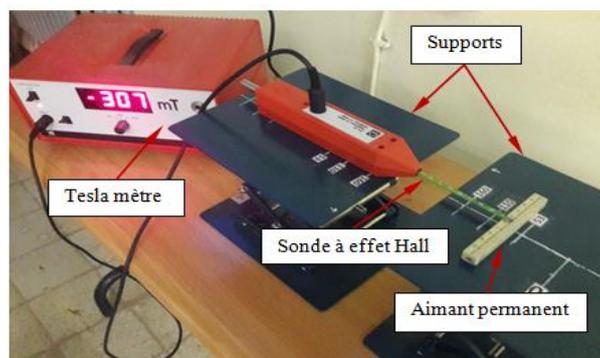


Figure 4.1. Banc de mesure de l'induction magnétique générée par l'aimant permanent.

Pour choisir les lieux de mesure, nous avons effectué une analyse expérimentale de la distribution de l'induction magnétique sur les surfaces de l'aimant permanent. Il s'agit de la

mesure des variations de l'induction magnétique le long des deux lignes des surfaces orientées dans les directions \vec{y} et \vec{z} (voir Figure 4.2). La réduction de la mesure à deux surfaces seulement et les choix de la position des lignes sont justifiés par la configuration et l'antisymétrie que présente le champ produit par l'aimant.

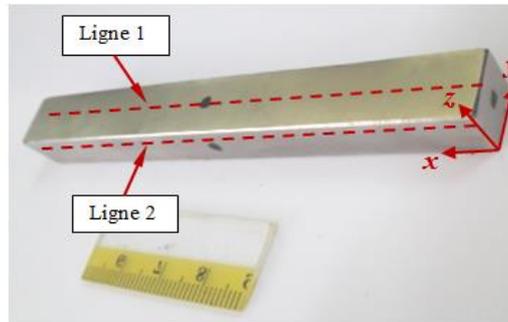


Figure 4.2. Lignes de mesure de l'induction magnétique

En considérant le point d'origine au milieu de l'aimant, la mesure a donné les valeurs de l'induction magnétique du Tableau 4.1.

| Points (cm) | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| B_y (mT) | 96 | 160 | 163 | 170 | 164 | 164 | 169 | 168 | 160 | 157 | 112 |
| B_z (mT) | 275 | 386 | 372 | 368 | 368 | 367 | 362 | 368 | 370 | 377 | 270 |

Tableau 4.1. Induction magnétique mesurée le long des lignes montrées dans la Figure 4.2.

Pour une meilleure lecture, nous avons représenté graphiquement dans la Figure 4.3 les résultats du tableau 4.1.

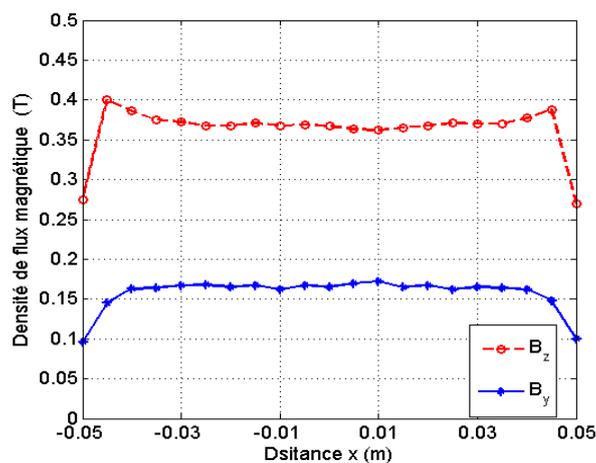


Figure 4.3. Variation de l'induction magnétique le long des lignes de mesure considérées.

La Figure 4.3 montre que l'induction magnétique est quasi constante le long des deux lignes considérées sauf aux extrémités de l'aimant permanent. De ce fait, et tenant compte de

l'antisymétrie de l'induction magnétique dans les deux surfaces opposées de l'aimant, les lieux de mesure ont été réduits aux trois points situés au milieu des lignes médianes de trois surfaces (voir Figure 4.4).

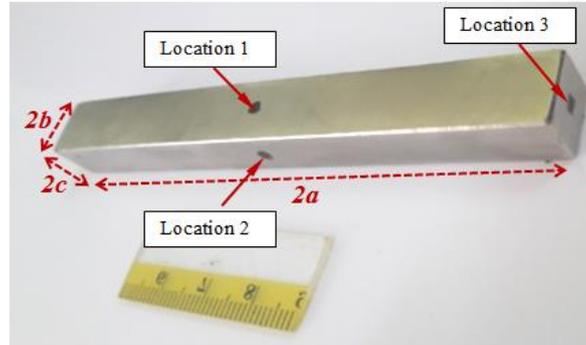


Figure 4.4. Lieux de mesure de l'induction magnétique.

La fonction objectif à minimiser est la somme des carrés des différences entre les valeurs calculées et mesurées aux lieux choisis. Une telle fonction est donnée par [Hafef 2007]:

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (B_{ci} - B_{mi})^2 \quad (4.1)$$

B_{ci} et B_{mi} sont respectivement les valeurs calculées et mesurées de l'induction magnétique dans le lieu i , $i=1, 2, 3$.

Dans la fonction objectif F_{obj} , l'induction calculée B_{ci} est une fonction des trois composantes recherchées de l'induction magnétique rémanente de l'aimant permanent $B_{ci} = f(B_{rx}, B_{ry}, B_{rz})$.

Afin de réduire le temps de calcul d'une part et d'obtenir des valeurs exactes d'autre part, des modèles mathématiques 3D ont été utilisés pour calculer l'induction magnétique dans les lieux choisis. Pour un aimant permanent cubique (cas de nos aimants) ayant une aimantation inclinée et orientée aléatoirement, l'induction magnétique générée à un point donné $M(x, y, z)$ de l'espace est donnée par [Gilles 1984, Allag 2017]:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \begin{bmatrix} \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{VW}{rU}\right) & \ln(r-W) & \ln(r-V) \\ \ln(r-W) & \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{WU}{rV}\right) & \ln(r-U) \\ \ln(r-V) & \ln(r-U) & \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{UV}{rW}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{rx} \\ B_{ry} \\ B_{rz} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Les paramètres r, U, V et W sont données par:

$$U = x - (-1)^i a, \quad V = y - (-1)^j b, \quad W = z - (-1)^k c \quad \text{and} \quad r = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (4.3)$$

Ici, a, b et c sont respectivement les dimensions de l'aimant suivant les axes \vec{i}, \vec{j} et \vec{k} .

Pour minimiser une fonction objectif, plusieurs méthodes d'optimisation peuvent être appliquées. Dans notre cas, la fonction objectif (4.1) est minimisée en se servant de la méthode d'optimisation par essaim particulaire (PSO). Pour valider nos résultats, nous les avons comparés avec ceux obtenus par application de la méthode Multi Valuable Player Algorithm (MVPA) [Boucekara 2018].

L'implémentation des deux méthodes dans l'environnement MATLAB avec un ordinateur ayant un processeur Intel(R) Xeon (R) CPU E5-1620 v2 @ 3.70 GHz et une RAM de 8.00 GO sous Windows 7 professionnelle a conduit aux résultats du Tableau 4.2.

| Méthode appliquée | B_{rx} (T) | B_{ry} (T) | B_{rz} (T) | F_{obj} | t (s) | itérations |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|---------|------------|
| PSO | 0 | 0 | 1.095 | 8.9×10^{-11} | 0.35 | 34 |
| MVPA | 0 | 0 | 1.095 | 1.3×10^{-11} | 0.46 | 14 |

Tableau 4.2. Valeurs optimales des paramètres recherchés.

Le tableau montre que les deux méthodes donnent le même résultat avec une égalité parfaite. On voit que l'aimantation de l'aimant est orientée dans la direction \vec{k} .

Afin de vérifier l'exactitude des résultats trouvés et la fiabilité des méthodes d'optimisations appliquées, nous avons recalculé les variations de l'induction magnétique le long des lignes 1 et 2 (voir Fig.4.2) et les avons confrontées avec celles obtenues par la mesure. Une telle confrontation est présentée dans la figure 4.5.

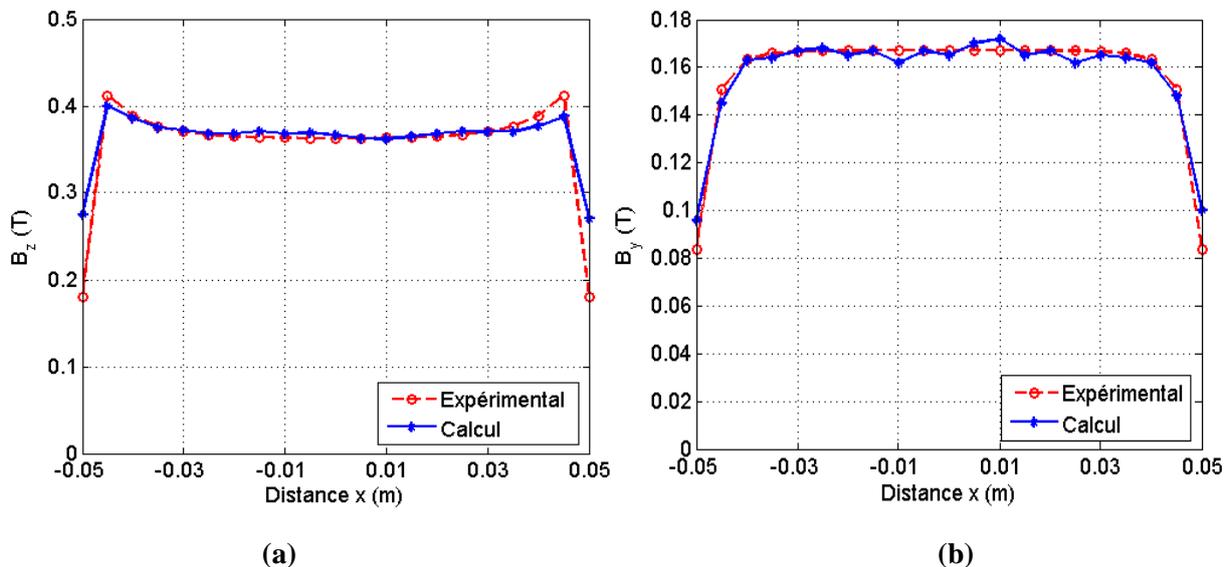


Figure 4.5. Variation de l'induction magnétique, (a) sur la ligne 1, (b) sur la ligne 2

La Figure 4.5 montre une grande concordance entre les résultats de calcul et de mesure ce qui valide l'étape d'identification effectuée.

4.2 Vérification de la nature du champ magnétique appliqué

Pour permettre une séparation simultanée des particules magnétiques et conductrices, nous sommes obligés d'appliquer un champ magnétique dynamique. Afin de le générer, nous avons utilisé un tambour magnétique doté d'une succession d'aimants permanents sur son périmètre. Ce tambour est entraîné par un moteur commandé par un variateur de vitesse.

Pour vérifier la nature dynamique du champ magnétique généré, nous nous sommes basés sur la mesure et la visualisation de la force électromotrice induite (f.e.m) dans une bobine placée au-dessus du tambour. Les différents composants du dispositif expérimental utilisé sont montrés dans la Figure 4.6.

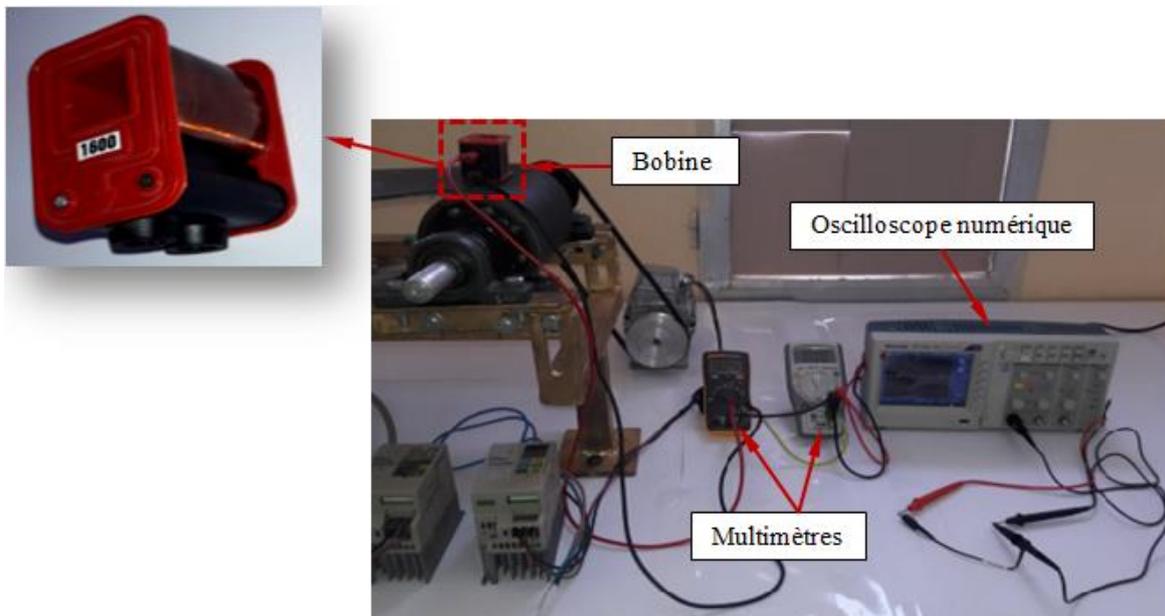


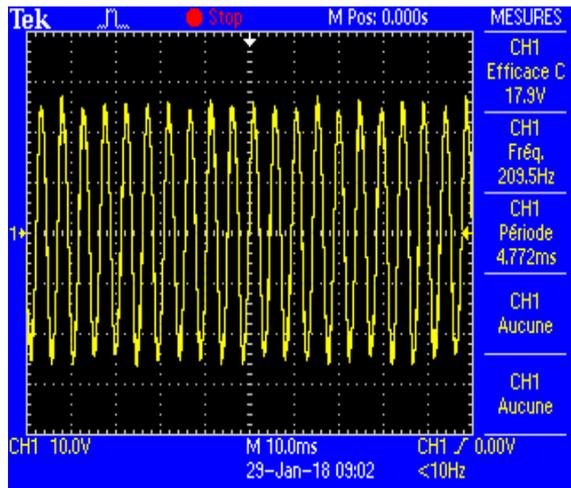
Figure 4.6. Dispositif utilisé pour la mesure et la visualisation de la force électromotrice induite par le champ généré.

Pour la mesure de la f.e.m, nous avons utilisé un oscilloscope numérique de type **Tektronix TDS1002C-EDU** qui offre la possibilité d'enregistrer et stocker numériquement les résultats. Lors de la rotation du tambour, la bobine se trouve dans un champ magnétique variable ce qui conduit à la création d'une force électromotrice induite E . Cette dernière est une fonction linéaire de l'induction magnétique. Selon la loi de Boucherot elle est donnée par :

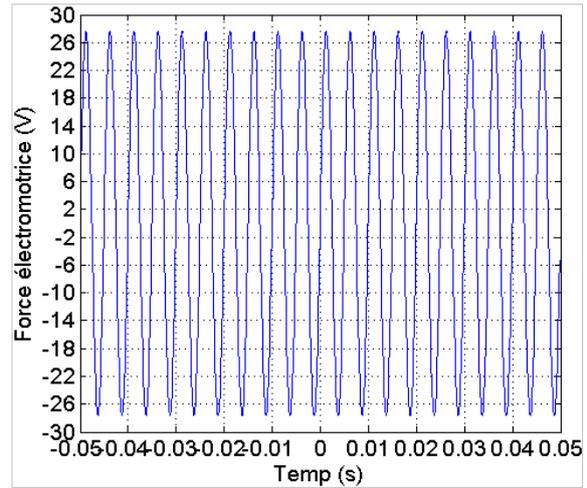
$$E = 4,44 \cdot N f S B_{max} \quad (4.4)$$

N est le nombre de spires de la bobine, f est la fréquence du champ magnétique, S est la section de la bobine traversée par le flux magnétique et B_{max} est la valeur maximale de l'induction.

La comparaison entre les signaux calculé et mesuré de la force électromotrice obtenue pour le cas d'un tambour à huit aimants (pôles) est montrée dans la Figure 4.7.



(a)

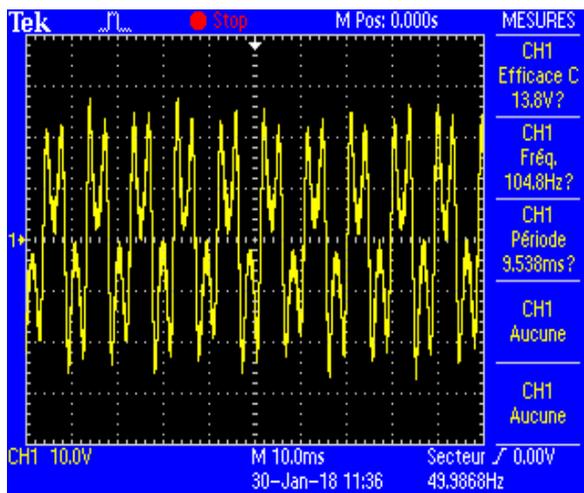


(b)

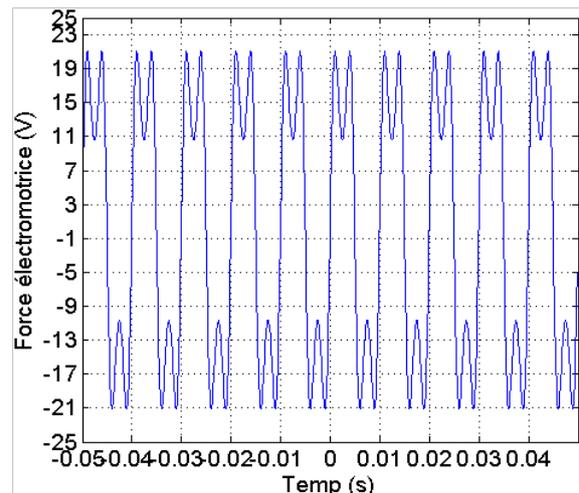
Figure 4.7. Force électromotrice induite obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000\text{tr/mn}$ et paires d'aimants permanents (pôle) $p=4$. (a) résultat expérimental, (b) résultat de calcul.

La Figure 4.7 montre clairement que la force électromotrice générée est alternative et sinusoïdale. La figure qui présente une grande concordance entre le résultat théorique et expérimental montre aussi que pour cette vitesse de rotation, la fréquence est la même $f=200\text{Hz}$. La différence négligeable entre les deux signaux théorique et pratique est liée principalement à l'approche de calcul 2D effectuée.

Pour estimer l'influence du nombre de pôles sur la fréquence du signal, on présente dans la Figure 4.8, la force électromotrice induite pour la même vitesse de rotation mais avec deux paires de pôles.



(a)

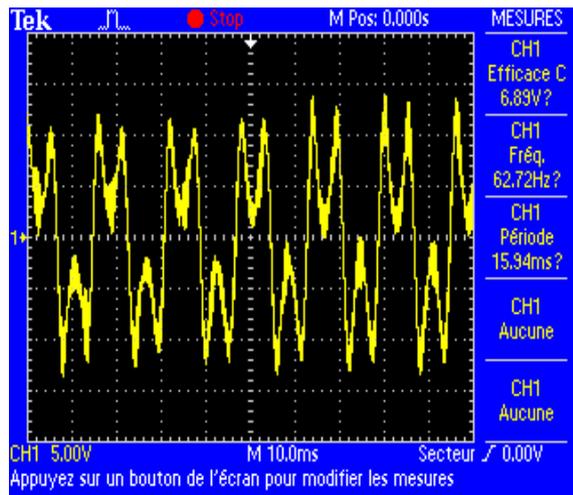


(b)

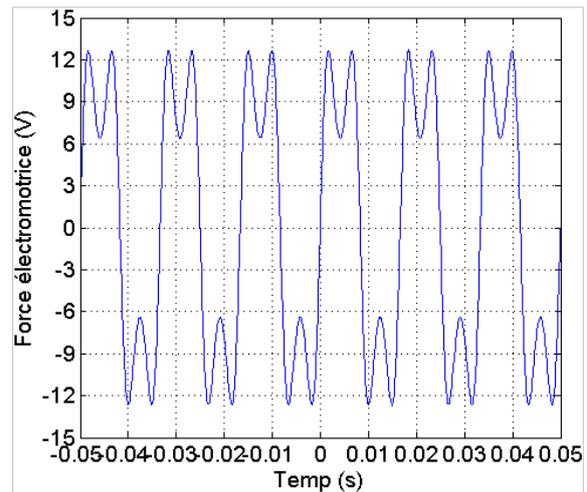
Figure 4.8. Force électromotrice induite obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=3000\text{tr/mn}$ et paires d'aimants permanents $p=2$. (a) résultat expérimental, (b) résultat de calcul.

La figure 4.8 montre que la fréquence du signal devient $f=100\text{Hz}$. Il s'agit de la réduction de la fréquence à la moitié de la fréquence obtenue pour $p=4$. De cela, on conclut que le nombre d'aimants est un facteur important pour l'amélioration de la qualité du champ généré.

Pour vérifier la dépendance entre la fréquence du champ produit et la vitesse de rotation du tambour, nous avons réduit la vitesse de rotation du tambour à la valeur $n=1800\text{tr/min}$. Le calcul et l'enregistrement de la force électromotrice pour une paire de pôles $p=2$ a donné les allures de la Figure 4.9.



(a)



(b)

Figure 4.9. Force électromotrice induite obtenue pour une vitesse de rotation du tambour $n=1800\text{tr/min}$ et paires d'aimants permanents $p=2$. (a) résultat expérimental, (b) résultat de calcul.

Dans ce cas, la fréquence de la force électromotrice est réduite à la valeur 62.72Hz , ainsi que le champ produit.

En conclusion, la dernière étape de vérification a montré que le dispositif proposé permet la génération d'un champ magnétique alternatif sinusoïdal dont la fréquence est une fonction linéaire du nombre de paires de pôles et de la vitesse de rotation du tambour. L'ajustement de ces derniers permet l'amélioration de l'efficacité du champ produit ainsi que les performances de la séparation.

4.3 Vérification expérimentale de la séparation simultanée des particules magnétiques et conductrices

Dans le chapitre précédent, nous avons démontré par le calcul que la forme de séparation proposée (séparateur à tambour à aimant permanent) permet la séparation simultanée des particules magnétiques et conductrice d'un milieu globalement non magnétique et non conducteur. Dans ce calcul effectué en 2D en considérant des particules à géométries supposées parfaitement régulières, la démonstration basée sur le calcul des trajectoires des particules a permis à la fois de connaître le lieu de séparation finale des particules et le temps

total de séparation de chaque type de particule. Pour la vérification expérimentale et afin de se rapprocher de la réalité, des particules magnétiques (para, dia et ferromagnétiques) et conductrices de différentes tailles et formes géométriques ont été traitées. Cette situation nous a permis d'effectuer une vérification qualitative basée sur la comparaison des résultats théoriques et expérimentaux. Pour la vérification expérimentale de séparation, nous nous sommes basés sur le contrôle du comportement des particules et la mesure de leurs positions finales de séparation. La distance entre un point de référence et ses positions finales est choisie comme critère d'efficacité de séparation du séparateur.

4.3.1 Prototype réalisé et protocole expérimental

Le séparateur proposé pour réaliser une séparation simultanée des particules magnétiques et conductrices est constitué principalement d'un tambour à aimants permanents entraîné par un moteur à vitesse variable et un tapis roulant. Dans le prototype réalisé (voir Figure.4.10), le tambour et le tapis roulant sont entraînés séparément ce qui permet plus de solutions pour améliorer les conditions de fonctionnement (ajustement séparé des vitesses du tambour et du tapis) qui conduisent à une séparation meilleure. La taille du tambour est choisie d'une manière à réduire l'effet de l'inertie d'une part et permettre l'installation d'un nombre réduit d'aimants (maximum 8 aimants) ce qui génère un gradient du champ important d'autre part.

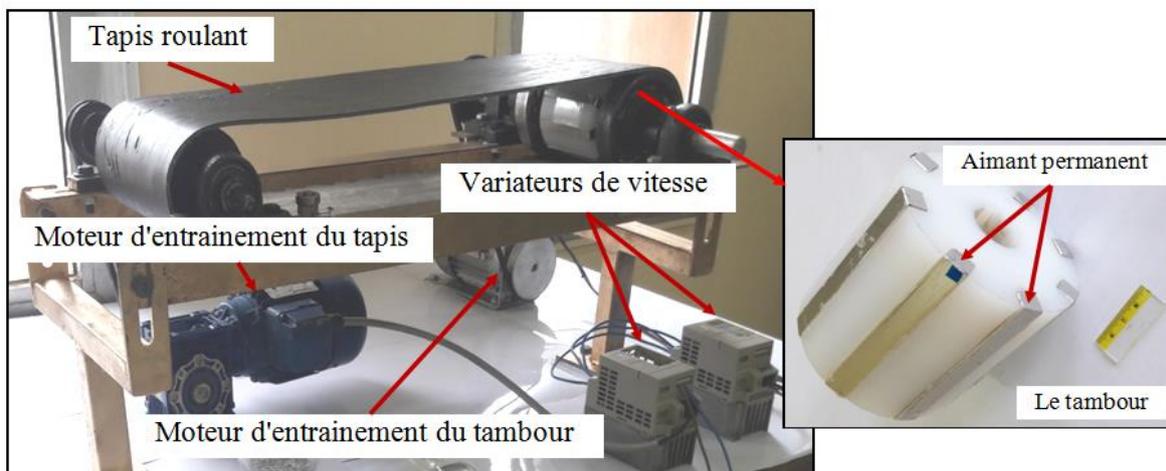


Figure 4.10. Prototype de séparation réalisé.

L'objectif de la réalisation de ce prototype est double, la vérification de la séparation des particules métalliques non homogènes magnétiques et conductrices et l'estimation des performances et les limites d'utilisation de la forme de séparation proposée (séparation par tambour à aimants permanents).

Le protocole expérimental de vérification de la séparation est basé sur l'enregistrement du comportement des particules lors de la mise en marche du séparateur. On injecte une quantité de particules à l'entrée du tapis qui les transporte vers le tambour et on suit leur parcours influencé par le champ appliqué. Pour estimer l'efficacité de séparation et connaître les

limites d'utilisation du séparateur, nous avons mesuré la distance entre le lieu de chute de la particule et la limite du tambour (voir Figure 4.11) où toute particule portée par le tapis tombe en absence du champ appliqué (pour des vitesses réduites du tapis, l'effet de la force centrifuge est négligé).

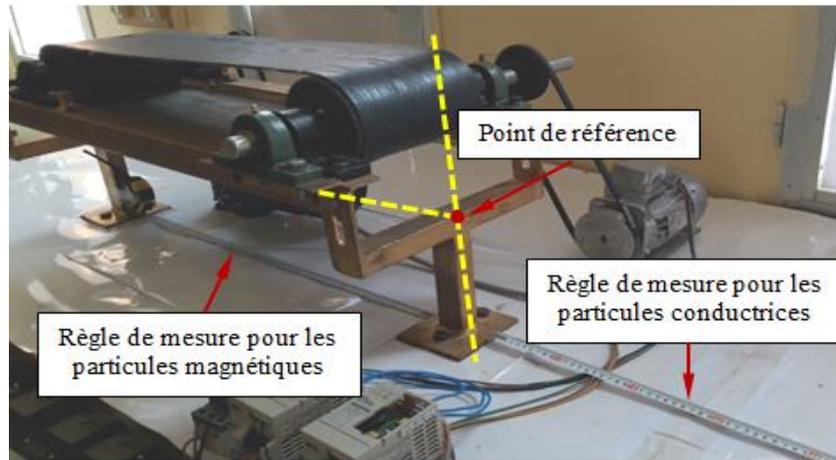


Figure 4.11. Ligne de référence de mesure des lieux de séparation.

4.3.2 Vérification de la séparation des particules magnétiques

4.3.2.1 Particules ferromagnétiques

Pour vérifier la possibilité de séparation des particules magnétiques, nous avons traité les cas d'une poudre de particules de fer de différentes granulométries (voir Figure 4.12). La poudre et les particules sont obtenues par cisaillement d'un matériau de fer dont la perméabilité magnétique est identifiée expérimentalement auparavant [Belounis 2017].

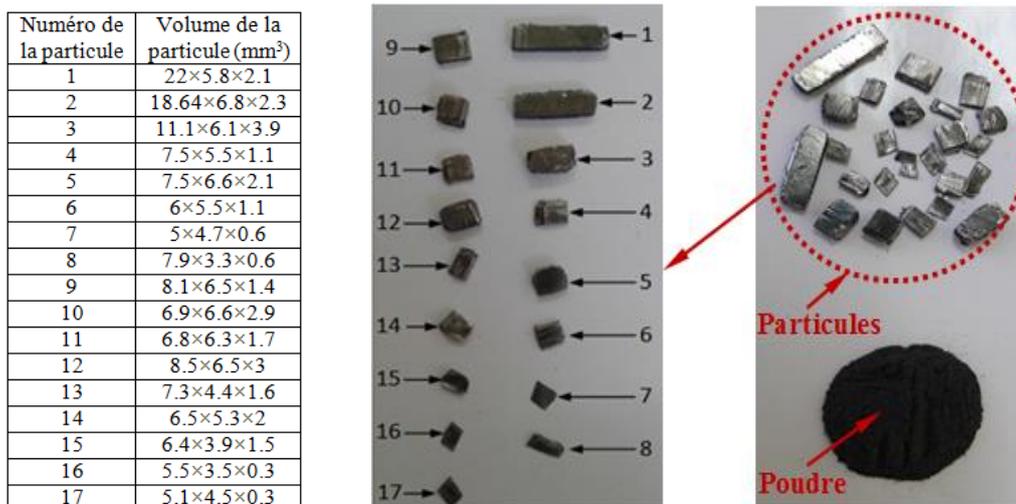


Figure 4.12. Poudre et particules magnétiques de fer traitées.

En premier lieu, nous avons vérifié la séparation de la poudre de fer dont la taille des particules constitutantes peut être considérée micrométrique. Lors d'une telle vérification,

nous avons estimé l'effet de chaque paramètre (vitesse du tambour, vitesse du tapis et nombre d'aimants) de fonctionnement sur l'efficacité de séparation et donc la recherche des valeurs critiques de ces paramètres qui limitent l'utilisation du séparateur pour ce type de traitement. Pour le cas de quatre pôles d'aimants, une vitesse du tambour $n=1200\text{tr/min}$ et pour une vitesse linéaire du tapis $v=0.47\text{m/s}$, l'enregistrement du processus de séparation à l'aide d'une caméra a donné les séquences présentées dans la Figure 4.13.

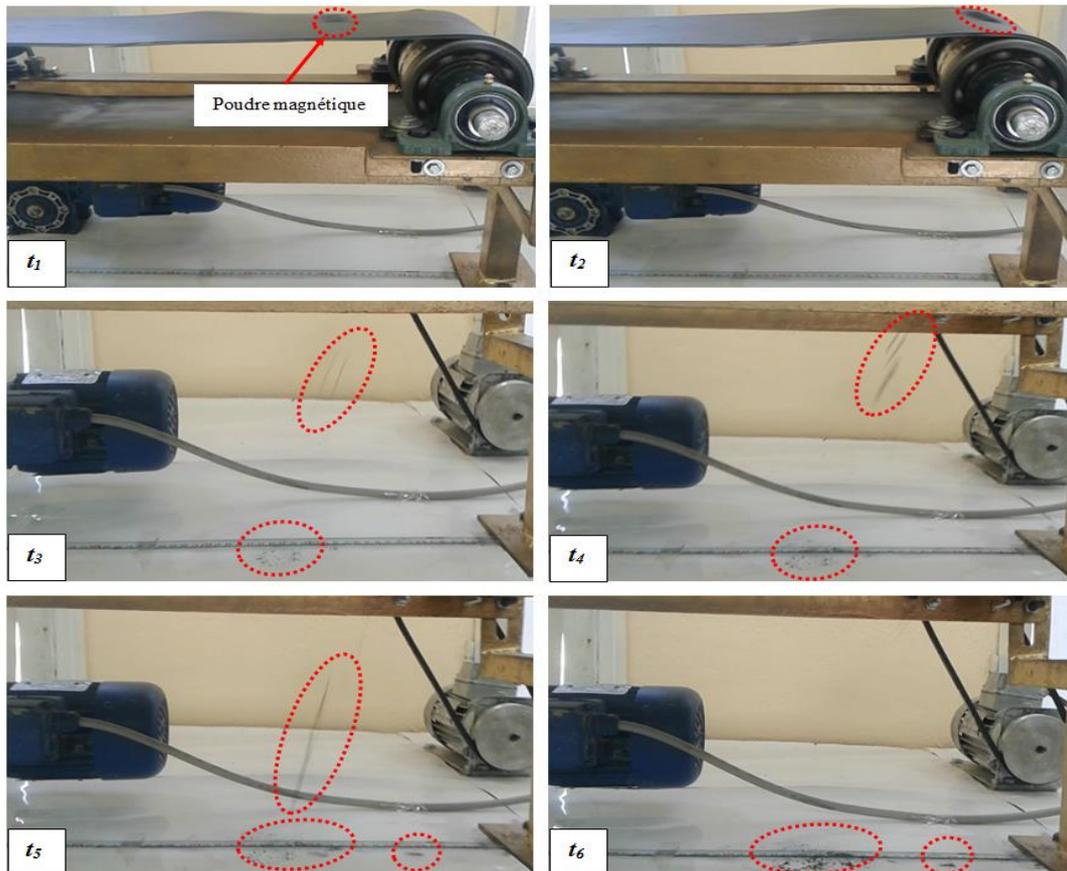


Figure 4.13. Comportement de la quantité de poudre de fer lors de la mise en marche du séparateur.

L'inspection de la Figure 4.13 notamment la séquence t_6 montre que toute la quantité injectée dans le séparateur est séparée parce que le lieu de la chute de toutes les particules est situé derrière la ligne de référence. De cela, on conclut que ce séparateur permet efficacement la séparation des particules micrométriques.

Le traitement de la même poudre de fer avec le même nombre de pôles et la même vitesse du tambour pour des vitesses différentes d'entraînement du tapis a conduit au résultat de la Figure 4.14.

La Figure 4.14 montre clairement que la vitesse du tapis a une grande influence sur l'efficacité de séparation. Une séparation meilleure a été obtenue pour une vitesse linéaire $v=0.62\text{m/s}$. Au-delà de cette valeur, l'efficacité de la séparation commence à se dégrader et un rendement minimal est obtenu pour une vitesse linéaire du tapis $v=1.57\text{m/s}$.

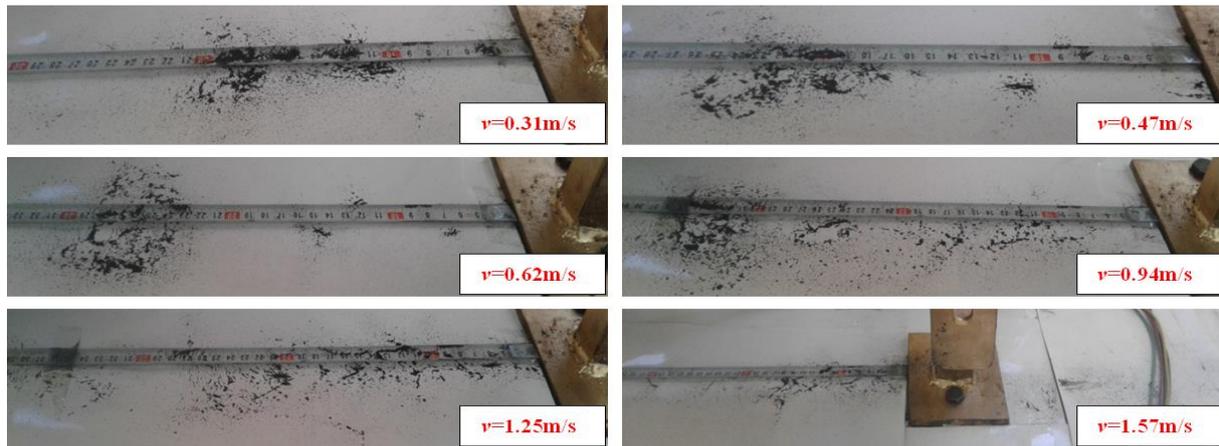


Figure 4.14. Dépôt final des particules séparées (poudre de fer) pour différentes vitesses d'entrainement du tapis roulant.

Pour estimer l'effet de la taille des particules sur l'efficacité de la séparation, nous avons traité des particules de tailles importantes (voir Figure 4.12). Pour les mêmes conditions de fonctionnement, nombre de pôles d'aimants $p=4$, vitesse de rotation du tambour $n=1200\text{tr/min}$ et une vitesse du tapis $v=0.47\text{m/s}$, l'enregistrement du processus de séparation a donné les séquences présentées dans la Figure 4.15.

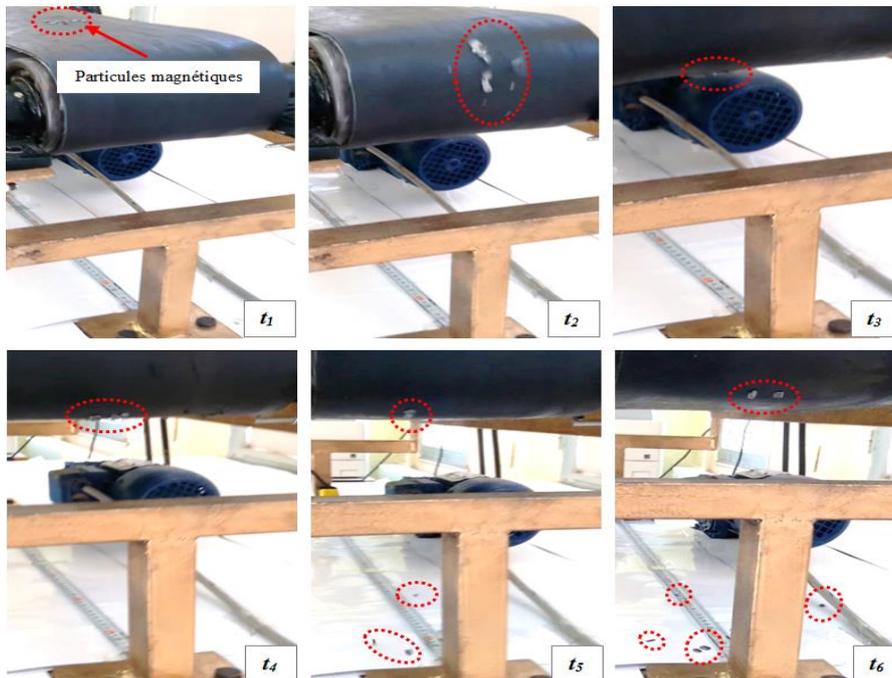


Figure 4.15. Evolution des particules (taille importante) séparées.

Les résultats obtenus ont montré une séparation partielle parce que quelques particules restent collées au tapis. Ce phénomène est lié principalement à la force magnétique qui domine la force de frottement entre les particules et le tapis et la force centrifuge liée à la rotation du tambour.

Les causes principales influant la séparation sélective peuvent être la taille des particules, leurs positions lors de leur injection dans le tapis et leur comportement pendant la séparation. Les particules exerçant par exemple une rotation lors de la séparation, leurs forces magnétiques deviennent faibles à une position donnée par rapport à la force de frottement avec le tapis et se trouvent ainsi éjectées par la suite.

Pour estimer l'effet de la vitesse de rotation du tambour sur l'efficacité de la séparation, nous avons effectué des essais expérimentaux pour différentes vitesses du tambour ($600\text{tr/min} < n < 1800\text{tr/min}$).

Les résultats de ces essais ont montré que l'augmentation de la vitesse du tambour a amélioré l'efficacité de séparation, toutes les particules ont été séparées avec succès. Au-delà d'une vitesse du tambour $n=1800\text{tr/min}$, la séparation commence à se dégrader.

L'étape de vérification consacrée aux particules ferromagnétiques a montré que le dispositif proposé permet la séparation des particules ferromagnétiques. L'amélioration de l'efficacité de séparation est conditionnée par le choix optimal des paramètres de fonctionnement du séparateur (nombre de pôles d'aimants et vitesses du tambour et du tapis roulant).

4.3.2.2 Particules dia et paramagnétiques

Dans cette partie, nous avons procédé à la vérification de la capacité du séparateur proposé à séparer des particules para et diamagnétiques. On sait bien que la présence d'un matériau paramagnétique dans un champ magnétique conduit à son aimantation d'une manière très faible dans le même sens du champ appliqué et son attraction vers la région où le champ est très fort alors que le matériau diamagnétique aura une aimantation faible dans le sens opposé du champ appliqué et sera repoussé vers les zones à faible champ. De cela, et tenant compte du fait que les forces magnétiques appliquées à ces deux matériaux ont presque la même amplitude (mais de sens opposés), il suffit d'effectuer une vérification sur les particules diamagnétiques et déduire les résultats concernant les particules paramagnétiques.

Du fait que l'aimantation des matériaux diamagnétiques est très faible, nous avons considéré des particules de taille significatives dont les échantillons traités sont présentés dans la Figure 4.16.

| Numéro de la particule | Volume de la particule (cm ³) |
|------------------------|---|
| 1 | $3 \times 3 \times 0.1$ |
| 2 | $2 \times 2 \times 0.1$ |
| 3 | $3 \times 2 \times 0.1$ |
| 4 | $\pi \times 0.5^2 \times 0.1$ |
| 5 | $4 \times 2 \times 0.1$ |
| 6 | $1 \times 2 \times 0.1$ |
| 7 | $3 \times 1 \times 0.1$ |
| 8 | $3 \times 0.5 \times 0.1$ |



Figure 4.16. Formes et tailles des particules (pièces) diamagnétiques traitées.

Le matériau diamagnétique traité est le cuivre [Pigot 2008] qui est électriquement un bon conducteur. Son existence dans un champ magnétique variable dans le temps conduit à la génération des forces de Lorentz liée aux courants induits qui travaillent à le repousser loin du séparateur. Pour cela, et afin d'éviter toute confusion entre la force magnétique liée au diamagnétisme du matériau et la force de Lorentz liée à sa conductivité électrique, le tambour est mis au repos (le tambour n'est pas entraîné, $n=0$ tr/min) et on est donc dans le cas d'application d'un champ magnétique statique. Pour le cas d'un tambour à quatre pôles d'aimants ($p=2$) et une vitesse du tapis $v=0.62$ m/s, l'enregistrement du processus de séparation de la pièce numéro 1 a donné les séquences de la Figure 4.17.

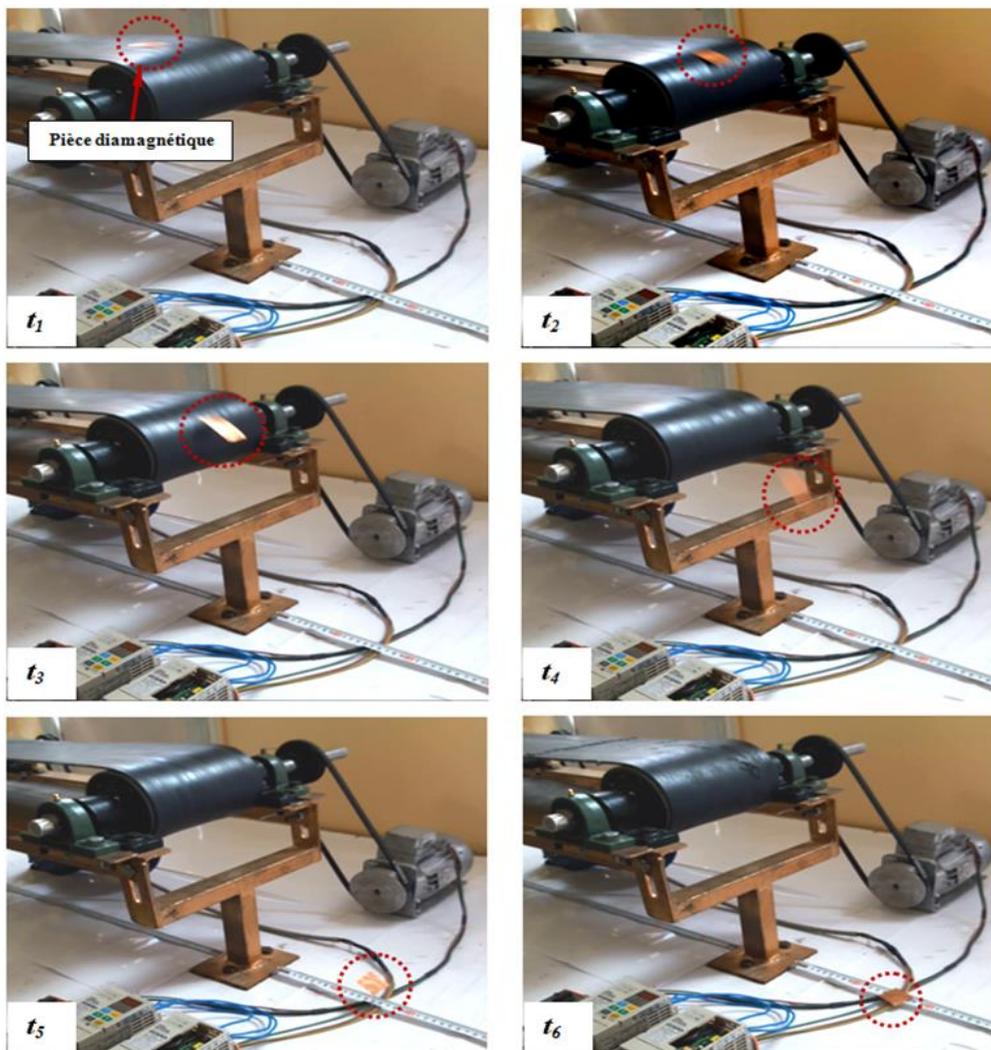


Figure 4.17. Comportement de la pièce diamagnétique dans un champ statique, $p=2$, $v=0.47$ m/s.

Dans la Figure 4.17, la dernière séquence liée à l'instant t_4 montre que la pièce du cuivre est tombée à une distance de 16cm du point de référence. Pour vérifier l'origine de l'éjection de la particule, nous avons réduit la vitesse du tapis à la valeur $v=0.62$ m/s. Dans ces conditions, la particule (pièce) est tombée proche du point de référence, ce qui signifie que l'éjection de la pièce dans le premier cas est due à la force centrifuge et non plus à la force magnétique.

Le traitement d'autres particules (pièces) de tailles plus importantes a conduit aux mêmes constatations ce qui démontre l'incapacité du séparateur proposé à séparer des particules diamagnétiques. Tenant compte des remarques citées au début de cette section, aussi les particules paramagnétiques ne peuvent être séparées par le séparateur proposé.

En conclusion, tout matériau dia ou paramagnétique non conducteur ne peut être séparé par le séparateur proposé.

4.3.2.3 Séparation des particules conductrices

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la vérification expérimentale de la capacité du séparateur proposé à séparer des particules conductrices. Pour effectuer cette vérification, nous avons utilisé un matériau conducteur largement utilisé dans l'industrie et ses déchets représentent une grande partie dans l'ensemble des déchets industriels jetés dans l'environnement. Il s'agit de l'aluminium.

L'échantillon utilisé pour effectuer ces expérimentations comprend des pièces en aluminium de différentes formes et tailles (voir Figure 4.18).

| Numéro de la particule | Volume de la particule (cm ³) |
|------------------------|---|
| 1 | $5 \times 5 \times 0.1$ |
| 2 | $4 \times 4 \times 0.1$ |
| 3 | $3 \times 3 \times 0.1$ |
| 4 | $2 \times 2 \times 0.1$ |
| 5 | $\pi \times 1.9^2 \times 0.1$ |
| 6 | $\pi \times 1.3^2 \times 0.1$ |
| 7 | $1 \times 1 \times 0.1$ |
| 8 | $1 \times 2 \times 0.1$ |

Figure 4.18. Formes et tailles des particules conductrices traitées.

Lors du mouvement du tapis, toute particule se trouvant soumise à une force centrifuge est éjectée loin du tambour. Pour des vitesses très élevées du tapis, cette force peut être très importante et peut dominer la force électrodynamique responsable de la séparation des particules conductrices. Pour cela et afin d'exclure toute confusion entre ces deux forces, on considère au départ une vitesse faible du tapis $v=0.47\text{m/s}$.

Pour un tambour à quatre aimants permanents polarisés alternativement et qui tourne avec une vitesse $n=1800\text{ tr/min}$, l'enregistrement du processus de la séparation de la pièce conductrice numéro 1 (Pièce n°1) a donné les séquences présentées dans la Figure 4.19.

La séquence finale de la Figure 4.19 montre que cette pièce a été éjectée à un lieu situé à une distance de 23cm du point de référence.

Pour les mêmes conditions d'opération du séparateur, le traitement des pièces conductrices de même matériau et de tailles différentes a donné les résultats présentés dans le Tableau 4.3.

| Numéro de la pièce (voir Figure 4.18) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|----|----|----|---|----|----|---|---|
| Distance de séparation (cm) | 23 | 17 | 12 | 9 | 16 | 12 | 5 | 4 |

Tableau 4.3. Distances finales de séparation des pièces conductrices.

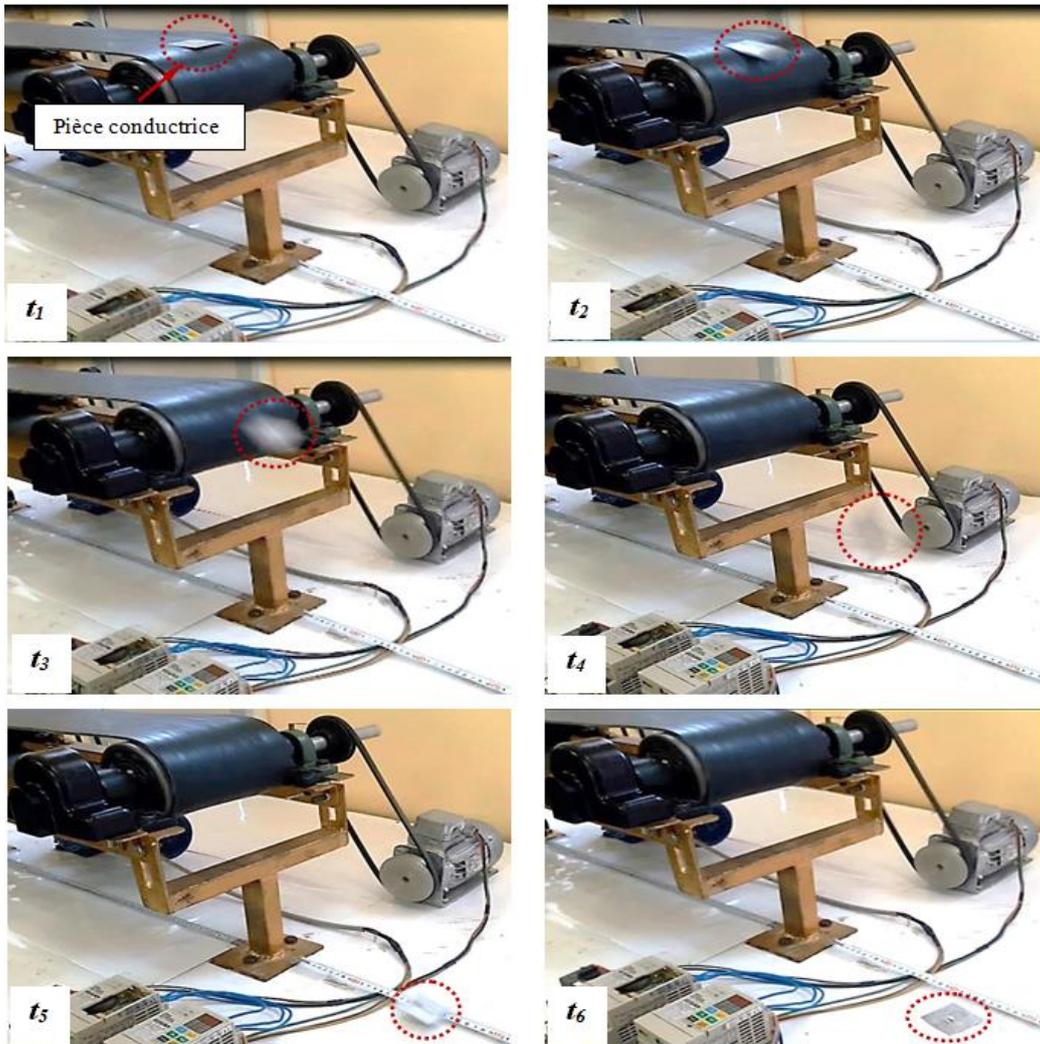


Figure 4.19. Comportement et lieu de séparation de la pièce conductrice obtenus pour $p=2$, $n=1800$ tr/mn, $v=0.47$ m/s.

Afin d'estimer l'effet du nombre d'aimants permanents sur l'efficacité de la séparation, nous avons utilisé un tambour à huit pôles. L'enregistrement du processus de séparation de la pièce n°1 ($50 \times 50 \times 1 \text{mm}^3$) pour la même vitesse du tambour $n=1800$ tr/mn a donné les séquences présentées dans la Figure 4.20.

La séquence finale de la Figure 4.20 montre que pour la même pièce, la distance finale de séparation est 35cm, ce qui signifie que l'augmentation du nombre de pôles conduit à une éjection de la particule plus loin du tambour.

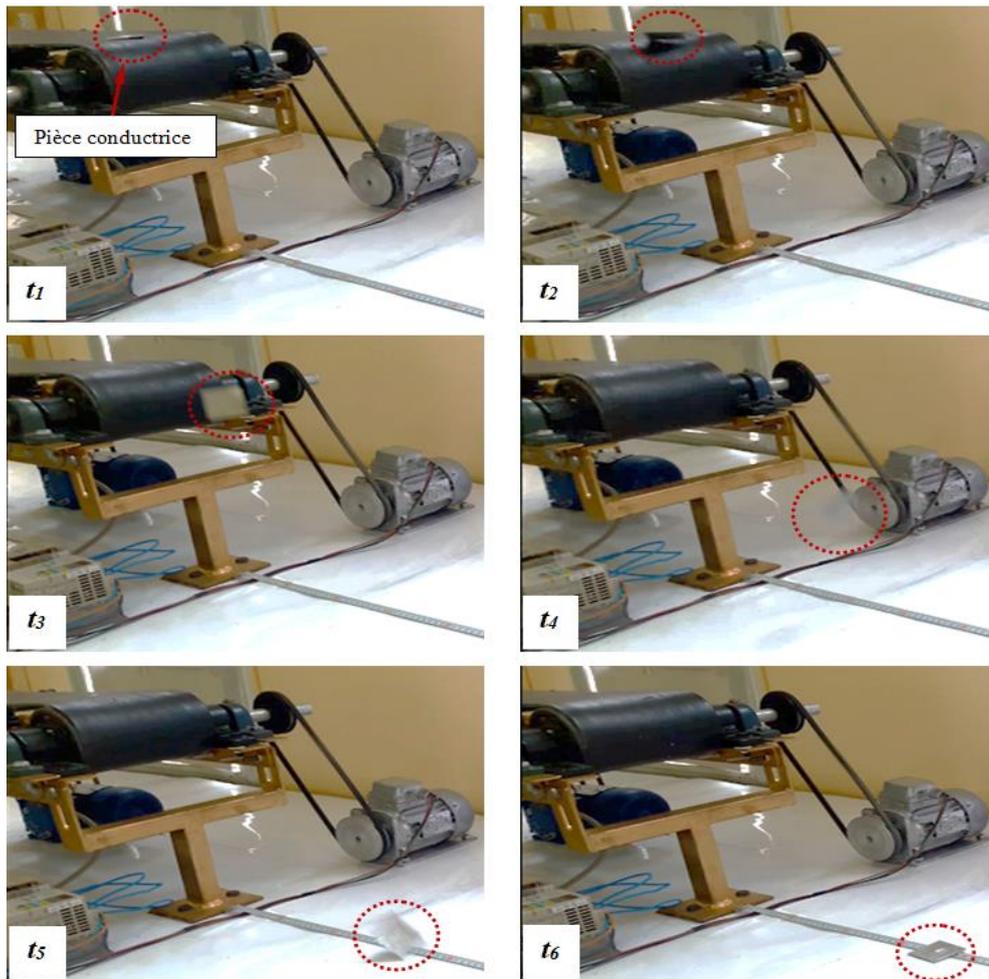


Figure 4.20. Comportement et lieu de séparation de la pièce conductrice, $p=4$, $n=1800$ tr/mn, $v=0.47$ m/s.

Pour estimer l'effet de la vitesse de rotation du tambour sur l'efficacité de la séparation, nous avons présenté dans le Tableau 4.4 les distances de séparation obtenues pour toutes les pièces conductrices de la Figure 4.18.

| Vitesse de rotation (tr/min) | | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 |
|------------------------------|-----------|------|------|------|------|
| Distance de séparation (cm) | Piece n°1 | 12 | 23 | 28 | 30 |
| | Piece n°2 | 10 | 17 | 20 | 23 |
| | Piece n°3 | 11 | 12 | 16 | 19 |
| | Piece n°4 | 06 | 09 | 11 | 10 |
| | Piece n°5 | 08 | 16 | 19 | 20 |
| | Piece n°6 | 06 | 12 | 13 | 14 |
| | Piece n°7 | 04 | 05 | 07 | 07 |
| | Piece n°8 | 03 | 04 | 06 | 06 |

Tableau 4.4. Variation de la distance finale de séparation en fonction de la vitesse de rotation

Les résultats du Tableau 4.4 montrent que la vitesse de rotation du tambour a un effet important sur la distance de séparation. Plus la vitesse est élevée plus la distance de séparation est importante.

Afin de connaître la dépendance entre la taille de la particule et la distance de séparation, on présente dans la Figure 4.21 la variation de la distance de la séparation en fonction des tailles des particules.

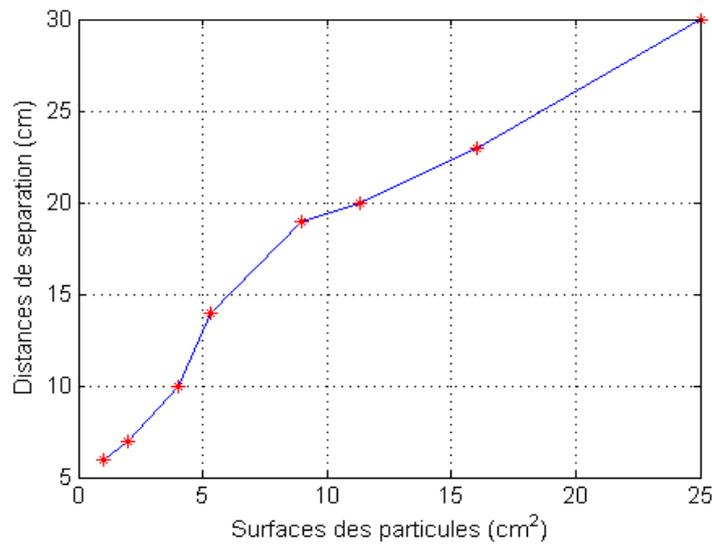


Figure 4.21. Variation de la distances de séparation des particules conductrices en fonction de leurs surfaces obtenue pour une vitesse du tambour $n=3000\text{tr/min}$

La figure 4.21 montre que la taille des particules a un grand effet sur l'efficacité de la séparation. Cela est dû principalement à la forte dépendance entre la taille des particules et la densité des courants induits.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vérification expérimentale de la possibilité de réaliser une séparation simultanée des particules magnétiques et conductrices avec un séparateur à tambour à aimant permanent.

La confrontation qualitative des résultats théoriques et expérimentaux a montré une grande concordance ce qui valide les différentes approches et calcul effectués. Quantitativement, la différence entre les distances de séparation trouvées théoriquement et expérimentalement est due à la résolution 2D du problème magnétique et à la négligence de la force d'interaction mécanique entre la particule et le tapis dans la résolution de l'équation dynamique.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans cette thèse présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique. Il s'agit de l'étude et de l'optimisation d'un séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal dédié à la séparation des particules ferromagnétiques, diamagnétiques, paramagnétiques et conductrices en voies sèche et humide. Après une étude bibliographique qui nous a permis de situer notre étude par rapport aux travaux déjà réalisés, nous avons proposé un séparateur à tambour à aimants permanents positionné horizontalement. La vérification de la possibilité de réaliser une séparation simultanée des particules précitées nous a amenés à simuler le comportement des particules pour la mise en service de ce séparateur. Une telle simulation a nécessité la modélisation des phénomènes en présence (magnétique, hydraulique et dynamique particulaire) et le développement des approches et des codes de résolution. Pour calculer les trajectoires des particules traduisant leur comportement, une résolution 2D basée sur le couplage des méthodes des éléments finis et Runge-Kutta d'ordre 4 a été appliquée. L'approche de résolution 2D au lieu de 3D est justifiée par le fait que magnétiquement le tambour présente une invariance par translation parce que les barreaux des aimants ont une section 1.2cm^2 et une longueur de 10cm (section négligeable par rapport à la longueur). De même, on a supposé que l'alimentation du tambour en matériau à purifier se fait au milieu du tapis où le champ magnétique est quasi constant (négligence des effets de bords). Dans nos calculs, on a négligé l'effet de l'aimantation des particules magnétique parce que nous avons traité le cas de poudre magnétique (taille très fines) ou des copeaux de fer de perméabilité magnétique relativement faible ($\mu_r=80$).

Dans la simulation effectuée, nous avons estimé l'effet de chaque paramètre physique caractérisant les particules à séparer, le milieu d'appartenance et les paramètres de fonctionnement du séparateur notamment le nombre d'aimants du tambour et sa vitesse de rotation. L'analyse des résultats de simulation nous a permis de conclure que pour une granulométrie donnée des particules et milieu à caractéristiques connues, les paramètres importants de fonctionnement du séparateur, et qui peuvent être considérés comme des éléments clés pour l'optimisation du séparateur peuvent être réduits au nombre d'aimants du tambour et sa vitesse de rotation (le type et la taille des aimants sont imposés et la vitesse d'alimentation du séparateur en matériau à traiter peut être choisie au préalable).

Pour l'optimisation du séparateur (nombre d'aimants du tambour et sa vitesse de rotation), nous avons appliqué la méthode PSO où la fonction objectif à minimiser est la distance entre une position désirée de séparation et la position de séparation aléatoire de la particule. Il s'agit de rechercher le nombre d'aimants et la vitesse de rotation qui donnent une distance minimale pour un type connu de particule et une vitesse du matériau connue.

Le choix de la méthode PSO est justifié par la maîtrise de la méthode et les performances (temps de calcul et précision) qu'elle offre par rapport à d'autres méthodes.

Pour valider les résultats théoriques obtenus, des expérimentations ont été achevées. L'analyse des résultats théoriques a montré que les performances de séparation dépendent fortement du champ à appliquer mais faiblement des caractéristiques du matériau à traiter surtout si on fixe au préalable la vitesse d'alimentation du séparateur en matériaux à traiter. Pour cela, ces expérimentations ont été effectuées pour une application en voie sèche.

Une première série a été consacrée à l'identification de l'induction rémanente des aimants permanents utilisés. Pour cela un banc d'essais a été réalisé où les mesures achevées ont constitué la base de données pour la résolution du problème inverse qui a permis l'identification de l'induction rémanente des aimants.

Une autre série d'expérimentations a été consacrée à la vérification des hypothèses introduites, notamment l'approche d'étude 2D, la négligence de l'effet des champs de réaction des particules, la nature du champ produit et l'influences des différents paramètres de fonctionnement du séparateur.

La dernière série d'expérimentation a été consacrée à la vérification des performances du séparateur et la détermination des limites de son utilisation pour chaque type de particule. Pour les particules ferromagnétiques, nous avons traité une poudre magnétique dont les particules peuvent être qualifiées de micrométriques. Les résultats pratiques ont démontré la capacité du séparateur à les séparer d'une manière très efficace.

Pour la séparation de matériaux conducteurs, nous avons traité le cas de copeaux d'aluminium de taille supérieure à $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$. De bonnes performances ont été enregistrées, par contre les particules de taille plus faible n'ont pas pu être séparées parce que les courants induits sont négligeables pour le champ maximal que le tambour peut générer. Pour les particules diamagnétiques, nous avons effectué des essais sur des copeaux de cuivre où un champ statique a été appliqué pour éviter la confusion entre la force de Lorentz et la force de pression magnétique. Le champ produit par le tambour pour différents nombres d'aimants n'a pas pu réaliser la séparation de ce type de particule. Les mêmes résultats seront obtenus pour les particules paramagnétiques parce qu'elles possèdent la même gamme de susceptibilité magnétique (mais de signe opposé).

Comme perspectives, nous comptons résoudre le problème de la séparation magnétique à courants de Foucault à tambour par une approche 3D afin de nous rapprocher de la réalité physique et pour permettre une comparaison quantitative entre la théorie et l'expérimental. Aussi, nous comptons effectuer les expérimentations pour le cas d'un liquide en écoulement à surface libre.

Bibliographies

- [**Allag 2015**] H. Allag, J-P. Yonnet, H. R. H. Bouchekara, et al, “Coulombian model for 3d analytical calculation of the torque exerted on cuboidal permanent magnets with arbitrary oriented polarizations,” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 30, no 4, 2015.
- [**Anzi 2016**] T. Anzi, Y. Matsuura, T. Sugawara et al, “Removal of humic acid in water by rice hull magnetic activated carbon and magnetic separation,” *IEEE Transduction on applied superconductivity*, vol. 26, no. 4, June 2016.
- [**Arthur 2013**] J. W. Arthur, “The evolution of Maxwell’s equations from 1862 to the present day,” *IEEE Antennas and propagation magazine*, vol. 55, no 3, p. 61-81, 2013.
- [**Ayad 2016**] A. N. I. Ayad, A. Ayad Y. Ramdani, “Simulation of Eddy Current Separation of Gold Particles from Sands,” *I.J. Engineering and Manufacturing*, 5, 30-37, 2016.
- [**Ayad 2017**] A.N. E. I. Ayad, “Etude et réalisation d’un séparateur à induction électromagnétique,” *Thèse de doctorat*, université Djillali Liabes de Sidi –Bel-Abbes, 2017.
- [**Azzouza 2017**] A. Azzouza, H. Allag, J-P. Yonnet, P. Tixador, “3-D new calculation principle of levitation force between permanent magnet and hard type-II superconductor using integral approach,” *IEEE Trans. Magn*, vol. 53, no 11. 2017.
- [**Bastos 2003**] J. PedroA. Bastos, N. Sadowski, “Electromagnetic modeling by finite element methods,” *Marcel Dekker, Inc*, 2003.
- [**Barre 2003**] O. Barre, “Contribution à l’étude des formulations de calcul de la force magnétique en magnétostatique, approche numérique et validation expérimentale,” *Thèse de doctorat*, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2003.
- [**Becheikh 2011**] M. Becheikh, “Couplage des deux méthodes, éléments finis-éléments finis de frontières pour l’étude et le calcul des paramètres électromagnétiques d’un moteur à réluctance variable,” *Thèse de doctorat*, Université des sciences et de la technologie d’Oran, Mohamed Boudiaf, 2011.
- [**Belkhalfa 2008**] Y. Belkhalfa, “Etude du comportement dynamique et du transfert de matière et de chaleur entre des particules sphériques et un écoulement laminaire ou turbulent,” *Thèse de doctorat*, Institut national des Sciences Appliquées de Rouen, 2008.
- [**Belounis 2016**] A. Belounis, “Etude 3D d’un procédé de séparation magnétique dans les liquides en écoulement,” *Thèse de doctorat*, Université des frères Mentouri Constantine 1, Constantine, Algérie, 2016.
- [**Ben Ahmed 2005**] H. Ben Ahmed, N. Bernard, G. Feld, B. Multan, “Machines asynchrones-principes généraux et structures,” *Technique de l’ingénieur*, D3520 V1 2005.

[Ben Amira 2013] W. Ben Amira, “Comportement hydrodynamique des nanoparticules au cours de la separation magnétique,” *Thèse de doctorat*, Université D’AIX-MARSEILLE, 2013.

[Bigillon 2001] F. Begillon, “Etude du mouvement bidimensionnel d’une particule dans un courant d’eau sur forte pente,” *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble 1-Joseph Fourier, 2001.

[Boucekara 2018] H. R. .E. H. Boucekara, “Most valuable player algorithm for circular antenna arrays optimization to maximum sidelobe levels reductions,” *IEEE Trans. Magn*, vol. 53, no 11, 2018.

[Boucekara 2018] H. R. E. H, Boucekara, A. Orlandi, M. Al-Qdah, & F. de Paulis, “Most Valuable Player Algorithm for Circular Antenna Arrays Optimization to Maximum Sidelobe Levels Reduction,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (99), 1-7, 2018.

[Boudjefdjouf 2015] H. Boudjefdjouf, R. Mehasni, A. Orlandi, H. R. E. H. Boucekara, “Diagnosis of multiple wiring faults using time-domain reflectometry and teaching–learning–base optimization,” *Electromagnetics*, 35(1), 10-24, 2015.

[Braam 1988] B. C. Braam, H. J. L.Vander Valk, et W. L. Dalmijn, "Eddy-current separation by permanent magnets Part II: Rotating disc separators," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 1, no 1, p. 3-17. 1988.

[Brownlee 2011] J. Brownlee, “Clever algorithms: nature-inspired programming recipes,” *Jason Brownlee*, 2011.

[Bureau 1993] V. Bureau, “Adaptation de la séparation cryogénique aux technologies de l’environnement : Application à l’épuration d’effluents liquides,” *Thèse de doctorat*, I.N.P, Lorraine, Nancy, 1993.

[Campbell 2003] J.S. Campbell, “The research and development of an air separation conveyor for obsolete electronic products recycling, ” *Thèse de doctorat*, Texas Tech University, 2003.

[Campelo 2006] Campelo, F., F. G. Guimarães, H. Igarashi, J. A. Ramírez, & S. Noguchi. “A modified immune network algorithm for multimodal electromagnetic problems,” *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(4), 1111-1114, 2006.

[Carrió 2009] A. P. Carrió, Y. Villacampa, J. Llorens et al, “A computational algorithm for system modeling based on bi-dimensional finite element techniques,” *Advances in Engineering Software* 40, 2009.

[Chen 2019] R. M. Chen, D. Wang and H. Wang, “Martingale solution for the three-dimensional stochastic nonhomogeneous incompressible Navier-Stokes equations driven by Lévy process, ” *Journal of Functional Analysis* , 2019.

- [**Choua 2010**] Y. Choua, “ Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault”, *Thèse de doctorat*, Université Paris-Sud11, 2010.
- [**Chouarbi 2013**] K. Chouarbi, “Micro-moulage de films épais de Sm-Co,” *Thèse de doctorat*, Université Paris Sud, 2013.
- [**Christodoulou 2009**] N. S. Christodoulou, “An algorithm using Runge-Kutta methods of orders 4 and 5 for systems of ODEs,” *International journal of numerical methods and applications*, vol. 2, no 1, p. 47-59, 2009.
- [**Coelho 2012**] L. D. S. Coelho, L. D. Afonso, & P. Alotto, “A modified imperialist competitive algorithm for optimization in electromagnetics,” *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2), 579-582, 2012.
- [**Coey 2002**] J.M.D. Coey, “Permanent magnet applications,” *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 248, no 3, 2002.
- [**Dholu 2017**] N. Dholu, J. R. Nagel, D. Cohrs, *et al*, “Eddy current separation of nonferrous metals using a variable-frequency electromagnet,” *KONA Powder and Particle Journal*, p. 2017012, 2017.
- [**Dular 1996**] P. Dular, “ Modélisation du champ magnétique et des courants induits dans des systèmes tridimensionnels non linéaires”, *Thèse de doctorat*, Université de liege, 1996.
- [**E de Lacheisserie 2000**] E. de Lacheisserie, Magnétisme- Tome II, “Matériaux et applications,” *Collection Grenoble Science*, 2000.
- [**Edison 1889**] T. A. Edison, "Ore-separator," *U.S. Patent* no 400. 317. March 1889.
- [**Feliachi 2003**] M. Feliachi, “Electroaimants pour systems électromagnétiques,” *Technique de l'ingénieur*, D5350 V1 2003.
- [**Gillet 2004**] G. Gillet, “Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ,” *Techniques de l'ingénieur*, Procédés chimie-bio-agro | Opération unitaire. Génie de la réaction chimique, J3222 V1, Mars 2004.
- [**Ghemmour 2011**] A. Ghemmour, “Ecoulement à surface libre de fluide à seuil : rhéométrie et validation des caractéristiques hydrauliques dans un canal à fond mobile. Application aux laves torrentielles,” *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble, 2011.
- [**Gillet 1991**] G. Gillet, “Séparation magnétique,” *Technique de l'ingénieur*, A5220 V1, Novembre 1991.
- [**Gillet 2003**] G. Gillet, “Séparation magnétique a basse et à haute intensité,” *Techniques de l'ingénieur*, Procédés chimie-bio-agro | Opération unitaire. Génie de la réaction chimique, J3221 V1, juin 2003.
- [**Gosse 1995**] J. Gosse, “Mécanique des fluides,” *Technique de l'ingénieur*, A1870V1, 1995.

- [**Guillaume 2009**] C. Guillaume, “Optimisation par essaim particulaire,” *Ecole d’ingénieur en informatique EPITA*, France(SCITA) 2009.
- [**Hadef 2007**] M. Hadef, M. R. Mekideche, H. Allag, “Relative magnetic permeability identification of the permanent magnets of a synchronous motor using inverse problem,” *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 2, no 2, p. 103-109,2007.
- [**Hajlaoui 2018**] R. Hajlaoui, “Résolution à base d’heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules,” *Thèse de doctorat*, Université Bourgogne France-Compté, 2018.
- [**Herbulot 2001**] F. Herbulot, “Récupération et recyclage de l’aluminium. Matières premières,” *Techniques de l’ingénieur*, Matériaux | Élaboration et recyclage des métaux, Réf. : M2346 V1, 2001.
- [**Heyrendt 2012**] L. Heyrendt, “Etude des actions des forces magnétiques volumiques créées par un champ magnétique intense sur des fluides à seuil- possibilités de transition solide-gel,” *Thèse de doctorat*, Université de Lorraine, 2012.
- [**Kao 2016**] Q. Cao, Z. Wang, B. Zhang, et al, “Targeting behavior of magnetic particles under gradient magnetic field produced by two types of permanent magnets,” *IEEE Transduction on applied superconductivity*, vol. 26, no. 4, June 2016.
- [**Ku 2016**] J.G. Ku, X.Y. Liu, H. H. Chen et al, “Interaction between two magnetic dipoles in a uniform magnetic field,” *AIP Advances*, 2016, vol. 6, no 2, p. 025004.
- [**Kuo 2017**] S. Y. Kuo, & Y. H. Chou, “Entanglement-enhanced quantum-inspired tabu search algorithm for function optimization,” *IEEE Access*, 5, 13236-13252, 2017.
- [**Kumsawat 2005**] P.Kumsawat, , K. Attakitmongcol, & A. Srikaew, “A new approach for optimization in image watermarking by using genetic algorithms,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(12), 4707-4719, 2005.
- [**Laurent 2004**] M. Laurent, “Modélisation direct et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis,” *Thèse de doctorat en cotutelle*, Université de Nantes et Université de Lausanne, 2004.
- [**Le Breton 2009**] J-M. Le Breton, L. Lechevallier, P. Tenaud et A. Morel, “Aimant permanents : Matériaux et propriétés,” *Technique de l’ingénieur*, D2100 V2, 2009.
- [**Lechevallier 2007**] L. Lechevallier, J-M. Le Breton P. Tenaud, A. Morel et S. Brassard “Aimant permanents : Applications et perspectives,” *Technique de l’ingénieur*, D2102 V1, 2007.
- [**Liu 2013**] G. R. Liu and S. S. Quek, “The finite element method: a practical course,” *Buttenworth-Heineman*, 2013.
- [**Li 2017**] J. Li, Y. Jiang, et Z. Xu, “Eddy current separation technology for recycling printed

circuit boards from crushed cell phones,” *Journal of cleaner production*, vol. 141, p. 1316-1323, 2017.

[Lungu 2001] M. Lungu et Z. Schlett, “Vertical drum eddy-current separator with permanent magnets,” *International journal of mineral processing*, , vol. 63, no 4, 2001

[Lungu 2002] M. Lungu, et P. Rem, “Separation of small nonferrous particles using an inclined drum eddy-current separator with permanent magnets,” *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 38, no 3, p. 1534-1538, 2002.

[Lungu 2005] M. Lungu, “Separation of small nonferrous particles using an angular rotary drum eddy-current separator with permanent magnets,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 78, no 1, p. 22-30. 2005.

[Lungu 2009] M. Lungu, “Separation of small nonferrous particles using a two successive steps eddy-current separator with permanent magnets,” *International Journal of Mineral Processing*. vol. 93, no 2, p. 172-178. 2009

[Mack 1996] D. Mack, “the Top 10 equations [electrical engineering],” *IEEE Potentials*, vol. 15, no 5, p. 39-40, 1996.

[McCarthy 1922] J. B. McCarthy, “*Concentrator*,” *U.S. Patent* no 1,417,189. Mai 1922.

[Mehasni 2007] R. Mehasni, “élaboration de modèles de calcul de dispositifs a induction électromagnétique : application a un système de séparation magnétique dans les milieux particulaire,” *Thèse de doctorat*, université de Constantine, 2007.

[Meier-Staude 2002] R. Meier-Staude, Z. Schlett, M. Lungu *et al*, “A new possibility in eddy-current separation,” *Minerals Engineering*, vol. 15, no 4, p. 287-291.2002.

[Moey 1979] B. W. Morey et S. Rudy, “*Separation of non-magnetic conductive metals*,” *U.S. Patent* No 4,137,156, 30 janv. 1979.

[Moon 1994] F. C. Moon, “Superconducting levitation applications to bearings and magnetic transportation,” *Ithaca*, New York, 1994.

[Naidu 2010] H. Naidu, “Electrodynamic separation of metallic granules from mixed waste stream,” *Thèse de doctorat*. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, 2010.

[Nakai 2010] Y. Nakai, F. Mishima, Y. Akiyama et al, “Development of magnetic separation system for powder separation,” *IEEE Transduction on applied superconductivity*, vol. 20, no. 3, June 2010.

[N’Gotta 2015] P. H. N’Gotta, “Développement d’un quadripôle à aimant permanent à usage des accélérateurs de particules,” *Thèse de doctorat*, Université Grenoble Alpes, 2015.

[Pedersen 2010] M. E. H. Pedersen, “Good parameters for Particle Swarm Optimization,” *Hvass LabRep. HL1001*, Copenhagen, Denmark, Tech, 2010.

- [**Pigot 08**] C. Pigot, H. Chetouani, G. Poulin and G. Reyne, “Diamagnetic Levitation of Solids at Microscale,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no 11, p. 4521-4524, 2008.
- [**Rao 2004**] S. S. Rao, “The finite element method in engineering,” *Elsevier science & technology books*, Miami, 2004.
- [**Rapin 1993**] P. Rapin, “Méthode des éléments finis,” *Technique de l’ingénieur*, A656V1, 1993.
- [**Rem 1997**] P.C. Rem, P.A. Leest, A.J. van den Akker “A model for eddy current separation,” *Int. J. Miner. Process.* 49 193-200, 1997.
- [**Rem 1998**] P. C. Rem, E. M. Beunder, and A. J. van den Akker, “Simulation of Eddy-Current Separators,” *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 34, no. 4, July 1998.
- [**Restrepo 2015**] C. Restrepo, T. Konjedic, A. Garces, J. Calvente, & R. Giral, “Identification of a proton-exchange membrane fuel cell’s model parameters by means of an evolution strategy,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(2), 548-559, 2015.
- [**Ruan 2016a**] J. Ruan, et Z. Xu, “Constructing environment-friendly return road of metals from e-waste: Combination of physical separation technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, p. 745-760. 2016.
- [**Ruan 2016b**] J. RUAN, J. ZHENG, L. DONG *et al*, “Environment-friendly technology of recovering full resources of waste capacitors,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 5, no 1, p. 287-293. 2016.
- [**Saurabh 2009**] S. SAURABH, “High frequency eddy-current separation of metallic granules from foundry sands, e-scrap and other waste streams,” *Thèse de doctorat*, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, 2009.
- [**Serra 2017**] R. Serra, J. Olivier, “Apport de l’optimisation par essais particuliers pour la detection de modifications structurelles à partir des propriétés dynamiques,” *23^{ème} Congrès Français de mécanique*, Lille, 2017.
- [**Sharifi 2015**] F. Sharifi, B. Firoozabadi, M. Saidi et al, “Numerical modeling of ureagenesis in microfluidic channel mimicking a liver lobule,” *IN: 22nd Iranian conference on biomedical engineering (ICBME), IEEE*, 2015.
- [**Sivasubramanian 2014**] M. Sivasubramanian, R. Madhukhiran, P. Manikumar et al, “Numerical investigation on laminar flow through a channel with staggered square blocks,” *IEEE international conference on computational intelligence and computing research*, p. 1-5, 2014.
- [**Smith 2019**] Y. R. Smith , J. R. Nagel, R. K. Rajamani, “Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review,” *Minerals Engineering*, vol.133, p 149–159, (2019)
- [**Spiteri 2002**] P. Spiteri, “Présentation générale de la méthode des éléments finis,” *Technique*

de l'ingénieur, AF505V1, 2002.

[Viollet 2003] P-L. Viollet, J-P. Chabard et P. Esposito, “Mécanique des fluides appliquée : écoulements incompressibles dans les circuits, canaux et rivières, autour des structures et dans l’environnement,” *Presses des Ponts*, 2003.

[Xiang 2015] F. P. Xiang, E. P. Li, X. C. Wei, & J. M. Jin, “A particle swarm optimization-based approach for predicting maximum radiated emission from PCBs with dominant radiators,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(5), 1197-1205, 2015.

[Zhang 1999] S. Zhang, P.C. Rem, E. Forssberg, “The investigation of separability of particles smaller than 5 mm by eddy current separation technology. Part I: Rotating type eddy current separators,” *Magn. Electr. Sep.* 9, 233–251. 1999b.

[Zheng 2017] X. Zheng, N. Guo, R. Cui, et al, “Magnetic Field Simulation and Experimental Tests of Special Cross-Sectional Shape Matrices for High Gradient Magnetic Separation,” *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(3), 1-10, 2017.

ملخص

يقدم العمل المنجز في هذه الرسالة مساهمة في دراسة مشكلات الفصل المغناطيسي. هو عبارة عن دراسة وتحقيق فاصل مغناطيسي بالتيارات الدوامة ذو أسطوانة أفقية موجه لفصل الجزيئات المغناطيسية، الغير مغناطيسية، شبه المغناطيسية والموصلة في الأوساط الجافة والسائلة. تم تطوير واستعمال مقاربة ثنائية الأبعاد تعتمد على أساس الربط بين المعادلات النموذجية التي تحكم الظواهر الموجودة (المغناطيسية، الهيدروليكية و الديناميكية الجزيئية) لمعالجة مشكلة الفصل المغناطيسي. من أجل تحقيق عملية فصل مغناطيسي فعالة، قمنا بإجراء تحسين للفاصل المغناطيسي المقترح. هذا التحسين يستوجب تحديدا للعوامل الرئيسية التي يعتمد عليها الفصل المغناطيسي، وهذا التحديد يتطلب حل وتحليل مشاكل الفصل مع مراعاة خصوصية تطور الظواهر الموجودة. اعتمد التحسين الذي تم تنفيذه على تصغير الدالة الهدف وهي عبارة عن المسافة بين نقطة النهاية للفصل والموضع المختار بطريقة تأخذ في الاعتبار مواصفات المجال المغناطيسي المطبق وسرعات الحزام والسائل. لهذا، تم استخدام طريقة تحسين سرب الجزيئات (PSO). من أجل التحقق من صحة المقاربات ورموز الحساب التي تم تطويرها وتنفيذها من ناحية، للتحقق من التحليل النظري المنجز وأداء الفاصل المصمم ولتحديد حدود استخدامه من ناحية أخرى، تم إجراء تجارب في الأوساط الجافة. يتكون الجهاز المنجز أساساً من أسطوانة تحتوي على متتالية من المغناطيس الدائم متطابقة مرتبة ترتيباً متتابعاً بقطبية متناوبة ويحركها محرك يتحكم فيه مغير السرعة. يتم ضمان نقل المواد المعالجة بواسطة حزام يدور بشكل مستقل عن الأسطوانة. أظهرت المقارنة النوعية للنتائج النظرية والتجريبية توافقاً كبيراً وهو ما يؤكد صحة المقاربات والحسابات المختلفة التي تم تنفيذها.

كلمات مفاتيح: مغناطيس دائم، العناصر المنتهية، أسطوانة، عزل مغناطيسي، تحسين سرب الجزيئات.

Résumé

Le travail réalisé dans cette thèse présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique. Il s'agit de l'étude et la réalisation d'un séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal dédié à la séparation des particules ferromagnétiques, diamagnétiques, paramagnétiques et conductrices en voies sèche et humide. Une approche bidimensionnelle basée sur le couplage des modèles qui gouvernent les phénomènes en présence (magnétique, hydraulique et dynamique particulière) a été développée et utilisée pour traiter le problème de la séparation magnétique. Afin de réaliser une séparation performante, une optimisation du séparateur proposé a été réalisée. Cette optimisation exige l'identification des paramètres clés desquels dépend la séparation, cette identification nécessite la résolution et l'analyse des problèmes de la séparation en tenant compte de la particularité d'évolution des phénomènes en présence. L'optimisation effectuée a été basée sur la minimisation d'une fonction objectif qui est la distance entre le point final de la séparation et une position choisie de manière à prendre en compte les spécifications du champ magnétique appliqué et des vitesses du tapis et du liquide. Pour cela, la méthode d'optimisation par essaim des particules (OEP) a été utilisée. Des expérimentations ont été effectuées en voie sèche, afin de valider les approches et les codes de calcul développés et mis en œuvre d'une part et vérifier l'analyse théorique effectuée et les performances du séparateur conçu et définir les limites de son utilisation d'autre part. Le dispositif réalisé est constitué principalement d'un tambour doté d'une succession d'aimants permanents identiques disposés successivement avec une alternance de polarité et entraîné par un moteur commandé par un variateur de vitesse. Le transport du matériau traité est assuré par un tapis roulant qui tourne indépendamment du tambour. La confrontation qualitative des résultats théoriques et expérimentaux a montré une grande concordance ce qui valide les différentes approches et calcul effectués.

Mots clés: Aimant permanent, éléments finis, tambour, optimisation par essaim de particules, séparation magnétique.

Abstract

The presented work in this thesis presents a contribution to the process of magnetic separation problems. This study is based mainly on conception and realization of an eddy current magnetic separator with an horizontal drum dedicated to ferromagnetic, diamagnetic, paramagnetic and conductive particles separation in dry and wet ways. A two-dimensional approach based on models coupling the existing phenomena (magnetic, hydraulic and particle dynamics) has been developed and used to treat the magnetic separation problem. In order to achieve a successful separation, an optimization of the proposed separator has been accomplished. This optimization requires the key parameters identification on which the separation depends. Such identification requires a resolution and analysis of the separation problem taking into account the existing phenomena evolution. The carried out optimization is based on the minimization of an objective function which is the distance between the end point of the separation and a chosen position in a way to take into account the specifications of the applied magnetic field and the velocities of the belt and liquid. For this, the Particle Swarm Optimization (PSO) method was used. In order to validate the approaches and the developed and implemented calculation codes on one hand, to verify the theoretical analysis carried out and the performances of the designed separator and to define the limits of its use on the other hand, experiments have been carried out in dry way. The device consists mainly of a drum with a succession of identical permanent magnets successively arranged with alternating polarity and driven by a motor controlled by a variable speed drive. Transport of the treated material is ensured by a conveyor belt running independently of the drum. The qualitative comparison of theoretical and experimental results showed a great concordance which validates the different approaches and performed calculations.

Key words: Permanent magnet, finite element, drum, particle swarm optimization, magnetic separation.

Résumé

Le travail réalisé dans cette thèse présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique. Il s'agit de l'étude et la réalisation d'un séparateur magnétique à courants de Foucault à tambour horizontal dédié à la séparation des particules ferromagnétiques, diamagnétiques, paramagnétiques et conductrices en voies sèche et humide. Une approche bidimensionnelle basée sur le couplage des équations modèles qui gouvernent les phénomènes en présence (magnétique, hydraulique et dynamique particulaire) a été développée et utilisée pour traiter le problème de la séparation magnétique. Afin de réaliser une séparation performante, une optimisation du séparateur proposé a été réalisée. Cette optimisation exige l'identification des paramètres clés des quels dépend la séparation, cette identification nécessite la résolution et l'analyse des problèmes de la séparation en tenant compte la particularité d'évolution des phénomènes en présence. L'optimisation effectuée a été basée sur la minimisation d'une fonction objectif qui est la distance entre le point final de la séparation et une position choisie d'une manière à tenir en compte les spécifications du champ magnétique appliqué et des vitesses du tapis et du liquide. Pour cela, la méthode d'optimisation par essaim des particules (OEP) a été utilisée. Des expérimentations ont été effectuées en voie sèche, afin de valider les approches et les codes de calcul développés et mis en œuvre d'une part et vérifier l'analyse théorique effectuée et les performances du séparateur conçu et définir les limites de son utilisation d'autre part. Le dispositif réalisé est constitué principalement d'un tambour doté d'une succession d'aimants permanents identiques disposés successivement avec une alternance de polarité et entraîné par un moteur commandé par un variateur de vitesse. Le transport du matériau traité est assuré par un tapis roulant qui tourne indépendamment du tambour. La confrontation qualitative des résultats théoriques et expérimentaux a montré une grande concordance ce qui valide les différentes approches et calcul effectués.

Mots clés: Aimant permanent, éléments finis, tambour, optimisation par essaim de particules, séparation magnétique.

Abstract

The presented work in this thesis presents a contribution to the process of magnetic separation problems. This study based mainly on study and realization of an eddy current magnetic separator with a horizontal drum dedicated to ferromagnetic, diamagnetic, paramagnetic and conductive particles separation in dry and wet ways. A two-dimensional approach based on the model equations coupling governing the existing phenomena (magnetic, hydraulic and particle dynamics) has been developed and used to treat the magnetic separation problem. In order to achieve a successful separation, optimization of the proposed separator has been accomplished. This optimization requires the key parameters identification on which the separation depends. Such identification requires a resolution and analysis of the separation problem taking into account the existing phenomena evolution. The optimization carried out is based on the minimization of an objective function which is the distance between the end point of the separation and a chosen position in a way to take into account the specifications of the applied magnetic field and the velocities of the belt and liquid. For this, the Particle Swarm Optimization (PSO) method was used. In order to validate the approaches and the developed and implemented calculation codes on one hand, to verify the theoretical analysis carried out and the performances of the designed separator and to define the limits of its use on the other hand, experiments have been carried out in dry way. The device consists mainly of a drum with a succession of identical permanent magnets successively arranged with alternating polarity and driven by a motor controlled by a variable speed drive. Transport of the treated material is ensured by a conveyor belt running independently of the drum. The qualitative comparison of theoretical and experimental results showed a great concordance which validates the different approaches and performed calculations.

Key words: Permanent magnet, finite element, drum, particle swarm optimization, magnetic separation.

ملخص

يقدم العمل المنجز في هذه الرسالة مساهمة في دراسة مشكلات الفصل المغناطيسي. هو عبارة عن دراسة وتحقيق فاصل مغناطيسي بالتيارات الدوامة ذو أسطوانة أفقية موجه لفصل الجزيئات المغناطيسية، الغير مغناطيسية، شبه المغناطيسية والموصلة في الأوساط الجافة والسائلة. تم تطوير واستعمال مقارنة ثنائية الأبعاد تعتمد على أساس الربط بين المعادلات النموذجية التي تحكم الظواهر الموجودة (المغناطيسية، الهيدروليكية والديناميكية الجزيئية) لمعالجة مشكلة الفصل المغناطيسي. من أجل تحقيق عملية فصل مغناطيسي فعالة، قمنا بإجراء تحسين للفواصل المقترح. هذا التحسين يستوجب تحديدا للعوامل الرئيسية التي يعتمد عليها الفصل المغناطيسي، وهذا التحديد يتطلب حل وتحليل مشاكل الفصل مع مراعاة خصوصية تطور الظواهر الموجودة. اعتمد التحسين الذي تم تنفيذه على تصغير الدالة الهدف وهي عبارة عن المسافة بين نقطة النهاية للفصل والموضع المختار بطريقة تأخذ في الاعتبار مواصفات المجال المغناطيسي المطبق وسرعات الحزام والسائل. لهذا، تم استخدام طريقة تحسين سرب الجزيئات (PSO). من أجل التحقق من صحة المقاربات ورموز الحساب التي تم تطويرها وتنفيذها من ناحية، للتحقق من التحليل النظري المنجز وأداء الفاصل المصمم ولتحديد حدود استخدامه من ناحية أخرى، تم إجراء تجارب في الأوساط الجافة. يتكون الجهاز المنجز أساساً من أسطوانة تحتوي على متتالية من المغناطيس الدائم متطابقة مرتبة ترتيباً متتابعاً بقطبية متناوبة ويحركها محرك يتحكم فيه مغير السرعة. يتم ضمان نقل المواد المعالجة بواسطة حزام يدور بشكل مستقل عن الأسطوانة. أظهرت المقارنة النوعية للنتائج النظرية والتجريبية توافقاً كبيراً وهو ما يؤكد صحة المقاربات والحسابات المختلفة التي تم تنفيذها.

كلمات مفتاحية: مغناطيس دائم، العناصر المنتهية، أسطوانة، عزل مغناطيسي، تحسين سرب الجزيئات.