



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



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

N° de série : .....

N° d'ordre : .....

## Thèse

Pour l'obtention du diplôme de doctorat troisième cycle  
en Electrotechnique

Option : ELECTROTECHNIQUE

Présentée par :

**BELOUNIS Abdallah**

Master en Electrotechnique

## Thème

---

# Etude 3D d'un Procédé de Séparation Magnétique Dans les Liquides en Ecoulement

---

Soutenue le, 20/09/2016

Devant le Jury :

<i>Président :</i>	Aissa Bouzid	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine
<i>Rapporteur :</i>	Rabia Mehasni	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine
<i>Co-rapporteur :</i>	Mouloud Feliachi	Professeur	Université de Nantes, France
<i>Examineur 1 :</i>	Kamel Talbi	Professeur	Université des Frères Mentouri Constantine
<i>Examineur 2 :</i>	Ahmed Cheriet	Professeur	Université Mohamed Khider Biskra
<i>Examineur 3 :</i>	Samir Bensaid	MCA	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira
<i>Membre invité :</i>	M. El-Hadi Latreche	Professeur	Université Abdelhamid Mehri Constantine 2

## Remerciements

*Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse de doctorat ont été réalisés sous une co-direction effectuée au sein des deux laboratoires, Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (LEC), université des frères Mentouri Constantine 1, Algérie, et le Laboratoire de Recherche (IREENA), université de Nantes, France.*

*Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, professeur **Rabia MEHASNI** au département d'électrotechnique de l'université des frères Mentouri Constantine 1 pour m'avoir guidé et conseillé tout au long de la réalisation de mes travaux de recherche. Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse professeur **Mouloud FELIACHI** pour son accueil très chaleureux au sein du laboratoire IREENA, pour son soutien illimité, pour ses conseils fructueux qui m'a prodigué lors de mon stage de finalisation de ma thèse.*

*Mes sincères remerciements aux membres du jury chacun à son nom :*

*Monsieur **Aissa Bouzid**, professeur au département d'électrotechnique à l'université des frères Mentouri Constantine 1, pour l'honneur qui nous a fait par l'acceptation de présider le jury de soutenance.*

*Monsieur **Ahmed Cheriet**, professeur à l'université Mohamed Khider de Biskra, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Monsieur **Kamel Talbi**, professeur au département de mécanique à l'université des frères Mentouri Constantine 1, pour l'acceptation d'être membre dans le jury de soutenance et d'examiner ce mémoire de thèse.*

*Monsieur **Samir Bensaid**, maître de conférence "A" à l'université Akli Mohnd Oulhadj de Bouira, pour son acceptation d'être membre de ce jury et d'examiner mes travaux de thèse.*

*Tous mes remerciements les plus distinguées à mes enseignants de l'université des frères Mentouri Constantine, pour leurs contributions inestimable à ma formation et pour le savoir qu'ils m'ont inculqué.*

*Grand merci et respect à mes très chers parents, à mes frères et soeurs pour leur soutien et encouragement.*

*À tous ceux, que je n'ai pas cités ici, je dirai MERCI !*

# Table Des Matières

Remerciements .....	i
Table des matières .....	ii
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux.....	x
Introduction générale .....	1

## *Chapitre 1: Etat de l'Art sur la Séparation Magnétique*

1. Etat de l'art sur la séparation magnétique .....	6
1.1. Historique sur l'évolution des techniques de la séparation magnétique .....	6
1.2. Classification des séparateurs magnétiques .....	7
1.2.1. Classification selon le type d'application .....	7
1.2.2. Classification selon la nature du champ .....	8
1.2.3. Classification selon la valeur du champ .....	8
1.3. Différentes débouchés de la séparation magnétique .....	9
1.3.1. Traitement minéralurgique .....	9
1.3.2. Traitement des composantes de l'industrie nucléaire .....	9
1.3.3. Traitement de dépollution industriel et environnemental .....	10
1.3.4. Traitements biologiques et biochimiques .....	10
1.3.4.1. Applications biomédicales .....	10
1.3.4.2. Applications biochimiques .....	10
1.4. Cadre d'étude de la séparation magnétique et travaux effectués .....	11
1.5. Objectif de notre thèse et dispositif de séparation proposé .....	14

## *Chapitre 2: Modélisation du Problème de la Séparation Magnétique dans un Liquide en Ecoulement*

2. Modélisation du problème de la séparation magnétique dans un liquide en écoulement .....	17
2.1. Modèles mathématiques régissant le problème magnétique .....	17
2.1.1. Equation du champ appliqué .....	17

2.1.2. Aimantation des particules et force magnétique appliquée .....	18
a) Particule sphérique .....	19
b) Particule ellipsoïdale .....	19
c) Particule cylindrique .....	19
2.1.3. Force magnétique appliquée par le champ sur une particule aimantée .....	19
2.1.4. Force d'interaction de type dipolaire magnétique entre les particules .....	20
2.1.5. Perméabilité magnétique équivalente d'un mélange liquide-solide .....	21
2.2. Modèles mathématiques liés au problème hydraulique .....	21
2.2.1. Equation de l'écoulement du liquide traité .....	22
2.2.1.1. Cas d'un écoulement incompressible (Equations de Navier-Stokes) .....	22
2.2.1.2. Ecoulement turbulent modèle $K-\varepsilon$ .....	23
2.2.2. Actions hydrodynamiques appliquées à une particule en mouvement .....	23
2.2.2.1. Force de flottabilité .....	24
2.2.2.2. Force de trainée .....	24
2.2.2.3. Force de portance .....	24
2.2.3. Equation modèle du problème dynamique de la particule .....	25
2.3. Modèle mathématique global .....	25

### *Chapitre 3: Simulation de la Séparation Magnétique et Approche Tridimensionnelle*

2. Simulation de la séparation magnétique et approche tridimensionnelle .....	27
2.1. Méthode de résolution .....	27
2.1.1. Résolution du problème dynamique particulière .....	27
2.1.2. Résolution des problèmes magnétique et hydraulique .....	27
2.2. Dispositif de base proposé et domaine d'étude .....	28
2.3. Hypothèses imposées et processus de résolution .....	28
1.4. Analyse des résultats obtenus .....	29
1.4.1. Distribution du champ magnétique et zone d'efficacité .....	29
1.4.2. Force magnétique et nature des différentes interactions .....	30
2.4. 2.1. Interaction entre le champ appliqué et la particule aimantée .....	30
3.4.2.2. Interaction entre les particules aimantées .....	31
• Cas de deux particules voisines alignées horizontalement .....	32
• Cas de deux particules voisines alignées verticalement .....	32

• Cas de trois particules voisines .....	33
3.4.2.3. Calcul et prise en compte de la force magnétique dans le processus de résolution .....	34
3.4.3. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal .....	35
3.4.3.1. Ecoulement laminaire .....	35
3.4.3.2. Ecoulement turbulent .....	37
3.4.4. Comportement des particules et effets des contraintes appliquées .....	38
3.4.5. Prise en compte des interactions magnétiques dipolaires DD .....	40
3.4.6. Traitement d'un liquide statique .....	42
3.4.7. Traitement d'un liquide en écoulement .....	47
3.5. Conclusion .....	53

### *Chapitre 4: Optimisation du Séparateur Proposé*

4. Optimisation du séparateur proposé .....	55
4.1. Optimisation du capteur élémentaire (électroaimant) .....	55
4.1.1. Fonction objectif et paramètres optimisés .....	56
4.1.2. Méthode de minimisation appliquée .....	57
4.1.3. Processus de minimisation et étapes suivies .....	57
4.1.4. Résultat d'optimisation .....	59
4.2. Optimisation des séparateurs magnétiques proposés .....	60
4.2.1. Optimisation d'un séparateur constitué d'une cascade de deux capteurs .....	60
4.2.1.1. Forme géométrique du séparateur et conditions d'optimisation .....	60
4.2.1.2. Résultats d'optimisation .....	60
4.2.2. Optimisation d'un séparateur destiné aux écoulements à diamètre important ....	62
4.2.2.1. Approche d'optimisation et configurations traitées .....	62
4.2.2.2. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal .....	63
4.2.2.3. Distribution de la force pour les cas traités .....	64
4.2.3. Optimisation d'un séparateur destiné au traitement d'un écoulement à vitesse très élevé dans un canal étroit .....	67
4.2.3.1. Forme du séparateur proposé .....	67
4.2.3.2. Approche d'optimisation et fonction objectif.....	68
4.2.3.3. Résultats d'optimisation .....	68

**4.3. Conclusion .....71**

***Chapitre 5: Validation Expérimentale***

**5. Validation expérimentale ..... 73**

**5.1. Identification de la perméabilité magnétique des particules utilisées ..... 73**

**5.2. Vérification des performances des séparateurs optimisés ..... 75**

**5.2.1. Banc d'essai réalisé et protocole expérimental ..... 75**

**5.2.2. Quantification du volume capturé de particules et technique utilisée ..... 77**

**5.2.3. Validation des séparateurs optimisés ..... 78**

**5.2.3.1. Séparateur à un seul capteur élémentaire ..... 78**

**5.2.3.2. Séparateur à deux capteurs en cascade série ..... 81**

**5.2.3.3. Séparateur à arrangement circulaire de capteurs ..... 83**

**a) Séparateur à un seul capteur ..... 84**

**b) Séparateur à deux capteurs ..... 85**

**c) Séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle 90° ..... 86**

**d) Séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle 120° ..... 86**

**5.3. Validation de l'approche utilisée pour la simulation du phénomène de la séparation  
..... 88**

**5.3.1. Cas d'un liquide statique ..... 88**

**5.3.2. Cas d'un liquide en mouvement ..... 90**

**5.4. Conclusion ..... 92**

**Conclusion générale ..... 94**

**Bibliographie ..... 96**

**Production personnelle ..... 102**

## *Liste des figures*

Figure 1.1. Schéma 3D du principe du séparateur proposé (ici un seul capteur est figuré) ....	14
Figure 2.1. Evolution de l'aimantation des matériaux magnétiques .....	18
Figure 2.2. Deux particules sphériques aimantées voisines .....	20
Figure 3.1. Configuration de base du séparateur proposé .....	28
Figure 3.2. Distribution de l'induction magnétique au voisinage du capteur .....	29
Figure 3.3. Variation de l'induction magnétique au niveau de la profondeur du canal. Les points de traçage existent à $x = 0$ et $y = -1.5 \times 10^{-2}$ m .....	30
Figure 3.4. Force appliquée sur une particule ferromagnétique sphérique. <i>a)</i> distribution de la force, <i>b)</i> force résultante .....	31
Figure 3.5. Force magnétique d'interaction entre deux particules voisines alignées horizontalement et situées sur l'axe central du capteur. <i>a)</i> distribution de la force dans chaque particule, <i>b)</i> force résultante appliquée sur les particules .....	32
Figure 3.6. Force magnétique d'interaction entre deux particules voisines alignées verticalement et situées sur l'axe central du capteur. <i>a)</i> distribution de la force dans chaque particule, <i>b)</i> force résultante appliquée sur les particules .....	33
Figure 3.7. Force magnétique d'interaction entre trois particules voisines situées sur l'axe central du capteur. <i>a)</i> distribution de la force dans chaque particule, <i>b)</i> force résultante appliquée sur les particules .....	34
Figure 3.8. Distribution 3D de la densité de force magnétique au voisinage du capteur .....	35
Figure 3.9. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal .....	36
Figure 3.10. Profil de la vitesse d'écoulement .....	36
Figure 3.11 Distribution de la vitesse de l'écoulement .....	37
Figure 3.12. Profil de la vitesse de l'écoulement .....	37
Figure 3.13. Trajectoires des particules situées initialement à des positions différentes. <i>a)</i> particules alignées verticalement, <i>b)</i> particules alignées horizontalement, <i>c)</i> particules alignées verticalement et horizontalement, <i>d)</i> particules positionnées aléatoirement .....	39
Figure 3.14. Trajectoires des particules pour différentes valeur de la vitesse moyenne de l'écoulement. <i>a)</i> $U_{\text{moy}} = 0.57$ m/s, <i>b)</i> $U_{\text{moy}} = 0.67$ m/s, <i>c)</i> $U_{\text{moy}} = 0.77$ m/s, <i>d)</i> $U_{\text{moy}} = 1$ m/s .	39
Figure 3.15 : Schéma synoptique de la résolution du problème couplé .....	41
Figure 3.16. Distribution initiale de la concentration des particules .....	42
Figure 3.17. Distribution de la densité de force magnétique calculée à $t = 0$ .....	43
Figure 3.18 Distribution de la densité de force obtenue à $t = 0.2406$ s .....	43

Figure 3.19. Evolution de la concentration locale des particules du dépôt final des particules dans le cas d'une concentration globale $C_g = 1.18\%$ .....	45
Figure 3.20. Champ de la densité de force magnétique à $t = 0$ .....	45
Figure 3.21. Champ de la densité de force magnétique à $t = 0.14s$ .....	46
Figure 3.22. Evolution du dépôt des particules dans le cas d'une concentration globale $C_g=2.34\%$ .....	47
Figure 3.23. Injection des particules à l'entrée du canal .....	48
Figure 3.24. Déplacement du volume injecté des particules avec l'écoulement .....	49
Figure 3.25. Evolution de la dispersion des particules ainsi que leur dépôt dynamique pour une concentration globale $C_g = 0.36\%$ .....	51
Figure 3.26. Evolution de la dispersion des particules pour un courant d'excitation $I= 10 A$ .....	52
Figure 4.1. Forme géométrique du capteur élémentaire et différents paramètres d'optimisation .....	56
Figure 4.2. Processus d'optimisation .....	58
Figure 4.3. Trajectoires obtenues par les paramètres optimisés .....	59
a) cas de particules alignées verticalement .....	59
b) cas de particules alignées horizontalement .....	59
Figure 4.4. Séparateur magnétique constitué d'une cascade de deux capteurs identiques .....	60
Figure 4.5. Distributions de la force magnétique et de la vitesse d'écoulement dans la région de séparation .....	61
a) Distribution de la force magnétique .....	61
b) Distribution de la vitesse de l'écoulement .....	61
Figure 4.6. Trajectoires des particules obtenues par le séparateur optimisé .....	62
Figure 4.7. Schéma 2D des cas traités de configurations du séparateur, a) un seul capteur, b) deux capteurs, c) trois capteurs décalés entre eux d'un angle de $90^\circ$ , d) trois capteurs décalés entre eux d'un angle de $120^\circ$ .....	63
Figure 4.8. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal plus proche des capteurs ..	63
Figure 4.9. Profil de la vitesse d'écoulement .....	64
Figure 4.10.a. Distribution de la densité de force magnétique pour le cas d'un séparateur à un seul capteur .....	64
Figure 4.10.b. Distribution de la densité de force magnétique pour le cas d'un séparateur à deux capteurs .....	64
Figure 4.10.c. Distribution de la densité de la force magnétique pour le cas d'un séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle de $90^\circ$ .....	65

Figure 4.10.d. Distribution de la densité de la force magnétique pour le cas d'un séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle de 120° .....	65
Figure 4.11. Trajectoires des particules pour les cas traités .....	66
Figure 4.12. Chambre de séparation créée .....	67
Figure 4.13. Forme géométrique du capteur de particules proposé .....	68
Figure 4.14. Conditions d'optimisation .....	68
Figure 4.15. Distribution de la densité de force magnétique dans la chambre de séparation .	69
Figure 4.16. Distribution de la vitesse de l'écoulement au niveau de la chambre de séparation .....	69
Figure 4.17. Trajectoires des particules obtenues pour le dispositif de séparation optimisé ...	70
Figure 5.1. Dispositif expérimental pour caractériser le matériau de fer des particules .....	73
Figure 5.2. Caractéristiques magnétiques du matériau utilisé. <i>a)</i> La caractéristique $B = f(H)$ , <i>b)</i> La caractéristique $\mu = f(H)$ .....	74
Figure 5.3. Banc d'essai expérimental réalisé .....	76
Figure 5.4. Capteur élémentaire, le bobinage est formé d'un fil de cuivre de section $1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ .....	76
Figure 5.5. Canaux transparents en verre de différents diamètres .....	77
Figure 5.6. Dispositif de mesure réalisé, <i>a)</i> Teslamètre et éléments associés (aimant permanent et sonde à effet Hall), <i>b)</i> Mesure du champ en présence du dépôt des particules séparées .....	77
Figure 5.7. Mesure de l'induction magnétique. <i>a)</i> Montage de mesure, <i>b)</i> Lieux des points de comparaison entre les résultats de calcul et de mesure .....	78
Figure 5.8. Variation de la composante $B_y$ de l'induction magnétique le long d'une droite située sur la surface inférieure du capteur .....	79
Figure 5.9. Evolution du dépôt des particules séparée dans le temps .....	80
Figure 5.10. Dépôt final des particules après l'arrêt de l'écoulement .....	81
Figure 5.11. Evolution du dépôt des particules séparées .....	82
Figure 5.12. Configurations réalisées du séparateur. <i>a)</i> un seul capteur, <i>b)</i> deux capteurs, <i>c)</i> trois capteur décalés de 90° entre eux .....	84
Figure 5.13. Evolution du dépôt des particules séparées .....	85
Figure 5.14. Evolution du dépôt des particules séparées .....	85
Figure 5.15. Evolution du dépôt des particules séparées .....	86
Figure 5.16. Evolution du dépôt des particules séparées .....	87
Figure 5.17. Dispositif expérimental réalisé .....	88

Figure 5.18. Agglomération transitoire des particules lors du processus de séparation ..... 90

Figure 5.19. Agglomération transitoire des particules lors du processus de séparation ..... 92

**Liste des tableaux**

Tableau 3.1. Données géométrique et physique de l'électroaimant et de l'écoulement considérés .....	38
Tableau 4.1. Données géométriques et physique de la particule et de l'écoulement .....	55
Tableau 4.2. Les résultats d'optimisation obtenus .....	59
Tableau 4.3. Les résultats des paramètres recherchés .....	61
Tableau 4.4. Temps de séparation totale liée aux configurations traitées .....	67
Tableau 4.5. Données géométriques et physique du séparateur et de l'écoulement .....	70
Tableau 4.6. Les résultats des paramètres optimisés obtenus .....	70
Tableau 5.1. Paramètres géométriques et physiques du transformateur utilisé .....	73
Tableau 5.2. Valeurs mesurées de l'induction et efficacité de capture .....	81
Tableau 5.3. Valeurs d'induction mesurées et taux de capture obtenu .....	83
Tableau 5.4. Taux de séparation pour les configurations traitées du séparateur .....	87

## **Introduction Générale**

Dans le domaine industriel, la continuité de la production et la qualité du produit sont deux facteurs déterminant pour la rentabilité de tout investissement. La recherche d'une meilleure rentabilité d'un processus industriel doit être accompagnée par le respect des réglementations concernant la préservation de la pureté de l'environnement ainsi que la santé humaine. En ce qui concerne la continuité de la chaîne de production, on veille toujours à ce que le mécanisme industriel fonctionne dans de bonnes conditions. Pour les machines d'entraînement par exemple, il faut que les parties fonctionnelles restent en bonne état. Lorsque les paramètres de refroidissement ou de lubrification de ces parties sont contaminés par des particules métalliques solides, il y aura dégradation des surfaces en contact ce qui peut conduire à des pannes provoquant l'arrêt momentané ou durable de la production ou même la distraction de la machine. En ce qui concerne la qualité des produits, il s'agit du respect des normes d'hygiène et de pureté. L'existence des particules métalliques dans les produits alimentaires peut causer des maladies très graves aux consommateurs. D'autre part, l'existence de ces particules dans la matière de fabrication des produits cosmétiques, de la peinture ou du papier par exemple peut conduire à la perte de l'éclat du produit et donc à des pertes économiques.

Du côté environnement, l'existence des particules métalliques très fines dans les déchets industriels solide, liquide ou gazeux peut causer des catastrophes biologiques qui peuvent conduire à la destruction de la nature, la contamination des sources d'eau et la pollution de l'air.

Pour traiter le problème d'existence de ces particules, des dispositifs d'extraction fiables peuvent être installés au niveau des sites industriels. Parmi les techniques d'extraction utilisées, on trouve le tamisage, la précipitation, la floculation, la sédimentation, la séparation inertielle (cyclonique et centrifugeuses) et séparateur électriques. A l'exception de la séparation électrique, ces techniques ont l'inconvénient de toucher à l'intégrité de la structure du matériau traité. Comme alternative, une séparation basée sur l'application d'un champ magnétique qui agit d'une manière sélective sur les composants du matériau traité peut être efficacement utilisée. C'est dans le but de contribuer à l'amélioration de cette technique et élargir son utilisation que le projet de cette thèse a été proposé. L'objectif est la réalisation d'un prototype de séparation magnétique capable d'extraire des particules de fer de taille fine d'un liquide (eau) en écoulement dans une conduite cylindrique fermée.

La réalisation d'un séparateur magnétique nécessite au préalable l'étude du problème de la séparation lié au dispositif proposé ce qui permet la maîtrise des phénomènes en présence ainsi que l'identification des différents paramètres influant sur l'efficacité de la technique. De tels paramètres peuvent être considérés comme clés d'optimisation du séparateur ce qui permet l'amélioration de ses performances. Avant de réaliser le prototype final, une validation expérimentale doit être achevée.

Dans ce travail de thèse, une technique de séparation par application d'un champ magnétique statique à gradient ouvert a été proposée pour extraire des particules de fer de taille fine (micrométrique) d'un écoulement d'eau dans un canal fermé. Il s'agit d'une application en voie humide où trois phénomènes interfèrent, magnétique (lié au champ appliqué et aimantation des particules), hydraulique (lié à l'écoulement et les actions hydrodynamiques appliqué aux particules) et dynamique particulaire (lié au mouvement des particules).

Pour mener à bien ce travail, nous avons suivi plusieurs étapes d'étude. Dans une première étape, nous avons élaboré les modèles mathématiques qui régissent les phénomènes en présence. Il s'agit des équations du champ magnétique, de l'équation de l'écoulement, de l'équation dynamique des particules et des lois qui permettent l'introduction des actions magnétiques et hydrodynamiques appliquées.

Dans une deuxième étape, nous avons développé les différents codes de calcul qui permettent la mise en œuvre des modèles développés et la simulation du problème de la séparation. Il s'agit en fait de l'exploitation du logiciel Comsol multiphysics en associations avec des programmes développés sous Matlab. Ces programmes basés sur le couplage des méthodes numériques éléments finis 3D (EF) et Range-Kutta d'ordre 4 (RK4) permettent l'exploitation des cartographies du champ magnétique et de la vitesse d'écoulement calculées dans la région de séparation pour calculer les grandeurs physiques permettant le couplage des phénomènes précités.

L'analyse des résultats de simulation du comportement d'une dispersion aléatoire des particules, a permis l'identification des paramètres influant sur les performances de la séparation, courant d'excitation, taille des capteurs et vitesse d'écoulement. De telle identification a permis de procéder par la suite à l'optimisation du séparateur proposé.

Dans une première étape, nous avons optimisé le capteur élémentaire. Il s'agit de la recherche de sa taille (hauteur et largeur externe du bobinage) et du courant d'excitation qui permettent de réaliser une séparation efficace pour un écoulement à vitesse réduite. Ensuite, une optimisation globale du séparateur a été effectuée. Nous avons recherché le nombre de

capteurs et leur positionnement qui permettent une séparation efficace dans un écoulement à vitesse élevée dans un canal à diamètre relativement large. Pour l'optimisation du capteur élémentaire, nous avons minimisé une fonction objectif qui est la distance entre le point central de la base du capteur et le point de capture d'une particule initialement situé à une position choisie d'une manière pour tenir compte des spécifications du champ magnétique appliqué et de la distribution de la vitesse d'écoulement. Pour cela, la méthode de recherche de Tabou a été utilisée.

L'optimisation globale du séparateur a été basée sur une étude comparative entre les performances de plusieurs configurations du séparateur, cas d'un seul capteur, deux capteurs et trois capteurs. Pour vérifier les résultats d'optimisation ainsi que les performances du séparateur optimisé, nous avons réalisé un banc d'essai où l'écoulement est réalisé par un système de pompage. Pour obtenir une suspension des particules dans l'écoulement, les particules sont injectées juste à l'entrée du canal à travers un orifice.

La validation expérimentale a été basée sur une vérification qualitative basée sur le contrôle par caméra du mouvement des particules et de l'évolution de leur dépôt après séparation et une vérification quantitative basée sur la mesure du volume des particules séparées. Les essais effectués ont montré que le cas de trois capteurs identiques décalés entre eux d'un angle  $120^\circ$  donne les meilleures performances pour les conditions d'application adoptées.

Le mémoire de notre thèse s'organise autour de cinq chapitres. Le premier chapitre concerne un état de l'art sur la séparation magnétique, le principe, les différentes applications, les différents types de séparateurs et l'évolution de la recherche dans le domaine.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les modèles mathématiques qui régissent les phénomènes en présences et les lois qui approchent les effets des différentes actions magnétiques et hydrodynamiques appliquées aux particules.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la méthode de résolution appliquée et les résultats de simulation du problème de la séparation étudié. Nous présentons l'approche numérique 3D adaptée pour prendre en compte l'effet de l'interaction magnétique entre les particules et leurs agglomérations locales. Nous présentons les trajectoires des particules qui permettent la vérification de la capacité des codes de calcul développés à mettre en œuvre les modèles développés et la capacité de ces dernières à représenter correctement l'évolution des phénomènes en présences.

Le quatrième chapitre fait l'objet d'une présentation des étapes de l'optimisation effectuée. Une première partie concerne l'optimisation du capteur élémentaire et une seconde partie concerne l'optimisation globale du séparateur. On y présente les approches d'optimisation appliquées et les résultats obtenus.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous présentons le banc d'essai réalisé, le protocole expérimental et les essais effectués. On expose la méthode expérimentale d'identification de la perméabilité magnétique des particules, la technique de vérification des performances du séparateur optimisé, contrôle de l'évolution du dépôt des particules séparées et la mesure du volume capturé. Il s'agit des résultats qui concerne l'identification de la perméabilité magnétique des particules et la vérification des performances du séparateur optimisé.

# **Chapitre 1**

## **Etat de l'art sur la séparation magnétique.**

## 1. Etat de l'art sur la séparation magnétique

La séparation magnétique est une application industrielle de l'induction électromagnétique dont le principe est basé sur la force d'interaction entre le champ appliqué et les particules à séparer. Selon la nature des particules la force peut être attractive (cas de particules ferro et para magnétiques) ou répulsive (cas de particules diamagnétiques et conductrices) [Qing-tao 10], [Maraspin 04], [Ikezoe 02], [Zhenming Xu 11]. Pour séparer des particules magnétiques d'un milieu non magnétique, un champ statique peut être utilisé. Ce dernier peut être généré par des aimants permanents ou par des inducteurs excités en continu. Pour séparer des particules conductrices un champ dynamique doit être appliqué. De tel champ peut être généré par un courant variable dans le temps (sinusoïdal) ou une source continu en mouvement (exemple : tambour à aimants permanents) [Zhang 99], [Lungu 01], [Braam 88].

L'efficacité de la séparation dépend fortement du champ magnétique appliqué, de la granulométrie des particules et leurs propriétés physiques (perméabilité magnétique et conductivité électrique) et des spécifications du milieu traité (poudre, gaz, liquide statique ou en écoulement) [Oda 87], [Svoboda 04], [Bureau 93] [Gillet 88].

### 1.1. Historique sur l'évolution des techniques de la séparation magnétique

Les aimants étaient connus depuis le 6<sup>ème</sup> siècle dans plusieurs applications physiques. Leur utilisation dans l'attraction magnétique n'a été apparue qu'à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle lorsque, en 1792, Wiliam Fullarton a obtenu un brevet pour son application de séparation d'un minerai de fer type magnétite [Gillet 03], [Svoboda 04]. Depuis ce temps, les techniques de séparation magnétique ont progressé rapidement. En 1847, Wall met au point un séparateur à aimant permanent et qui devient utilisable industriellement quelques années plus tard en Italie [Gillet 03]. Dans l'année 1895, Wetherill a conçu un séparateur magnétique capable de séparer les déchets des métaux en deux composants, magnétique et non-magnétique qui était une innovation de proportions importantes [Svoboda 04], [Mariani 09].

Deux années plus tard, il fut la première apparition du séparateur à haute intensité en voie humide et la première application industrielle à haute intensité en voie sèche fut mise en exploitation en 1908 [Gillet 03].

Dans le début du 20<sup>ème</sup> siècle, l'évolution de la technique de séparation en voie humide a été relativement lente et la plupart des efforts ont été orientés vers les séparateurs à haute intensité en voie sèche. Il a fallu attendre l'année 1970 pour voir un séparateur industriel en voie humide, travaillant en fort tonnage (120 t/h), installé sur un site minier au Brésil, et ce fut le point de départ de développement de cette technique et qui reste encore très prometteuse,

selon les recherches actuelles [Gillet 03]. Dans cette période, la séparation magnétique haute intensité en voie humide Jones à carrousel (marche continu) est commercialisée par *Humboldt* et qui va lui permettre de s'imposer dans le domaine de la valorisation industrielle des minerais et d'entrer en concurrence avec la valorisation par « *froth flotation* », pour les minerais à faible susceptibilité magnétique [Gillet 88], [Svoboda 04].

Cette technique évolue rapidement, mais elle a présenté des limites pour le traitement des minerais de faibles granulométrie (inférieure à 10 microns) et/ou de faible susceptibilité magnétique (inférieure à  $0.5 \times 10^{-6}$  SI) [Gillet 03], [Svoboda 04].

Parmi les techniques de séparation magnétique aussi découvertes durant ce siècle (20<sup>ème</sup> siècle) la séparation magnétique haut gradient de champ (SMHG) et la séparation magnétique à supraconducteurs. En 1937, Frantz a développé un séparateur magnétique constitué d'un solénoïde emballés avec des rubans d'acier ferromagnétique qui génère un champ magnétique capable de séparer des matériaux faiblement magnétiques et même des minéraux diamagnétiques de taille micromètre. En 1962, les aimants supraconducteurs sont devenu disponible dans le domaine commercial et après, ils ont réservé une place importante dans l'industrie notamment dans la fabrication de peintures, de papier et même de cosmétiques. L'avantage principal des aimants supraconducteurs est, par conséquent, la consommation d'énergie réduite et la possibilité de générer une force magnétique élevée en grands volumes [Mariani 09], [Svoboda 04].

Actuellement, il existe plusieurs fermes qui conçoivent, développent et commercialisent les séparateurs magnétiques pour l'utilisation en voie sèche ou humide (ex. *Raoul lenoir, Eriez, metsominerals...etc.*).

## **1.2. Classification des séparateurs magnétiques**

Les séparateurs magnétiques peuvent être regroupés en catégories selon le type d'application ou selon la nature et la valeur du champ appliqué [Bureau 93], [Gillet 04].

### **1.2.1. Classification selon le type d'application**

Contrairement aux méthodes de séparation classique tamisage, sédimentation et techniques inertielle, la séparation magnétique présente l'avantage d'être appliquée aux matériaux gazeux, liquide et solide. Généralement, on distingue deux types d'application, voie sèche et voie humide.

Pour la séparation en voie sèche, il s'agit de l'extraction des particules de nature magnétique d'un milieu non magnétique solide granulaire. On trouve par exemple, la purification des

produits alimentaires, médicaux et industriels en poudre, et le traitement des minerais et des déchets industriels solides [Svoboda 04], [Safarikova 00], [Gillet 04].

En ce qui concerne les applications en voie humide, il s'agit de l'extraction des particules à partir des milieux liquides statiques ou dynamiques (écoulement) [Pasteur 14], [Hayashi 11]. Il s'agit par exemple de la purification des produits alimentaires en phase aqueuse (farine alimentaire animale), traitement des eaux usées contenant des déchets industriels particuliers métalliques, purification des liquides (eaux, huiles) de refroidissement et de lubrification des machines, ..).

### **1.2.2. Classification selon la nature du champ**

Pour produire un champ magnétique statique capable de séparer des particules magnétiques, on utilise des aimants permanents ou des inducteurs excités en courant continu [Sharma 15], [Lungu 09], [Svoboda 04], [Gillet 03]. L'utilisation des inducteurs à bobinage conventionnel (cuivre) ne permet pas de générer des champs très forts à cause des pertes par effet Joule. Pour cela, et afin de concentrer le champ dans les endroits d'intérêt (région où la séparation se produit) des noyaux de fer peuvent être insérés. Pour des applications qui nécessitent des champs très forts à large espace de distribution (champ à gradient ouvert), des inducteurs à bobinages supraconducteurs peuvent être utilisés [Mishima 07], [Nishimura 09], [Kim 15].

### **1.2.3. Classification selon la valeur du champ**

La séparation des particules magnétiques est basée sur l'application d'une force magnétique qui dépend directement de l'aimantation des particules et du gradient du champ. Pour permettre la séparation des particules ferromagnétiques de taille importante, un champ magnétique à basse intensité peut être efficacement utilisé. Il s'agit donc d'une séparation à basse intensité de champ (SMBI) [Gillet 03].

Dans le cas de particules conductrices, la séparation est basée sur l'application de la force de Lorentz qui dépend du champ appliqué et de la densité des courants induits. Pour générer des courants induits importants dans des particules de petites tailles, des champs magnétiques très intenses doivent être appliqués. Il s'agit ainsi d'une séparation à haute intensité de champ (SMHI) [Gillet 03].

Pour séparer des particules dia et paramagnétiques de taille très fines, il faut des forces magnétiques très intenses. Pour cela, on doit avoir à la fois une aimantation très forte des particules et un gradient de champ très élevé. Dans ce cas la séparation est qualifiée de haute intensité et haut gradient (SMHG) [Gillet 04], [Bureau 93]. Pour générer des champs à haut gradient, principalement dans les applications en voie humide des matrices d'extraction sous

forme de laine de fer ou de grillage fortement aimanté sont utilisées. Le séparateur est ainsi dit séparateur à matrice d'extraction [Gillet 03], [Pasteur 14].

Dans des applications très spécifiques (traitement des liquides en écoulement dans des conduites), l'utilisation des matrices d'extraction n'est plus possible. Pour cela, la source du champ appliqué peut être lui-même le capteur de particules. Du fait qu'il n'y a pas de fermeture du champ, il s'agit ainsi de séparation par champ à gradient ouvert (OGMS) [Fukui 04], [Takahashi 05].

### **1.3. Différents débouchés de la séparation magnétique**

La séparation magnétique est utilisée dans plusieurs domaines scientifiques et industriels. On trouve principalement :

#### **1.3.1. Traitement minéralurgique**

Dans le domaine minier, la séparation magnétique est utilisée pour traiter les teneurs faibles et dispersées dans les gisements exploités, et cela, pour garantir la pureté et la richesse des concentrés exigées par les industriels utilisateurs [Svoboda 04], [Mehasni 07].

La technologie HGMS était parmi les meilleures techniques réussies dans le domaine de la purification de l'argile de kaolin car elle est capable et très efficace d'éliminer les matières minérales ferrugineuses tels que les oxydes de fer et de rutile ceux qui délétères la luminosité de l'argile de kaolin [Bureau 93], [Winters 90].

En suède, la séparation HGMS est utilisée pour séparer les impuretés d'oxyde de fer du calcaire concentré de flottation. La qualité du concentré non magnétique permet d'évoluer quelques applications industriels notamment les applications de remplissage de papier et le pigment [Wang 96].

Outre ces applications, les séparateurs magnétiques peuvent épurer des substances non métalliques telles que le talc, les phosphates et des minéraux industriels comme par exemple le sable pour la fabrication de verre et de céramique [Mehasni 07], [Svoboda 04].

#### **1.3.2. Traitement des composantes de l'industrie nucléaire**

Dans l'industrie nucléaire, la HGMS fonctionnant à 1,5 T est utilisée comme méthode alternative pour retirer et éliminer des produits de fission insoluble qui se posent à différents stades dans le retraitement de combustibles nucléaires [Williams 81].

Toujours dans ce domaine, Harding et Baxter ont montré que le fer de forme d'hydroxyde ferrique floccs et les radionucléides peuvent être éliminés à l'aide d'une séparation HGMS avec une efficacité de 93 % à 94 % [Harding 81].

### 1.3.3. Traitement de dépollution industriel et environnemental

La séparation magnétique joue un rôle important dans les opérations de traitement de dépollution industriel et de la protection d'environnement. Dans ce contexte, on résume quelques procédés d'épurations utilisées par cette technique [Svoboda 04] :

- Filtrages des fluides dans les centrales thermiques ou nucléaires de production de l'énergie électrique en extrayant les produits particuliers corrosifs.
- Recyclage des déchets industriels et municipaux par extraction des conducteurs non ferreux des milieux isolants.
- L'élimination des sulfures des charbons pulvérulents destinés aux centrales thermiques ou électriques.
- La concentration de minéraux comme des ultrafines de Fe, Mo, W, terres rares ou de résidus métalliques pour le recyclage
- L'épuration de sol, des eaux de rejet industriel et des eaux usées d'origine domestique ainsi qu'utiliser les procédés de la filtration magnétique de solide en suspension et la filtration magnétique par ensemencement de magnétite [Tsuge 87].

### 1.3.4. Traitements biologiques et biochimiques

L'évolution des procédés de séparation magnétique permet d'exploiter les techniques de cette dernière dans des domaines plus sensibles notamment le domaine médical.

#### 1.3.4.1. Applications biomédicales

Dans les applications biomédicales, la séparation magnétique est généralement utilisée pour séparer, analyser et diagnostiquer les cellules ou des biomolécules, tels que les anticorps, les molécules d'ADN, des protéines, des hormones ou d'antigènes [Safarikova 00]. Aussi, des recherches biomédicales et cliniques ont été effectuées sur les Ferro-fluides en liaison avec la manipulation des médicaments, des virus et des tumeurs [Svoboda 04].

#### 1.3.4.2. Applications biochimiques

Des bactéries telle que *Aquaspirilla magneto tacticum* synthétisent et transportent de petits cristaux de magnétite à cause de leurs natures magnétotactiques. Elles pourraient être employées pour l'épuration de fluides ou de boues contaminées en fer, parce qu'elles sont sensibles à l'application d'un champ magnétique. Enfin, la concentration, par des microorganismes, de métaux paramagnétiques sous forme solubles ou particulière, est une

application biochimique étudiée en laboratoire qui pourrait permettre d'épurer des effluents liquides pollués [Svoboda 04].

Il y a aussi des bactéries comme *Bacillus subtilus* ou *Candida utilis* ont permis de fixer des phosphates métalliques, dans leur paroi externe, en processus aérobie. Une fois la fixation achevée, les bactéries sont passées dans une matrice poreuse magnétisée [Mehasni 07], [Svoboda 04].

#### **1.4. Cadre d'étude de la séparation magnétique et travaux effectués**

L'étude du problème de la séparation magnétique a pour objectif principal la généralisation de son application et l'amélioration de ses performances. De telle étude peut concerner l'élaboration et l'enrichissement des modèles mathématiques régissant l'évolution des phénomènes en présences, le développement des différentes approches analytiques et numériques qui simulent le comportement particulière, le développement des outils de calcul qui permettent la prise en charge des complexités géométriques et des non linéarités des différents milieux, l'optimisation des dispositifs déjà mis en place, la conception de nouveau prototypes et la réalisation des produits finaux.

C'est dans ce cadre qu'on trouve dans [Corrans 85] une des premières études récentes sur les différentes utilisations des séparateurs magnétiques dans les installations de transformation minérales en Afrique du Sud (*Magnetic Separation in South Africa*). Ils ont effectué une étude sur l'utilisation des séparateurs SMHG et SMHI dans la récupération de l'or, de l'uranium et des minéraux phosphatés. Dans [Nunez 99], les auteurs ont proposé une approche pluridisciplinaire pour l'utilisation des techniques physiques et chimiques pour identifier les constituants magnétiques et les radionucléides dans les flux de déchets. Leur projet a compris l'étude systématique des interactions magnétiques des constituants des déchets dans des conditions physiques et chimiques contrôlées (par exemple, l'hydratation, l'oxydation, température) pour identifier les mécanismes qui contrôlent les propriétés magnétiques. Ils ont également étudié la répartition des radionucléides pour déterminer leurs mécanismes de sorption. Ils ont utilisé la séparation magnétique supraconducteur à gradient ouverte comme une technique de prétraitement pour radioactifs.

En 2001, Svarovski [Svarovski 01] a mis à jour dans son livre les principes et les pratiques industrielles de la séparation solide-liquide et de la technologie de lavage. Une attention particulière a été accordée au matériel et à son évaluation, l'application et la sélection. Bien qu'il soit concerné exclusivement avec la filtration et la sédimentation, ses opérations ont été traitées en profondeur. Des variations importantes dans l'équipement disponible ont été

abordées tout au long du livre en mettant l'accent sur les concepts de base de l'ingénierie, la sélection et l'évaluation des équipements, des solides de lavage, les méthodes de prétraitement, des adjuvants de filtration et d'autres aspects pratiques de la séparation mécanique. Dans [Ikezoe 02], deux techniques de séparation ont été effectuées pour récupérer des particules et des substances solides ayant une susceptibilité magnétique faible, technique de lévitation diamagnétique conventionnelle et la technique magnéto-Archimède.

Une expérience a été faite avec deux aimants différents compacts supraconducteurs avec le champ maximum de 10 et 12T. En ce temps, une étude sur un ensemble des systèmes magnétiques des séparateurs à haut gradient (HGMS) lesquels utilisés dans les applications biologiques a été effectuée [Hatch 01]. Les auteurs ont parlé de la conception des dispositifs de séparation, les paramètres magnétiques et les divers types d'aimants utilisés.

En 2003, G. Gillet a fait une étude sur la théorie et la modélisation des différentes techniques de séparation magnétique, leur principe de fonctionnement, leur circuit magnétique, et leurs applications industriels [Gillet 03], [Gillet 04]. Une autre étude a été faite par P. Beharrell sur la nouvelle technologie de séparation magnétique supraconductrice dans les différents domaines de l'industrie où il a exposé ses avantages dans le développement des techniques de séparation [Beharrell 04].

Dans [Svoboda 04], l'auteur a exposé les changements qui se sont produits au cours des deux décennies passées dans la compréhension théorique et la mise en œuvre pratique des techniques magnétiques dans le traitement des matériaux. Il a parlé du développement de séparateurs magnétiques basés sur de puissants matériaux magnétiques permanents, la construction de séparateurs supraconducteurs fiables, conception efficace de séparateurs à courant de Foucault et la mise en œuvre industrielle de supports magnétiques et les fluides magnétiques. Il a reflété les tendances technologiques actuelles et repositionne la recherche, le développement et la pratique de méthodes magnétiques de traitement de matériaux dans des domaines tels que les valorisations minérales, le recyclage, le traitement des déchets et des applications biomédicales et cliniques.

Dans [Tarleton 06], l'auteur a présenté un aperçu descriptif des types d'équipements génériques et les principales solutions de rechange disponibles à l'ingénieur de conception. Il a mis en évidence les avantages et les inconvénients de l'équipement lesquels utilisés dans la séparation et la concentration des suspensions.

Dans [Mehasni 07], l'auteur a présenté une contribution dans l'étude de la séparation magnétique. Il s'agit de l'étude d'un procédé de séparation magnétique par champ à gradient ouvert OGMS en voie humide (traitement d'un liquide visqueux composé de l'eau et de la

farine alimentaire en phase aqueuse). Une approche numérique bidimensionnelle (2D) basée sur le couplage des phénomènes magnétique, hydraulique et dynamique particulaire pour simuler le problème de la séparation a été développée. De telle approche ait comme objectif la prise en compte des effets de l'interaction magnétique dipolaire et les agglomérations des particules lors de leur mouvement. En se limitant à un écoulement à surface libre du milieu traité, un prototype de séparateur magnétique à champ à gradient ouvert a été conçu. L'optimisation de ce dernier a permis la réalisation d'un banc d'essai expérimental par lequel les résultats obtenus ont été validés.

Une technique de séparation basée sur la préparation des billes d'alginate encapsulant des nanoparticules magnétiques et du charbon actif a été élaborée pour extraire des polluants [Rocher 08]. La formulation et la caractérisation des billes magnétiques est le point essentiel de ce travail. Différentes formulations ont été testées en modifiant les quantités de matériaux précurseurs ainsi que le mode de réticulation de l'alginate. Les capacités d'adsorption des billes vis-à-vis de deux colorants utilisés comme modèles de polluant organique, le bleu de méthylène et le méthyl orange, ont été étudiées. La modélisation des isothermes d'adsorption a permis également de comprendre les mécanismes mis en jeu. Les cinétiques d'adsorption ont également été étudiées et modélisées.

Une étude sur la séparation SMHG pour un processus de traitement des eaux usées industrielles qui tient compte d'un prétraitement physico-chimique assistée pour l'élimination des métaux lourds par le lié par adsorption avec de la matière particulaire ajoutée d'oxyde de fer (hématite) a été réalisé [Mariani 09]. Le filtre considéré est constitué de la laine ferromagnétique d'acier inoxydable et des aimants permanents. Une nouvelle approche basée sur une analyse statistique qui exige l'étude des trajectoires des particules a été développée et appliquée. Une validation expérimentale a été effectuée sur un dispositif de laboratoire afin de tester le modèle.

Une étude de modélisation d'un séparateur magnétique basse intensité à tambour a été effectué par le groupe Rio Tinto, Fer et Titane [Bertrand 10]. L'objectif est le développement des outils et des relations pour modéliser un procédé d'enrichissement du minerai du Havre-Saint-Pierre. Dans ce procédé le minéral d'hémo-ilménite en le grillant est magnétisé dans des fours rotatifs et en l'enrichissant par des séparateurs à tambours rotatifs magnétiques. Des essais ont été effectués sur un tambour magnétique rotatif pilote pour modéliser le procédé de séparation. Les deux équations modèles ont été implantées à un simulateur d'usine présentant un bon potentiel comme outil d'optimisation et de développement de nouvelles configurations du procédé.

Dans le travail effectué par Ghasemlouy [Ghasemlouy 11], il présente deux nouveaux microsystèmes magnétiques pour la manipulation des billes magnétiques dans des microcanaux. Le premier système est conçu pour la validation des essais spécifiques, en particulier des tests d'agglutination sur puce pour la détection d'analytes rare. Dans ce système, la force magnétique est fournie par des micropointes magnétiques et cela pour la manipulation des billes. Dans le deuxième système, il a développé une focalisation magnéto-microfluidique tridimensionnelle des billes magnétique. Les billes magnétiques sont libérées à partir d'un amas dense dans une seule ligne de courant avec un espacement longitudinal entre elles. La formation d'un amas est induite par un fort gradient de champ magnétique généré au flanc d'un microcanal par une pointe magnétique reliée à un électroaimant.

Dans [Hournkumnuard 11], l'auteur a étudié la dynamique de concentration des nanoparticules faiblement magnétiques dispersées dans un milieu fluide au cours du processus de séparation magnétique à haut gradient par l'utilisation d'une approche de calcul. Des algorithmes parallèles sont mises en œuvre pour les simulations de cette dynamique de concentration.

### 1.5. Objectif de notre thèse et dispositif de séparation proposé

Notre travail présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique. L'objectif est la mise en place d'un séparateur magnétique capable d'extraire des particules de fer de taille fine d'un écoulement d'eau dans un canal cylindrique fermé. Pour permettre cette séparation, un prototype basé sur l'installation d'un ensemble de capteurs (électroaimant) sur le périmètre du canal a été proposé. Le choix du nombre de capteur dépendra essentiellement du diamètre du canal. Le capteur est un bobinage conventionnel en cuivre de forme rectangulaire (voir Fig. 1.1).

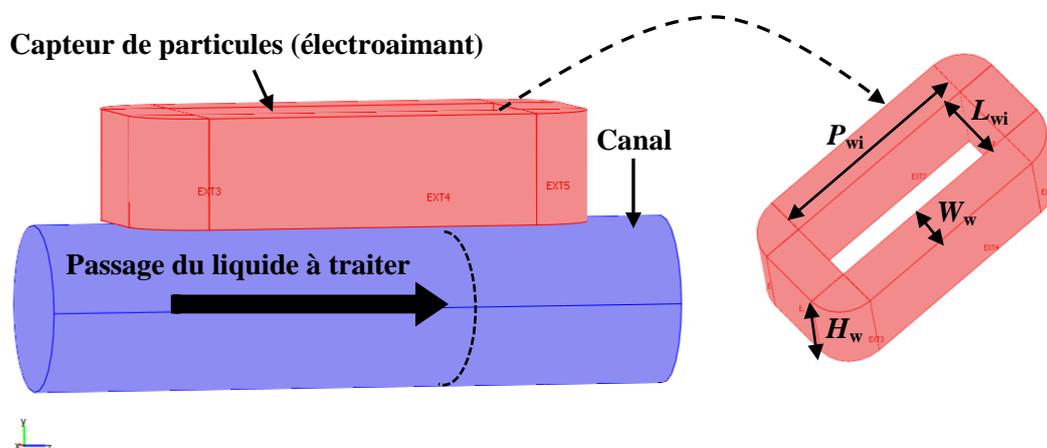


Figure 1.1 : Schéma 3D du principe du séparateur proposé (ici un seul capteur est figuré).

Pour mener à bien notre travail, nous procédons à :

- Etude des phénomènes magnétique, hydraulique et dynamique particulière en présence,
- Le développement des modèles mathématiques capables de prendre en compte leur évolution aléatoire et complexe,
- Le développement des outils de calcul numérique capables de prendre en compte les complexités géométriques et le couplage fort des phénomènes précités,
- La conception et l'optimisation de prototypes,
- La réalisation d'un prototype final, la validation des résultats et la vérification des performances du prototype.

## **Chapitre 2**

# **Modélisation du problème de la séparation magnétique dans un liquide en écoulement**

## 2. Modélisation du problème de la séparation magnétique dans un liquide en écoulement

La modélisation est l'approche mathématique de tout problème physique. Il s'agit des équations mathématiques qui traduisent avec toute exactitude l'évolution des phénomènes en présence. Dans ce travail, on traite un problème de séparation magnétique en voie humide qui présente trois phénomènes fortement couplés, magnétique, hydraulique et dynamique particulaire. En ce qui concerne le phénomène magnétique, il s'agit du champ magnétique appliqué et des contraintes d'origine magnétique exercées sur les particules à séparer. Pour le problème hydraulique, il s'agit du régime d'écoulement du liquide traité et des contraintes hydrodynamiques appliquées aux particules en mouvement. Pour le problème dynamique particulaire, il s'agit du comportement d'une dispersion aléatoire de particules qui finit par leur capture ou leur fuite avec le liquide traité. L'étude de tel comportement peut être ramenée au calcul du mouvement des particules.

### 2.1. Modèles mathématiques régissant le problème magnétique

#### 2.1.1. Equation du champ appliqué

L'objectif de la séparation en étude est l'extraction des particules ferromagnétiques d'un milieu non magnétique. Pour cela, un champ magnétique statique généré par des électroaimants excités en continu a été utilisé. Du fait que tout problème électromagnétique est régi par le système d'équations de Maxwell, la première approche mathématique de notre problème magnétique est représentée par le système d'équations suivant [Lohrengel 14], [Katrib 11], [Le Floch 02].

$$\begin{cases} \overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J}_{ex} \\ \overrightarrow{div} \vec{B} = 0 \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases} \quad (2.1)$$

Ici  $\vec{H}$  est le champ magnétique,  $\vec{J}_{ex}$  est la densité de courant d'excitation,  $\vec{B}$  est l'induction magnétique et  $\mu$  est la perméabilité magnétique.

A partir de la relation de la conservation du flux magnétique  $\overrightarrow{div} \vec{B} = 0$ , on peut définir une fonction potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  tel que ;

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} = \vec{B} \quad (2.2)$$

La combinaison des équations du système (2.1) avec la prise en compte de l'équation (2.2) permet d'aboutir à l'équation aux dérivées partielles suivante [Aubertin 11] :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_{ex} \quad (2.3)$$

Dans le cas réel 3D, en cartésien, le vecteur  $\vec{A}$  possède trois composantes  $A_x$ ,  $A_y$  et  $A_z$ .

Généralement, on fixe la divergence de  $\vec{A}$ , en imposant la condition de Jauge  $div \vec{A} = 0$ , ce qui permet de simplifier l'équation (2.3).

Pour résoudre (2.3), et afin d'aboutir à une solution unique, on impose des conditions aux limites qui peuvent être du type Dirichlet, Newman ou mixte [Le Floch 02], [Lohrengel 14], [Mehasni 07].

### 2.1.2. Aimantation des particules et force magnétique appliquée

Toute particule de nature magnétique plongée dans un champ magnétique acquiert une aimantation qui dépend fortement de sa susceptibilité magnétique et de sa forme géométrique.

Si on considère un champ d'intensité  $\vec{H}_0$ , son aimantation  $\vec{M}$  est exprimée par [Svoboda 04], [Magnet 13] :

$$\vec{M} = \chi \vec{H}_0 \quad (2.4)$$

La susceptibilité magnétique  $\chi$  est  $\chi = \mu_r - 1$ .

Pour une particule ferromagnétique, la relation (2.4) n'est pas linéaire. L'évolution qualitative de l'aimantation en fonction du champ appliqué pour des particules ferro, dia et paramagnétique est montrée dans la figure suivante [Heyrendt 12], [Buzid 09].

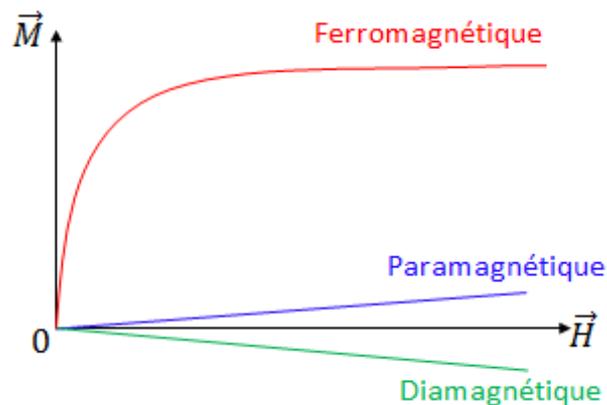


Figure 2.1 : Evolution de l'aimantation des matériaux magnétiques.

Les expressions analytiques liant l'aimantation d'une particule au champ appliqué pour différentes formes géométriques sont présentées ci-dessous [Mehasni 07].

**a) Particule sphérique**

Pour une particule sphérique placée dans un champ magnétique uniforme  $\vec{H}$ , l'aimantation est donnée par [Sihvola 92], [Moon 94].

$$\vec{M} = \frac{3\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+2)} \vec{H} \quad (2.5)$$

Ici  $\mu_r$  est la perméabilité relative de la particule.

**b) Particule ellipsoïdale**

Pour une particule ellipsoïdale placée dans un champ magnétique uniforme, ayant les longueurs demi axes  $a$ ,  $b$  et  $c$  parallèles aux axes respectivement  $x$ ,  $y$  et  $z$ , l'aimantation est donnée par [Moon 94].

$$\vec{M} = \frac{\chi}{\mu_0} \left( \frac{B_x}{1+\chi n_1}, \frac{B_y}{1+\chi n_2}, \frac{B_z}{1+\chi n_3} \right) \quad (2.6)$$

$\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide et  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  sont les facteurs de démagnétisation,  $n_1+n_2+n_3=1$  [Sihvola 92].

Si  $a > b$  et  $b = c$ , les facteurs de démagnétisation sont donnés par [Sihvola 92], [Moon 94]:

$$n_1 = \frac{1-e^2}{2e^3} \left( \ln \frac{1+e}{1-e} - 2e \right) \quad (2.7)$$

$$n_2 = n_3 = \frac{1}{2} (1 - n_1) \quad (2.8)$$

$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$  est l'excentricité.

**c) Particule cylindrique**

Pour une particule cylindrique  $n_1 = 0, n_2 = n_3 = \frac{1}{2}$  [Moon 94]. Le développement de l'équation (2.6) conduit à l'expression de l'aimantation suivante [Moon 94] :

$$\vec{M} = \mu_r(\mu_r - 1) \left( H_x, \frac{2}{(\mu_r+1)} H_y, \frac{2}{(\mu_r+1)} H_z \right) \quad (2.9)$$

**2.1.3. Force magnétique appliquée par le champ sur une particule aimantée**

La force magnétique exercée par le champ magnétique sur une particule solide aimantée de volume  $V_p$  est donnée par [Moon 94], [Shevkoplyas 07], [Mehasni 07]:

$$\vec{f}_m = \mu_0 \int_{V_p} (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{H} dV \quad (2.10)$$

Pour une configuration tridimensionnelle et dans un système cartésien les composantes de la force magnétique sont données par [Shevkoplyas 07] :

$$\begin{cases} f_{mx} = \mu_0 V_P \left( M_x \frac{dH_x}{dx} + M_y \frac{dH_x}{dy} + M_z \frac{dH_x}{dz} \right) \\ f_{my} = \mu_0 V_P \left( M_x \frac{dH_y}{dx} + M_y \frac{dH_y}{dy} + M_z \frac{dH_y}{dz} \right) \\ f_{mz} = \mu_0 V_P \left( M_x \frac{dH_z}{dx} + M_y \frac{dH_z}{dy} + M_z \frac{dH_z}{dz} \right) \end{cases} \quad (2.11)$$

#### 2.1.4. Force d'interaction de type dipolaire magnétique entre les particules

Les particules aimantées se comportent comme des dipôles magnétiques. Alors, des interactions magnétiques dipolaires existent entre les particules qui sont plus proches l'une de l'autre. La nature de ces interactions dépend fortement de la direction de leurs aimantations et de la position de chacune par rapport aux autres. Pratiquement, les aimantations des dipôles magnétiques sont alignées dans la même direction du champ appliqué. Cela génère généralement une interaction de nature attractive ce qui conduit à leur agglomération. Pour connaître la nature de l'interaction entre deux particules voisines (voir Fig.2.2), on peut faire recours à l'expression suivante [Durand 68], [Mehasni 07].

$$f_{DD} = \frac{3\mu_0}{4\pi} (\cos \alpha - 3 \cos \theta_1 \cos \theta_2) \frac{M_1 M_2}{r^4} \quad (2.12)$$

Ici  $\alpha$  est l'angle entre les deux vecteurs d'aimantation des particules  $\vec{M}_1$  et  $\vec{M}_2$ .

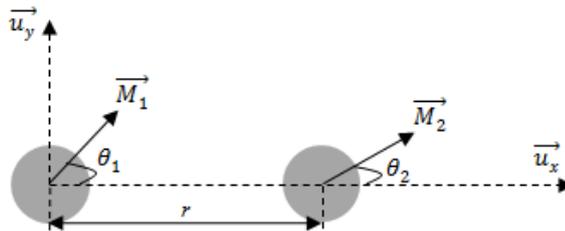


Figure 2.2 : Deux particules sphériques aimantées voisines.

Autre que l'interaction de type dipolaire magnétique, il existe également une interaction de London-van Der Waals généralement attractive pour les particules de même espèce. L'effet de cette interaction est négligeable devant l'effet de l'interaction DD.

L'expression (2.12) ne permet pas de prendre en compte l'effet de l'interaction magnétique entre des particules aimantées et dispersées d'une manière aléatoire. Pour cela, nous avons adapté et utilisé dans notre cas 3D l'approche numérique développée et appliquée pour un cas 2D [Mehasni 07].

### 2.1.5. Perméabilité magnétique équivalente d'un mélange liquide-solide

En réalité, le matériau à traiter est constitué de deux milieux différents, l'eau et les particules solides de fer. Il est donc un mélange liquide biphasique (solide+liquide). L'existence des particules ferromagnétiques peut changer la nature magnétique du liquide qui l'inclue. De cela, et afin de tenir compte sa réalité magnétique qui peut avoir une influence importante sur les résultats, on doit évaluer sa perméabilité magnétique équivalente. Cette dernière dépend fortement de la géométrie des particules, de leur perméabilité magnétique et de leur concentration dans le milieu à traiter. Vu la taille fine des particules considérées, elles sont supposées sphériques homogènes. Dans ces conditions, la perméabilité magnétique effective du mélange peut être évaluée en se servant de la formule de Maxwell-Garnett exprimée par [Sihvola 92] :

$$\mu_{efl} = \mu_l + 3\mu_l \frac{c \frac{\mu_p - \mu_l}{\mu_p - 2\mu_l}}{1 - c \frac{\mu_p - \mu_l}{\mu_p - 2\mu_l}} \quad (2.13)$$

Ici  $c$  est la concentration volumique des particules,  $\mu_l$  est la perméabilité magnétique du liquide et  $\mu_p$  est la perméabilité magnétique des particules.

Pour un mélange multiphasique, la perméabilité magnétique effective est donnée par la formule de mixage de Maxwell-Garnett donnée par [Sihvola 92] :

$$\mu_{efl} = \mu_l + 3\mu_l \frac{\sum_{i=1}^N c_i \frac{\mu_i - \mu_l}{\mu_i - 2\mu_l}}{1 - \sum_{i=1}^N c_i \frac{\mu_i - \mu_l}{\mu_i - 2\mu_l}} \quad (2.14)$$

Ici  $N$  est le nombre de phases solides,  $c_i$  et  $\mu_i$  ( $i = 1 \dots N$ ) sont respectivement la concentration volumique et la perméabilité magnétique de chaque phase.

## 2.2. Modèles mathématiques liés au problème hydraulique

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la purification de l'eau en écoulement dans une conduite fermée. De telle étude est limitée aux cas des concentrations très faibles en particules de fer de taille très fines. Afin de simplifier la modélisation du problème hydraulique lié à notre application, nous avons introduit les hypothèses suivantes :

1. Les particules rigides sont de taille très fine ce qui permet de négliger leur effet sur l'écoulement.
2. Les agglomérations due aux interactions magnétiques de type dipolaire sont supposées de tailles très petites à effet négligeable sur l'écoulement.
3. Les interactions de type mécanique (frottement et collision des particules,..) sont négligées.

### 2.2.1. Equation de l'écoulement du liquide traité

Dans la dynamique de fluide, les équations générales qui régissent un écoulement ou décrivent le comportement d'un fluide sont les équations de continuité, de conservation de la quantité du mouvement et de conservation d'énergie [Louisnard 12], [Ancey 15].

L'équation de continuité qui exprime la conservation de la masse est donnée par [Plaut 15]

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \text{div}(\rho_l \vec{u}_l) = 0 \quad (2.15)$$

$\vec{u}_l$  est la vitesse d'écoulement et  $\rho_l$  est la densité volumique du liquide.

Pour le cas d'un milieu incompressible et homogène,  $\rho_l$  est constante dans le temps et dans l'espace. L'équation (2.15) devient :

$$\text{div}(\vec{u}_l) = 0 \quad (2.16)$$

L'équation vectorielle de conservation de la quantité du mouvement est exprimée par :

$$\rho_l \frac{\partial \vec{u}_l}{\partial t} + \rho_l \vec{u}_l (\text{div} \vec{u}_l) + \overrightarrow{\text{grad}} p = \vec{F} + \eta \Delta \vec{u}_l \quad (2.17)$$

Dans notre application, l'écoulement étant isotherme. Le coefficient de viscosité dynamique  $\eta$  est constant. De plus, l'équation de l'énergie n'a plus lieu d'être utilisée.

#### 2.2.1.1. Cas d'un fluide incompressible (Equations de Navier-Stokes)

Dans notre application, le liquide à traiter (eau) se considère comme un fluide incompressible. Alors, son mouvement est régi par les équations de Navier-Stokes données par [Brun 08], [Machicoane 14] :

$$\begin{cases} \rho_l \frac{\partial \vec{u}_l}{\partial t} + \rho_l (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}_l) \vec{u}_l + \vec{\nabla} p = \vec{F} + \eta \Delta \vec{u}_l \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_l = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

La quantité  $\vec{F}$  représente les forces extérieures liées au volume,  $p$  est la pression et  $\eta$  est la viscosité dynamique du liquide.

La détermination d'un régime d'écoulement repose sur la valeur d'un nombre sans unité appelé nombre de Reynolds  $R_e$  qui dépend de la forme géométrique de la conduite, des propriétés physiques du liquide et de sa vitesse d'écoulement [Thual 10]. Pour un canal cylindrique, cas de notre application, le nombre de Reynolds est exprimé par [Thual 10]:

$$R_e = \frac{u_l D}{\nu} \quad (2.19)$$

Le paramètre  $\nu = \eta / \rho_l$  est la viscosité cinétique du liquide et  $D$  est le diamètre du canal.

Le nombre de Reynolds qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses caractérise la turbulence de l'écoulement. Si  $R_e < 2000$ , le régime d'écoulement est laminaire. Si  $R_e > 3000$ , le régime est qualifié de turbulent. Entre ces deux limites, il existe le régime de transition ( $2000 < R_e < 3000$ ) [Mehasni 07], [Bigillon 01].

### 2.2.1.2. Ecoulement turbulent modèle $K-\epsilon$

Pour modéliser la turbulence, la littérature présente le modèle  $K-\epsilon$  qui est le modèle le plus répandu. Dans ce modèle, la viscosité turbulente calculée en chaque point de l'écoulement est reliée à l'énergie turbulente  $k$  et à son taux de dissipation  $\epsilon_t$  [Bratu 89], [Pinson 06].

La viscosité turbulente est donnée par [Bratu 89]:

$$\eta_t = \rho_l C_m \frac{k^2}{\epsilon_t} \quad (2.20)$$

$k$  et  $\epsilon_t$  sont estimés par les équations de transport déduites des équations de Navier-Stokes [Bratu 89], [Brun 08]:

$$\rho_l \frac{\partial k}{\partial t} - \vec{\nabla} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) (\vec{\nabla} k) \right] + \rho_l \vec{u}_l \vec{\nabla} k = \frac{1}{2} \eta_t \left( \vec{\nabla} \vec{u}_l + (\vec{\nabla} \vec{u}_l)^T \right)^2 - \rho_l \epsilon \quad (2.21)$$

$$\rho_l \frac{\partial \epsilon}{\partial t} - \vec{\nabla} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) (\vec{\nabla} \epsilon) \right] + \rho_l \vec{u}_l \vec{\nabla} \epsilon = \frac{1}{2} C_{\epsilon 1} C_m k \left( \vec{\nabla} \vec{u}_l + (\vec{\nabla} \vec{u}_l)^T \right)^2 - \rho_l C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.22)$$

D'après Launder et Spalding les constantes des équations (2.21) et (2.22) ont les valeurs standards suivantes [Bratu 89] :

$$C_m = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1 \text{ et } \sigma_\epsilon = 1.3$$

### 2.2.2. Actions hydrodynamiques appliquées à une particule en mouvement

Lors de son mouvement, chaque particule est soumise à des actions hydrodynamiques. Ces dernières dépendent fortement de la taille de la particule, de sa densité de mass et de sa vitesse de déplacement. Pour les applications de la séparation en voie humide, ces actions peuvent

avoir un effet dramatique sur l'efficacité de la séparation. Pour cela, et afin de concevoir un séparateur de haute performance, les effets de ces actions doivent être introduits dans toutes les étapes d'étude.

L'origine des actions hydrodynamiques réside dans les champs de pression et de contraintes agissant à la surface des particules. Parmi toutes ces actions, certaines ont un effet négligeable sur le mouvement de la particule comme les forces dues à l'accélération du liquide et à l'accélération de la particule. Dans notre étude, nous ne considérons que les forces dues à l'action de l'écoulement moyen et à la répartition de la vitesse autour de la particule. Pour introduire ces actions dans l'étude du problème de la séparation, des modèles mathématiques traduisant leur effet sont utilisés.

### 2.2.2.1. Force de flottabilité

La force de flottabilité est la résultante de la force de gravité de la particule et de la poussée d'Archimède. Cette force est exprimée par [Svoboda 04]

$$\vec{f}_A = V_p(\rho_p - \rho_l) \vec{g} \quad (2.23)$$

Ici  $\rho_p$  est la densité de masse de la particule, et  $\vec{g}$  est l'accélération de la gravité.

### 2.2.2.2. Force de traînée

La force de traînée est fonction du coefficient de traînée  $C_T$ , du nombre de Reynolds de la particule  $R_{ep}$ , de la vitesse relative  $(\vec{u}_p - \vec{u}_l)$  de la particule et de la masse volumique du liquide [Bigillon 01], [Motta 13].

$$\vec{f}_T = -\frac{1}{2}\rho_l S_p C_T R_{ep} |\vec{u}_p - \vec{u}_l| (\vec{u}_p - \vec{u}_l) \quad (2.24)$$

Pour une particule sphérique de rayon  $R_p$ , le nombre de Reynolds est donné par [Mehasni 07]

$$R_{ep} = 2R_p \frac{|\vec{u}_p - \vec{u}_l|}{\eta} \quad (2.25)$$

Pour des valeurs  $R_{ep} < 0.1$ , la valeur du coefficient de traînée est donnée par [Svoboda 04],

$$C_T = \frac{24}{R_{ep}} \quad (2.26)$$

L'expression de la force de traînée prend ainsi la forme simple [Sharma 15],

$$\vec{f}_T = -6\pi R_p \eta (\vec{u}_p - \vec{u}_l) \quad (2.27)$$

### 2.2.2.3. Force de portance

C'est une force apparait sur une direction orthogonale à celle du mouvement relatif de la particule en cas où l'écoulement présente un cisaillement ou bien si la particule est animée d'une vitesse de rotation différente de la rotation locale de l'écoulement [Bigillon 01], [Bonnefoy 15]. Cette force est exprimée sous une forme analogue à la force de traînée quand le nombre de Reynolds est important.

En présence de vorticité au sein de l'écoulement, la force de portance est exprimée par [Chrust 12]

$$\vec{f}_p = -C_L \rho_l V_p (\vec{u}_p - \vec{u}_l) \wedge \vec{\Omega} \quad (2.28)$$

Ici  $\vec{\Omega} = \vec{\nabla} \wedge \vec{u}_l$  est le champ de vorticité en l'absence de rotation de la particule,  $C_L$  est le coefficient de portance qui est fonction du nombre de Reynolds.

Pour des valeurs du nombre de Reynolds  $Re > 50$ , le coefficient de portance est donné par [Chrust 12]

$$C_L = 0.5 - 4.0 Re^{-1} \quad (2.29)$$

### 2.2.3. Equation modèle du problème dynamique de la particule

Le mouvement de la particule est le résultat des actions magnétiques et hydrodynamiques appliquées. Pour étudier le comportement d'une particule, on calcul son mouvement. Pour cela, on résout l'équation dynamique suivante :

$$\vec{f} = m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} \quad (2.30)$$

$\vec{f}$  est la résultante des forces précitées et  $m_p$  est la masse de la particule.

### 2.3. Modèle mathématique global

Les phénomènes présents dans une application de la séparation magnétique en voie humide interfèrent fortement. Ainsi, le calcul du problème de la séparation doit être basé sur la résolution du système couplé suivant :

$$\begin{cases} \overline{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overline{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_{ex} \\ \rho_l \frac{\partial \vec{u}_l}{\partial t} + \rho_l (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}_l) \vec{u}_l + \vec{\nabla} p = \vec{F} + \eta \Delta \vec{u}_l \\ m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{f} \end{cases} \quad (2.31)$$

Le couplage des trois équations du système est assuré indirectement par les termes de la force magnétique et de la perméabilité magnétique locale du milieu traité.

# **Chapitre 3**

## **Simulation de la séparation et approche tridimensionnelle**

### 3. Simulation de la séparation magnétique et approche tridimensionnelle

Ce chapitre est consacré au calcul du problème de la séparation magnétique. Il s'agit en fait de la simulation du processus de la séparation dans une approche tridimensionnelle. De telle simulation permet la vérification de la capacité des modèles mathématiques développés à représenter correctement les contraintes appliquées et l'évolution des phénomènes en présence et l'estimation des performances de la forme de séparation proposée et les limites de son application. L'analyse des résultats de la simulation conduit à l'identification des paramètres influant sur la séparation et qui représente les clefs de l'optimisation du dispositif proposé. Pour simuler le processus de séparation, nous avons calculé les trajectoires des particules et cela par la résolution de l'équation dynamique particulaire. Pour calculer et prendre en compte les forces et contraintes appliquées, nous calculons les distributions du champ magnétique et de la vitesse d'écoulement et cela par résolution des équations gouvernant les problèmes magnétique et hydraulique.

#### 3.1. Méthode de résolution

##### 3.1.1. Résolution du problème dynamique particulaire

L'équation qui gouverne le mouvement des particules est non linéaire à cause de l'indépendance entre les forces appliquées et la position des particules. Pour cela, une résolution numérique est nécessaire. Plusieurs démarches peuvent être appliquées, méthode d'Euler, Euler modifiée, Milne et Range Kutta [Stout 07], [Mehasni 07]. Ces méthodes sont basées sur une intégration numérique itérative pour obtenir une approximation de la solution [Stout 07]. Dans notre cas, nous avons appliqué la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) à cause de sa capacité de fournir une meilleure solution et une convergence plus rapide [Descombes 08], [Stout 07]. Les algorithmes de cette approche (RK4) sont relativement faciles à programmer et implémenter dans les outils de calcul et sont en générale stables. Le pas de calcul est possible à adapter pour obtenir la précision souhaitée.

##### 3.1.2. Résolution des problèmes magnétique et hydraulique

Le problème de la séparation magnétique présente des phénomènes fortement couplés (magnétique, hydraulique et dynamique particulaire). En plus, le mouvement très aléatoire des particules et la possibilité de formation d'agglomérations transitoires des particules conduit à des complexités géométriques (non homogénéité) et des fortes modifications locales du champ appliqué. Ces particularités rendent une résolution numérique très obligatoire. Une des méthodes qui ont approuvé leur capacité à prendre en charge ces particularités, les régimes

non linéaires et d'autres difficultés est la méthode des éléments finis (MEF) [Mehasni 07]. Afin de représenter correctement les distributions du champ magnétique appliqué et de la vitesse d'écoulement dans la région de séparation ainsi que la prise en compte des effets réels des forces appliquées, une résolution tridimensionnelle 3D a été effectuée.

Pour résoudre les équations du champ magnétique et de l'écoulement du liquide traité, nous avons utilisé le logiciel multiphysique COMSOL. Pour calculer les forces appliquées et permettre leur prise en compte dans la résolution de l'équation dynamique particulière des programmes ont été développés sous l'environnement Matlab.

### 3.2. Dispositif de base proposé et domaine d'étude

L'objectif de notre travail est le traitement d'un liquide en écoulement. Pour cela, nous avons proposé le dispositif de base de la figure 3.1. Il s'agit de la mise en écoulement du matériau à traiter dans un canal cylindrique fermé dont la vitesse peut être adaptée en agissant sur le système de pompage. Le choix du diamètre du canal et la vitesse d'écoulement (le flux) détermine le régime d'écoulement duquel dépendent les contraintes hydrauliques appliquées.

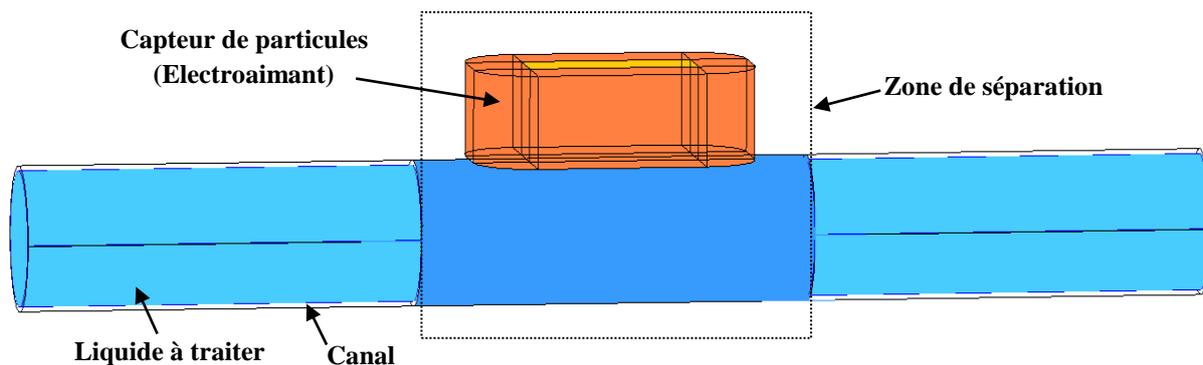


Figure 3.1 : Configuration de base du séparateur proposé.

Dans la configuration de base, un seul élément capteur est utilisé. La position du capteur par rapport au système de pompage est choisie en fonction de la distribution du champ appliqué qui dépend lui-même du dimensionnement du capteur et de son courant d'excitation.

### 3.3. Hypothèses imposées et processus de résolution

Pour permettre notre étude, les hypothèses suivantes ont été imposées :

1. Les particules ferromagnétiques de taille très fine (micrométrique) sont supposées de forme géométrique sphérique.
2. La concentration des particules dans le matériau à traiter est faible.

3. Les agglomérations transitoires (locaux) des particules n'ont aucune influence sur l'écoulement.

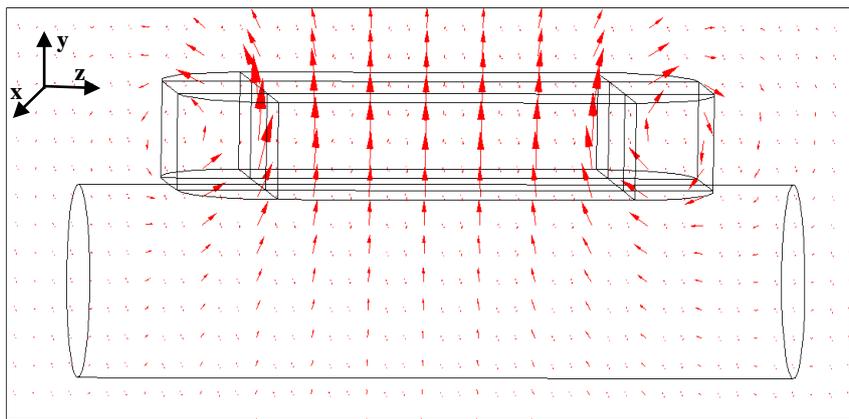
Ces hypothèses ont permis le découplage des phénomènes en présence et une résolution alternée de leurs équations. Dans de telle résolution, nous procédons à :

1. Introduction des données géométriques et propriétés physiques et construction du domaine d'étude lié à la géométrie du dispositif.
2. Calcul de la distribution du champ magnétique dans la région de séparation et cela par résolution de l'équation du champ en se servant du logiciel Comsol.
3. Calcul de la distribution de la vitesse d'écoulement dans la partie utile du canal par utilisation du logiciel Comsol.
4. Export des résultats obtenus à l'environnement Matlab pour calculer les forces d'origines magnétique et hydraulique prises en compte.
5. Résolution de l'équation dynamique qui régit le mouvement des particules.
6. Analyse et représentation des résultats obtenus.

### 3.4. Analyse des résultats obtenus

#### 3.4.1. Distribution du champ magnétique et zone d'efficacité

La capture des particules est le résultat de l'interaction entre le champ appliqué et les particules aimantées. Une interaction efficace se produit dans la région où le champ (gradient du champ) est important. Pour connaître les limites de cette région vis-à-vis de la position du capteur, on représente la distribution du champ au voisinage du capteur.



**Figure 3.2 : Distribution de l'induction magnétique au voisinage du capteur.**

Les résultats de la figure 3.2 ont été obtenus pour un capteur rectangulaire (électroaimant) d'un bobinage d'un fil conducteur de section  $S_c = 1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  contenant 169 spires distribuées sur 13 couches. Le capteur a une hauteur  $H_w = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$ , largeur interne  $L_{wi} = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$ , longueur

interne  $Pw_i = 6 \times 10^{-2}$  m. Le capteur est excité par un courant continu  $I = 9$  A. Le canal choisi a un diamètre  $D = 3 \times 10^{-2}$  m.

Pour déterminer les limites de la zone d'efficacité du champ, nous avons calculé les variations de l'induction magnétique au niveau de la profondeur du canal le long de la partie située au voisinage du capteur.

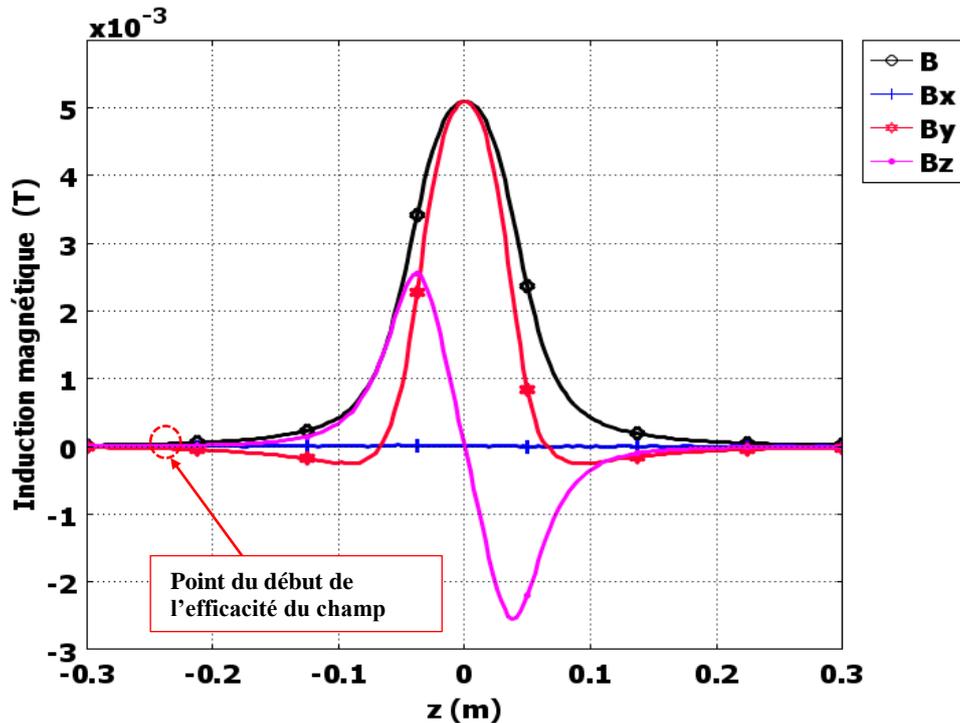


Figure 3.3 : Variation de l'induction magnétique au niveau de la profondeur du canal. Les points de traçage existent à  $x = 0$  et  $y = -1.5 \times 10^{-2}$  m.

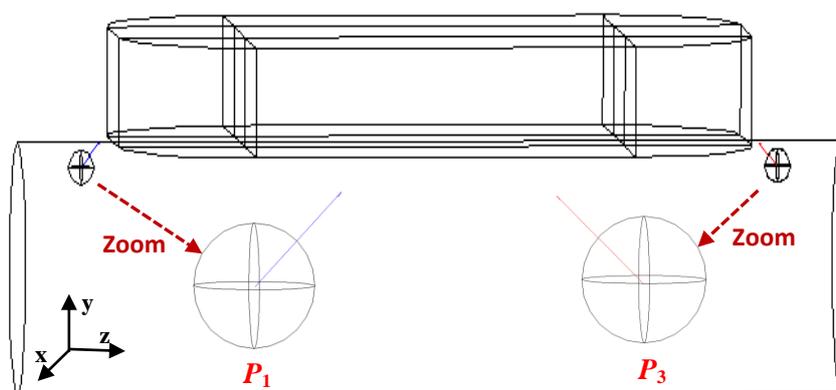
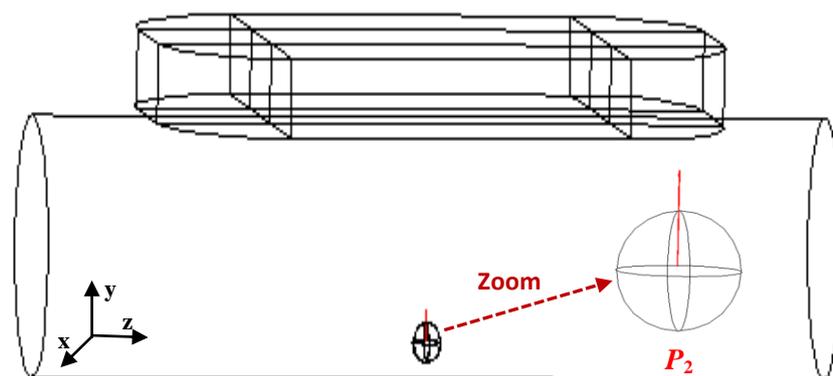
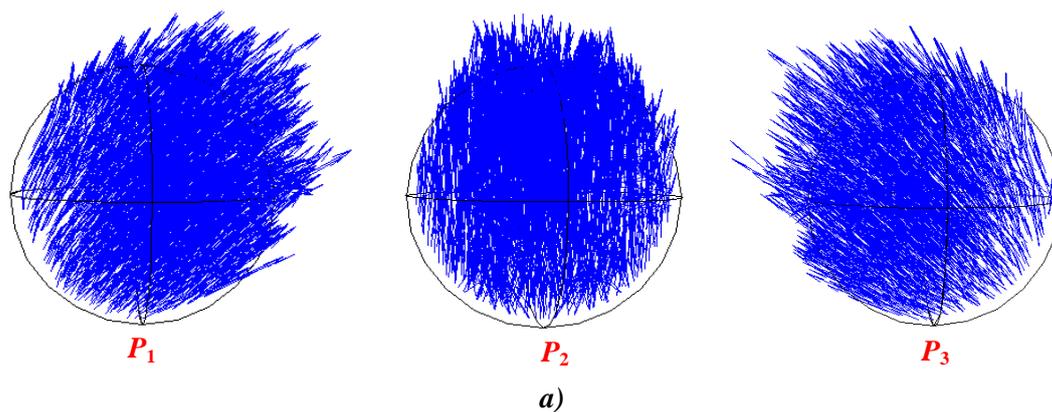
Selon la figure ci-dessus, on constate que pour la taille choisie du capteur et l'excitation appliquée, le champ appliqué peut avoir utilité à partir du point situé à une distance  $x = 24 \times 10^{-2}$  m du centre du capteur.

### 3.4.2. Force magnétique et nature des différentes interactions

#### 3.4. 2.1. Interaction entre le champ appliqué et la particule aimantée

Pour connaître la nature de la force appliquée par le champ sur une particule aimantée, nous présentons dans la figure suivante la distribution et la résultante de la force magnétique exercée pour différentes positions sur une particule sphérique.

Pour une meilleure clarté des résultats, la hauteur du capteur de particules sera réduite à 0.01m dans toutes les figures. Pour une meilleure distribution des vecteurs de la force, une densité optimale du maillage a été considérée.



b)

Figure 3.4 : Force appliquée sur une particule ferromagnétique sphérique. a) distribution de la force, b) force résultante.

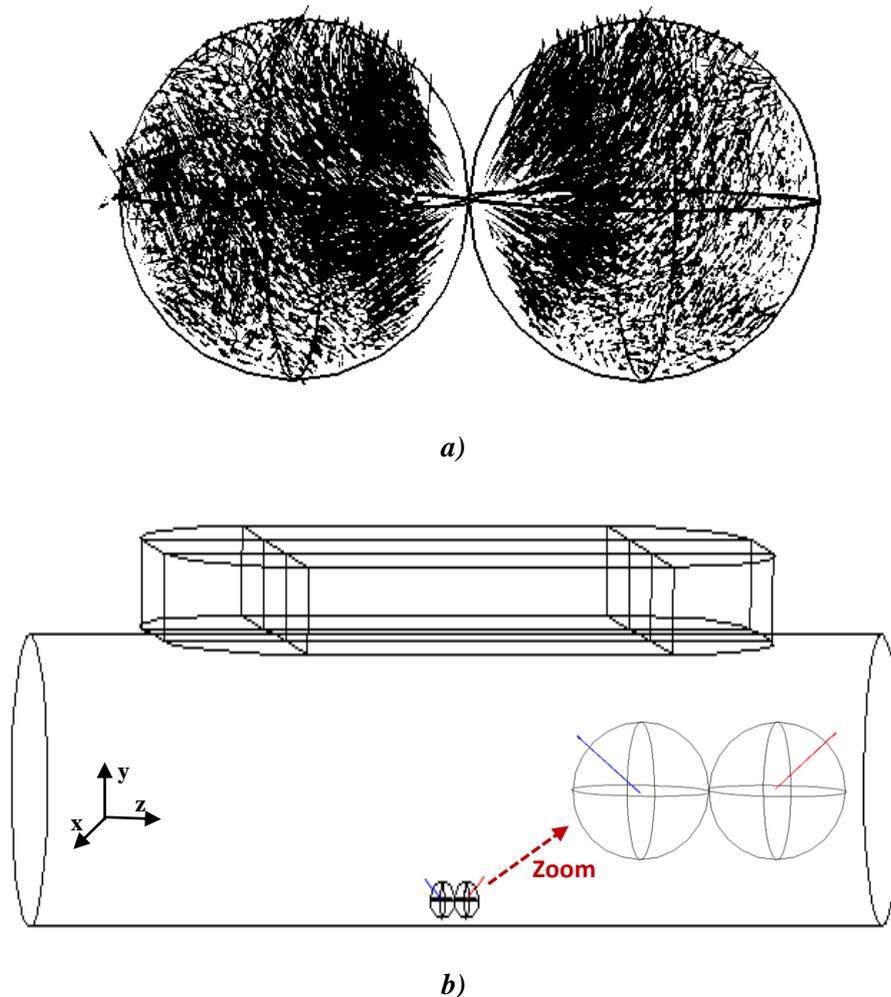
La figure ci-dessus montre que les vecteurs de la force ainsi que la résultante sont orientés vers le capteur (électroaimant source du champ). Cela signifie que la force est attractive. Elle travaille à déplacer la particule vers le capteur.

### 3.4.2.2. Interaction entre les particules aimantées

Dans une dispersion de particules aimantées (dipôles magnétiques), il existe des forces d'interaction. L'effet de ces interactions généralement attractive dépend de la position des

particules vis à vis le capteur source du champ. Pour montrer l'importance de ces interactions, on présente les distributions des forces et leurs résultantes pour différents cas de positions de particules. Pour cela, des particules homogènes de rayon important  $R_p = 0.2 \times 10^{-2}$  m et une perméabilité magnétique relative  $\mu_r = 1000$  ont été considérées.

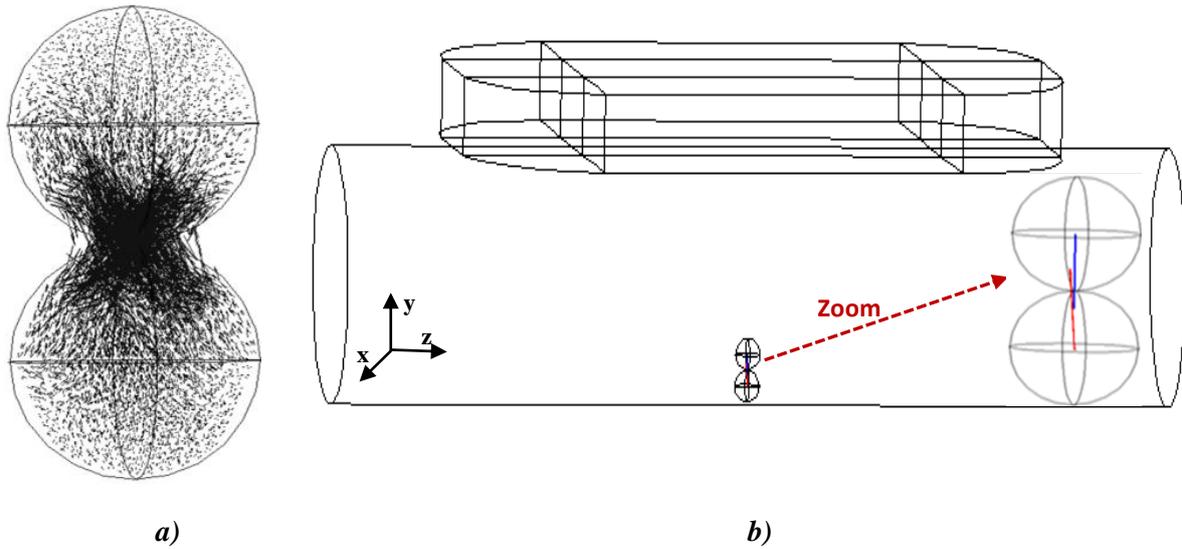
- **Cas de deux particules voisines alignées horizontalement**



**Figure 3.5: Force magnétique d'interaction entre deux particules voisines alignées horizontalement et situées sur l'axe central du capteur. a) distribution de la force dans chaque particule, b) force résultante appliquée sur les particules.**

Les résultats de la figure 3.5 montrent que pour deux particules voisines alignées horizontalement et situées à la distance considérée ( $y = 2.7 \times 10^{-2}$  m) au niveau de l'axe médian du capteur, initialement l'interaction est presque nulle. Dans ce cas, chaque particule est seulement soumise à une force d'attraction appliquée par le champ principal généré par le capteur. Si une de ces particules bouge, l'interaction va augmenter.

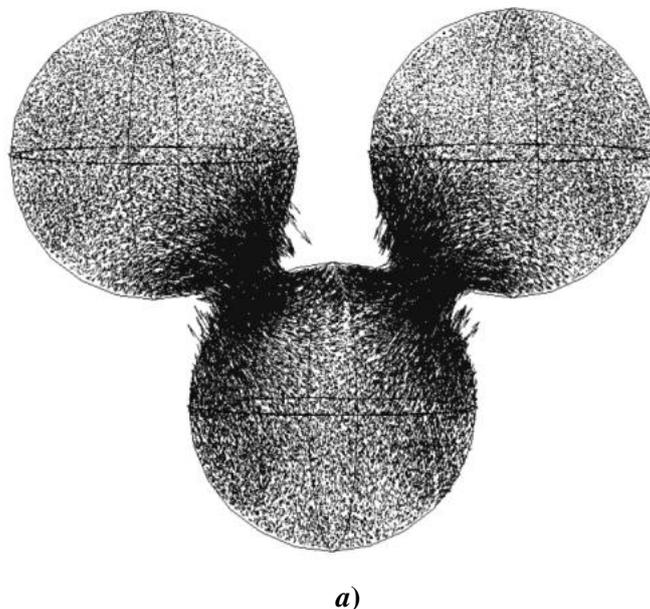
- Cas de deux particules voisines alignées verticalement.

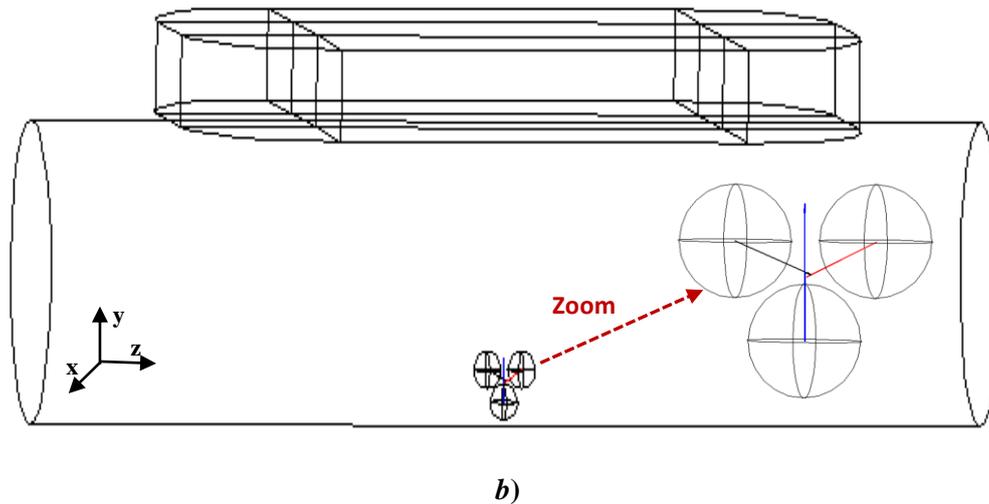


**Figure 3.6. Force magnétique d'interaction entre deux particules voisines alignées verticalement et situées sur l'axe central du capteur. *a)* distribution de la force dans chaque particule, *b)* force résultante appliquée sur les particules.**

Pour ce cas d'alignement et de position, il existe une interaction attractive entre les deux particules. Selon la figure 3.6.*b)*, l'amplitude de la force résultante appliquée sur la particule du haut est moins que celle appliquée sur la particule du bas. Elle est affaiblie par la force appliquée par le champ principal. La résultante de la force exercée sur la particule du bas est un peu supérieure ce qui signifie qu'il y aura un déplacement de l'ensemble des particules vers le capteur.

- Cas de trois particules voisines





**Figure 3.7: Force magnétique d'interaction entre trois particules voisines situées sur l'axe central du capteur. a) distribution de la force dans chaque particule, b) force résultante appliquée sur les particules.**

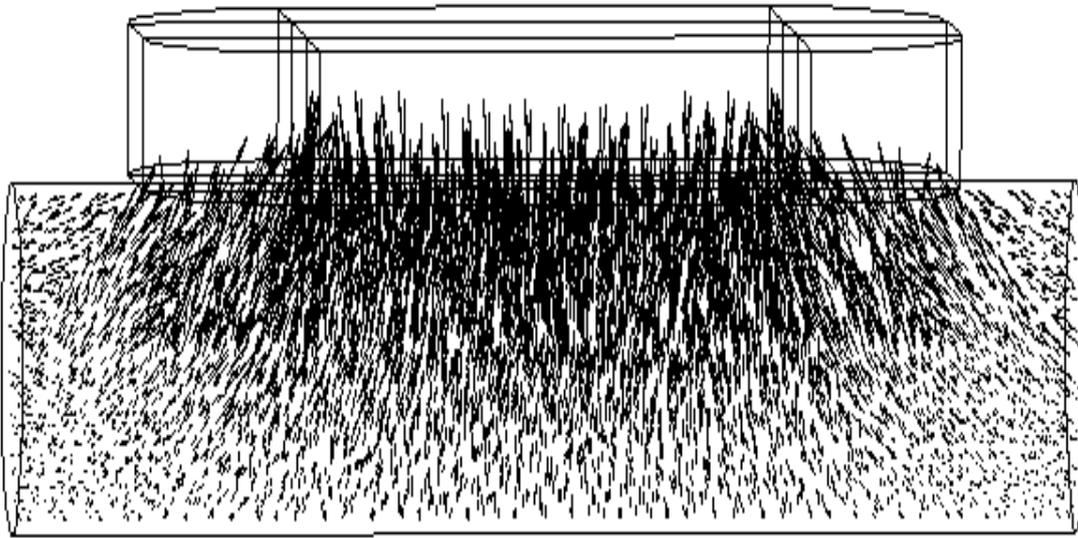
Pour le cas de trois particules alignées de la manière ci-dessus, et situées à de telle position, une interaction importante existe entre les trois particules. Les forces d'interaction appliquées aux particules du haut dominent celles appliquées par le champ principal. Cela se voit clairement sur les résultantes des forces appliquées sur les particules (voir Fig.3.7.b).

Les résultats de calcul précédent ont montré que la nature de l'interaction dépend fortement des positions des particules l'une par rapport à l'autre et par rapport au capteur. S'il y a une interaction répulsive, elle deviendra attractive dès qu'une particule se déplace. Les dipôles des particules vont s'orienter dans la même direction du champ appliqué ce qui conduit à la formation des agglomérations sous forme de chaînes de particules.

### 3.4.2.3. Calcul et prise en compte de la force magnétique dans le processus de résolution

Pour calculer la trajectoire d'une particule, on a besoin d'évaluer les forces appliquées et les introduire dans son équation dynamique. En ce qui concerne la force magnétique, elle est évaluée à chaque position de la particule à partir d'une distribution de la densité de force calculée dans la région d'intérêt et cela par application de l'expression de la force (2.31). De telle densité est obtenue par le calcul de la distribution des gradients des différentes composantes du champ (dans les trois directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ ) et la multiplier par une distribution de l'aimantation de la particule. La multiplication de la densité de la force par le volume de la particule donne la valeur de la force appliquée.

Une distribution de la densité de la force magnétique qui montre sa nature attractive est montrée dans la figure suivante :



**Figure 3.8 : Distribution 3D de la densité de force magnétique au voisinage du capteur.**

La figure 3.8 montre que tous les vecteurs de la force sont orientés vers le capteur ce qui signifie qu'une attraction existe partout.

### **3.4.3. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal**

Les contraintes (forces) d'origine hydrodynamique appliquées aux particules dépendent directement de la vitesse de l'écoulement à ses localités. Pour calculer ces contraintes et les prendre en compte dans le processus de résolution, on calcule la distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal. Pour montrer le changement de profil de vitesse avec le changement du régime d'écoulement, on traite les cas d'écoulement laminaire et turbulent.

#### **3.4.3.1. Ecoulement laminaire**

Pour un écoulement d'eau ( $\rho_1 = 1000\text{kg/m}^3$  et  $\eta = 0.001 \text{ kg/m.s}$ ) dans un canal cylindrique de diamètre  $D = 0.01 \text{ m}$  et d'une longueur de  $0.14 \text{ m}$  à une vitesse moyenne imposée à l'entrée du canal  $U_{\text{moy}} = 0.1\text{m/s}$ , on a obtenu un nombre de Reynolds  $R_e = 1000$  ce qui signifie que le régime est laminaire ( $R_e < 2000$ ) [Bigillon 01].

La distribution de la vitesse dans la partie du canal où la séparation se produit est montrée dans la figure suivante :

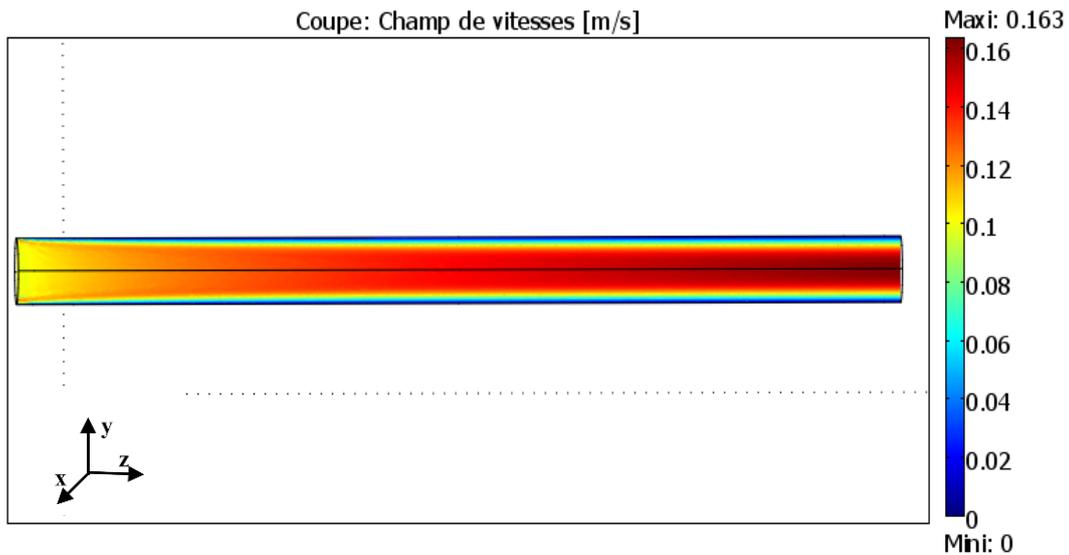


Figure 3.9 : Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal.

La figure 3.9 montre que la vitesse est uniforme à l'entrée du canal et elle se développe en une couche limite à cause du frottement de l'écoulement aux parois du canal. La vitesse se dégrade et devient nulle sur les parois.

Pour bien vérifier le régime laminaire, on présente dans la figure suivante le profil de la vitesse obtenu au milieu du canal  $z=l/2$  ( $l$  est la longueur du canal).

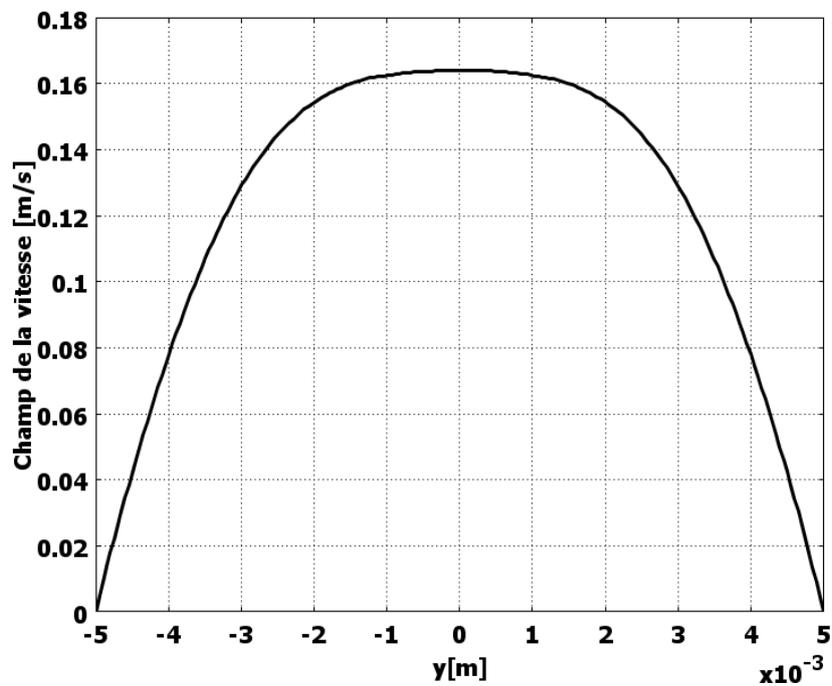


Figure 3.10 : Profil de la vitesse d'écoulement.

Le profil de vitesse a une forme parabolique ce qui vérifie le régime laminaire obtenu.

### 3.4.3.2. Écoulement turbulent

Pour un écoulement d'eau à une vitesse moyenne imposée à l'entrée du canal  $U_{\text{moy}} = 0.48$  m/s dans un canal cylindrique de diamètre  $D = 2.5 \times 10^{-2}$  m et une longueur de 0.14 m, nous avons obtenu un nombre de Reynolds  $Re = 12000$  ce qui signifie que l'écoulement est turbulent ( $Re > 2000$ ) [Bigillon 01]. La distribution de la vitesse dans le canal est présentée dans la figure suivante :

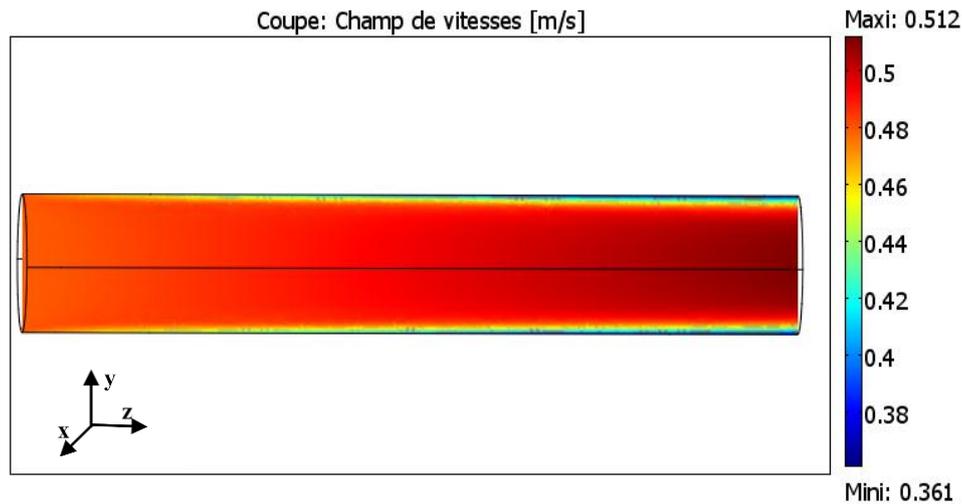


Figure 3.11 : Distribution de la vitesse de l'écoulement.

Pour une lecture quantitative des résultats d'une part et pour vérifier le régime turbulent obtenu, on présente dans la figure ci-dessous le profil de la vitesse obtenu au milieu du canal ( $z=l/2$ ).

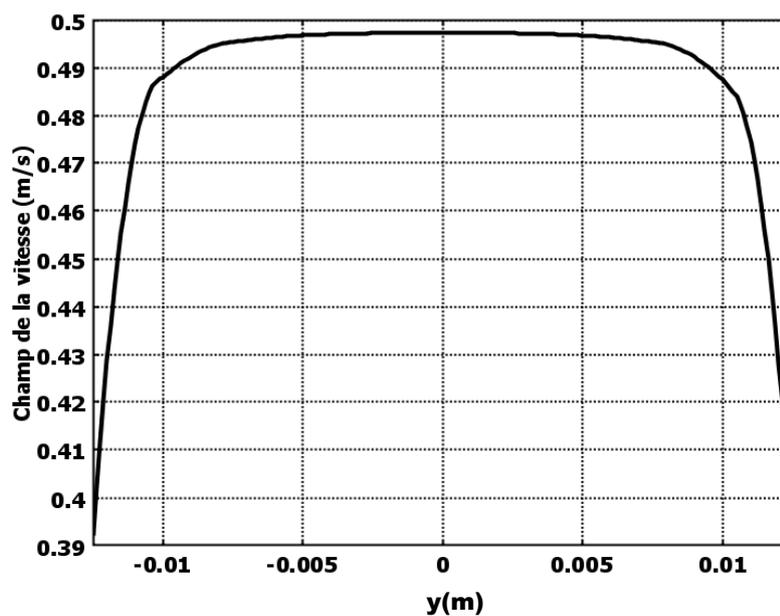


Figure 3.12. Profil de la vitesse de l'écoulement.

Le profil de la vitesse n'a pas une forme parabolique. La vitesse est quasi uniforme sur la grande partie du canal et elle décroît rapidement pour devenir nulle sur les parois. Cela démontre que le régime est turbulent.

#### 3.4.4. Comportement des particules et effets des contraintes appliquées

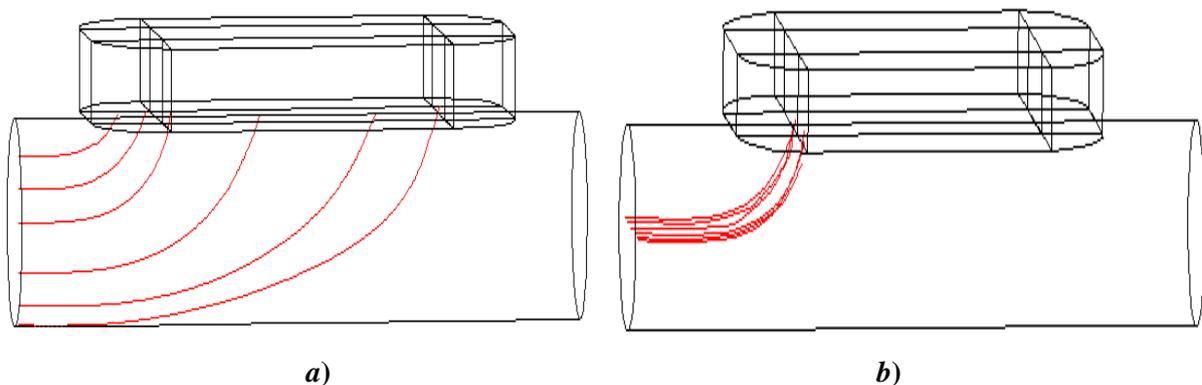
Après avoir calculé les distributions de la densité de force magnétique et de la vitesse d'écoulement dans la région de séparation, on procèdera dans cette section au calcul des trajectoires des particules qui traduisent leur comportement. Ces trajectoires permettent à la fois la vérification de la possibilité de séparation, la détermination du lieu du dépôt final des particules séparées et l'évaluation du temps total de séparation. Réellement, ces trajectoires permettent l'évaluation des performances du séparateur proposé.

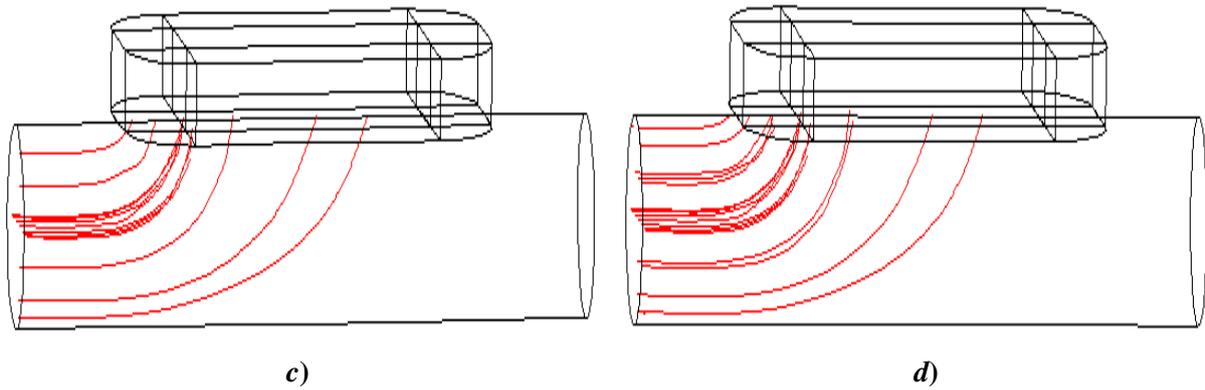
Pour effectuer notre calcul, nous considérons pour l'écoulement et le capteur les données géométrique et physique du tableau 3.1.

Courant d'excitation $I$ (A)	9
Epaisseur du capteur (m)	$1.5 \times 10^{-2}$
Hauteur du capteur (m)	$1.5 \times 10^{-2}$
Profondeur interne du capteur (m)	$6 \times 10^{-2}$
Largeur interne du capteur (m)	$2 \times 10^{-2}$
Diamètre du canal $D$ (m)	$2.5 \times 10^{-2}$
Vitesse moyenne de l'écoulement $U_{\text{moy}}$ (m/s)	0.57

**Tableau 3.1. Données géométrique et physique de l'électroaimant et de l'écoulement considérés**

Pour des particules de perméabilité magnétique relative  $\mu_r = 80$ , rayon  $R_p = 3 \times 10^{-5}$  m et densité de masse  $\rho_p = 7860$  kg/m<sup>3</sup>, initialement situées à des positions différentes, nous avons obtenu les trajectoires montrées dans les figures suivantes :

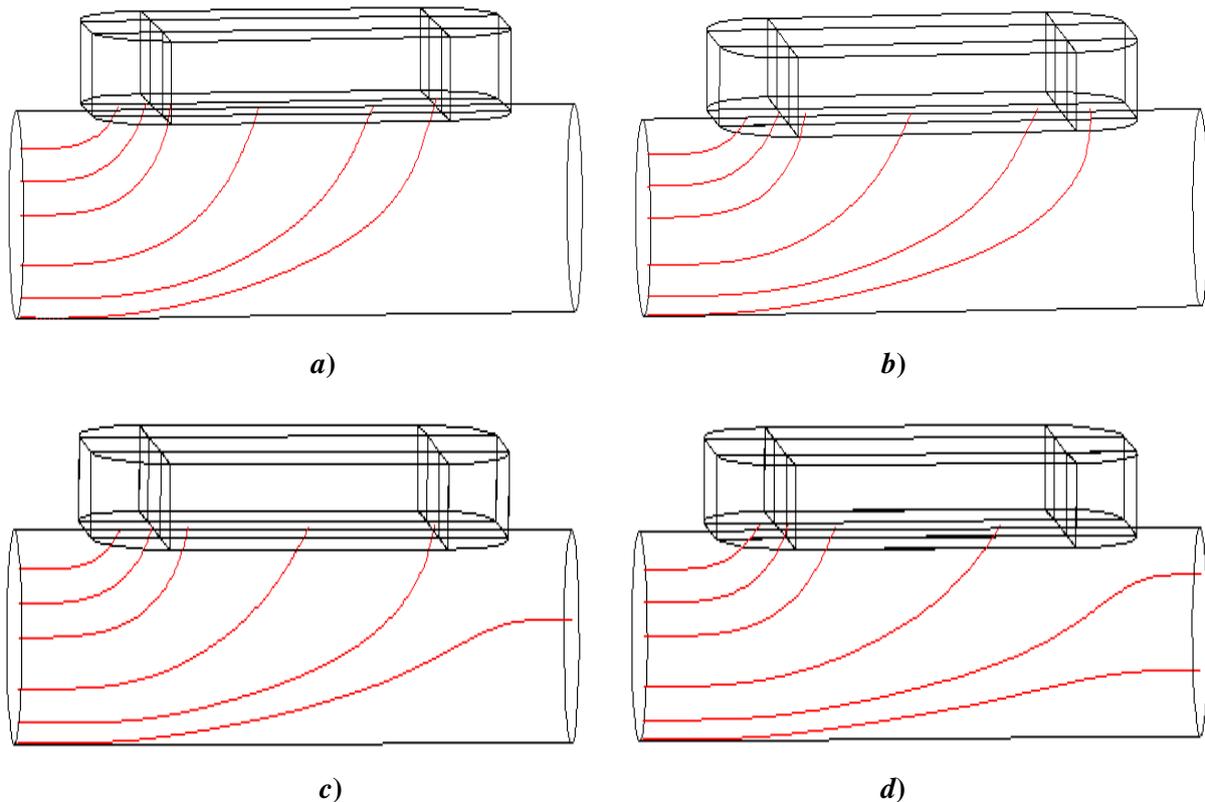




**Figure 3.13 : Trajectoires des particules situées initialement à des positions différentes. a) particules alignées verticalement, b) particules alignées horizontalement, c) particules alignées verticalement et horizontalement, d) particules positionnées aléatoirement.**

La figure 3.13 montre que pour les conditions de calcul adoptées toutes les particules ont été capturées.

Pour estimer l'effet de la vitesse sur la capture, nous avons traité un écoulement à des vitesses élevées. Pour le même dimensionnement du capteur et propriétés des particules, nous avons obtenu les trajectoires suivantes :



**Figure 3.14 : Trajectoires des particules pour différentes valeurs de la vitesse moyenne de l'écoulement. a)  $U_{\text{moy}} = 0.57$  m/s, b)  $U_{\text{moy}} = 0.67$  m/s, c)  $U_{\text{moy}} = 0.77$  m/s, d)  $U_{\text{moy}} = 1$  m/s.**

Selon les résultats de la figure 3.14, on voit que pour des vitesses supérieures à  $U_1 = 0.77$  m/s, le capteur considéré ne permet pas la séparation de toutes les particules. Les particules situées en bas sont portées avec l'écoulement. Pour réaliser une séparation complète, il faut augmenter la taille du capteur ou le courant d'excitation. Ce résultat montre la capacité des modèles utilisés à prendre en compte correctement les effets de l'écoulement sur la séparation.

### 3.4.5. Prise en compte des interactions magnétiques dipolaires DD

Dans le calcul précédent des trajectoires, nous avons ignoré l'interaction magnétique dipolaire entre les particules. En réalité, et pour des concentrations significatives en particules, l'effet des interactions peut considérablement influencer sur la qualité de la séparation en terme de temps total de séparation ou de volume et lieu du dépôt des particules séparées. Le résultat important de l'effet de l'interaction est l'agglomération des particules avant leur capture finale. Ces agglomérations à géométries irrégulières conduisent à une inhomogénéité importante du milieu traité. Magnétiquement, ces agglomérations conduisent à des zones locales de forte perméabilité et donc une induction magnétique forte. Ces zones peuvent influencer sur les particules voisines en jouant le rôle de capteurs locaux ce qui influe sur la séparation ainsi que les résultats obtenus. Du côté hydrodynamique, les géométries irrégulières des agglomérations ne permettent pas l'application des modèles mathématiques des forces hydrodynamiques valables pour des particules sphériques. Pour prendre en compte ces particularités, l'approche numérique développée et appliquée en 2D dans [Mehasni 07] a été adaptée et mise en œuvre pour notre étude 3D. De telle approche est appliquée dans un maillage éléments finis 3D réduit à la région où la séparation se produit. Dans de telle approche, le milieu traité est considéré non homogène. La perméabilité magnétique change d'un élément à un autre en fonction de la concentration locale en particules. Cette perméabilité évolue localement en fonction de l'évolution de la dispersion des particules lors de leur mouvement. Du côté dynamique, chaque agglomération locale des particules est approchée par une particule sphérique de rayon équivalent fonction de la concentration locale des particules dans l'élément. De telle approximation a été justifiée par le fait que :

- Les propriétés physiques dans un élément fini sont constantes.
- L'induction magnétique dans un élément fini est constante, ce qui signifie que les particules contenues dans un élément acquièrent la même aimantation et donc subissent la même force magnétique qui les déplace vers le même endroit.
- L'effet attractif important de l'interaction magnétique dipolaire dans l'élément force les particules contenues à se regrouper et se déplacer ensemble.

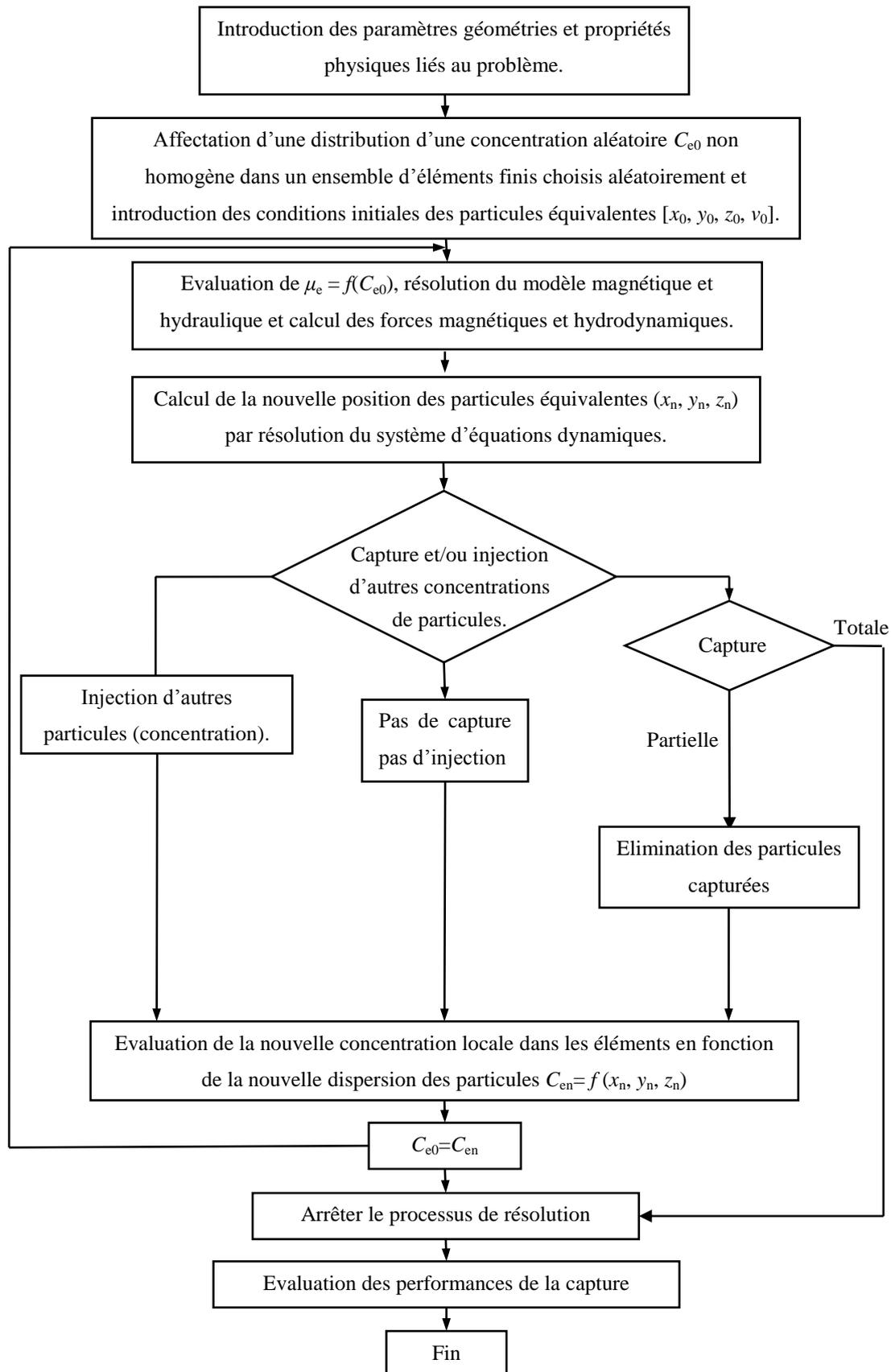


Figure 3.15 : Schéma synoptique de la résolution du problème couplé.

Pour permettre la mise en œuvre des modèles mathématiques précédents, nous avons supposé que :

- Les particules équivalentes ont une forme sphérique.
- Si deux éléments voisins sont complètement saturés en particules, on considère dans chaque élément une particule équivalente qui bouge indépendamment de la voisine.
- Les particules équivalentes ne perturbent pas l'écoulement.
- Les interactions de types électrique et dynamique entre les particules ont un effet négligeable.

La mise en œuvre de l'approche présentée est basée sur le couplage des trois phénomènes, magnétique, hydraulique et dynamique où le paramètre de ce couplage est la concentration locale des particules. Ce paramètre apparaît dans le calcul de la perméabilité magnétique qui intervient dans le calcul de la force magnétique et dans le rayon des particules équivalentes.

Pour implémenter notre approche, nous avons couplé les méthodes numériques des éléments finis (FE) et Runge Kutta d'ordre 4 (RK4). La démarche de résolution est clarifiée dans le schéma synoptique de la figure 3.15 [Mehasni 07].

#### 3.4.6. Traitement d'un liquide statique

Au premier lieu, l'approche a été appliquée pour résoudre le problème de la séparation dans de l'eau stable contenant des particules de fer de perméabilité magnétique  $\mu_r = 80$ . L'eau supposée d'une concentration globale faible en particules  $C_g = 0.78 \%$  est mis dans un canal cylindrique de diamètre  $D = 3 \times 10^{-2}$  m. Pour cette concentration, le mélange est considéré non magnétique [Williams 10].

Généralement, dans un liquide statique, les particules de densité de masse importante (fer) se stagnent au fond du canal. Alors, pour étudier une dispersion réelle de particules, nous considérons le cas de la figure 3.16.

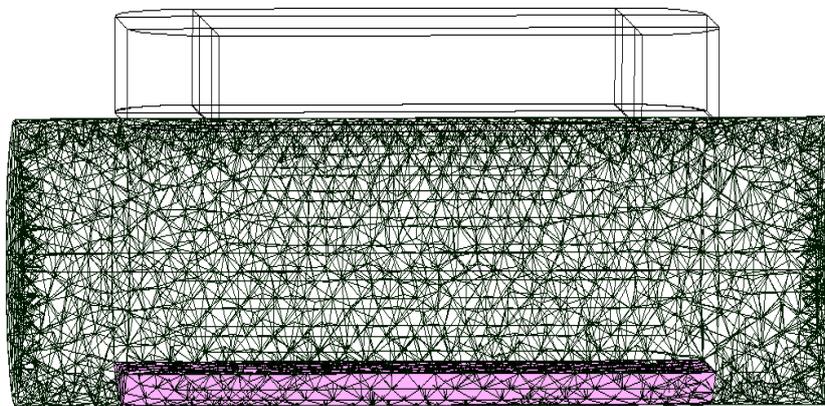
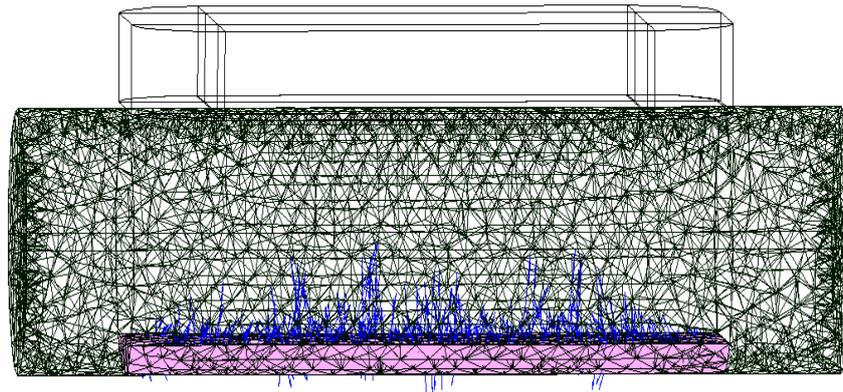


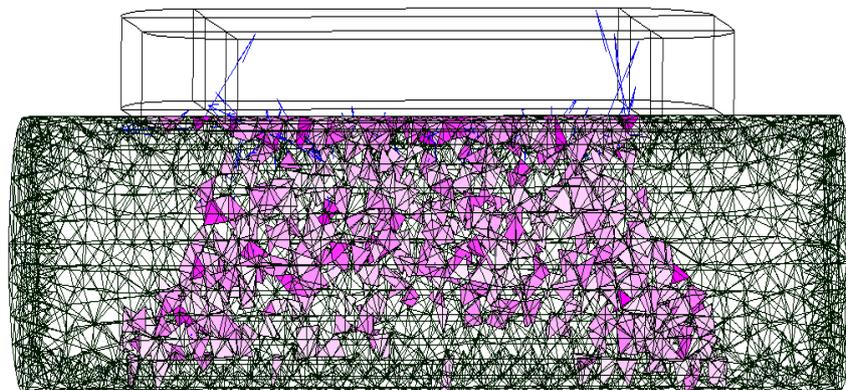
Figure 3.16. Distribution initiale de la concentration des particules.

La concentration affectée aux éléments est représentée par une couleur dont l'intensité est proportionnelle à la valeur de la concentration. Plus la concentration est élevée plus la couleur est intense. Pour la dispersion considérée des particules, l'interaction magnétique entre les particules est très importante et peut dans des localités dominer les forces appliquées par le champ principal. Malgré ces interactions, une attraction importante est appliquée par le champ principal sur l'ensemble de la dispersion ce qui conduit au déplacement des particules vers le capteur. Cela est bien vérifié par la densité de force représenté dans la figure 3.17 et obtenue à l'instant  $t=0$ .



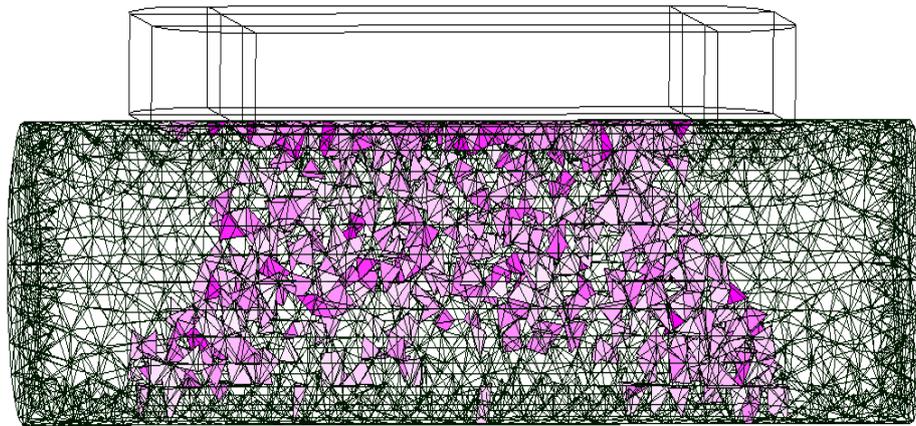
**Figure 3.17. Distribution de la densité de force magnétique calculée à  $t = 0$ .**

La figure 3.17 montre que les vecteurs de forces sont orientés vers le capteur ce qui signifie que ces particules vont se déplacer vers le haut. Par contre, des forces répulsive sont appliquées sur les particules situées au fond du canal ce qui signifie qu'elles ne seront pas capturées. Réellement, dès que les particules situées au-dessus du dépôt initial des particules se déplacent vers le capteur, la configuration de la distribution de la force change et des forces attractives dirigées vers le haut vont être appliquées sur les particules du bas ce qui confirme leur séparation. Ce résultat est bien démontré par la nouvelle distribution de la force obtenue après un temps  $t = 0.2406$  s et montré dans la figure 3.18.

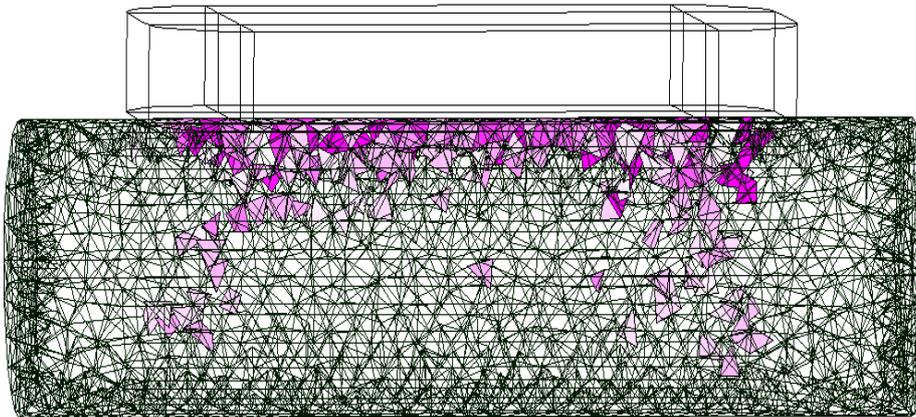


**Figure 3.18 Distribution de la densité de force obtenue à  $t = 0.2406$  s.**

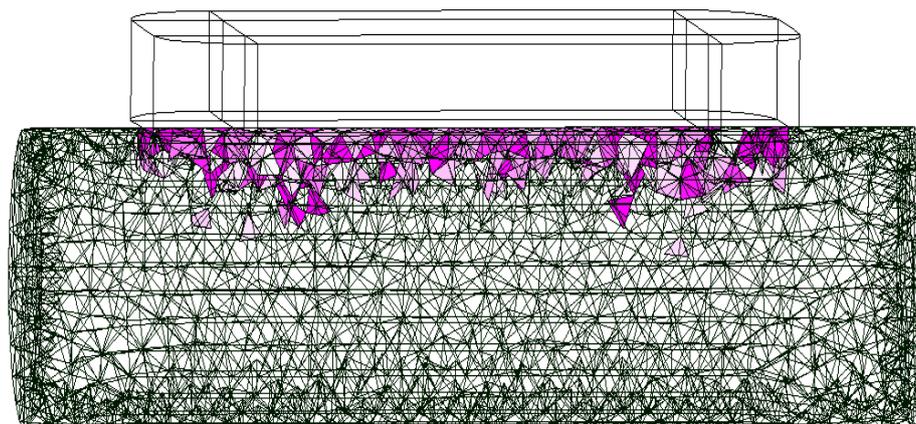
Pour consolider les constatations précédentes, nous traitons le cas d'une concentration un peu importante  $C_g = 1.18\%$ . Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 3.19.



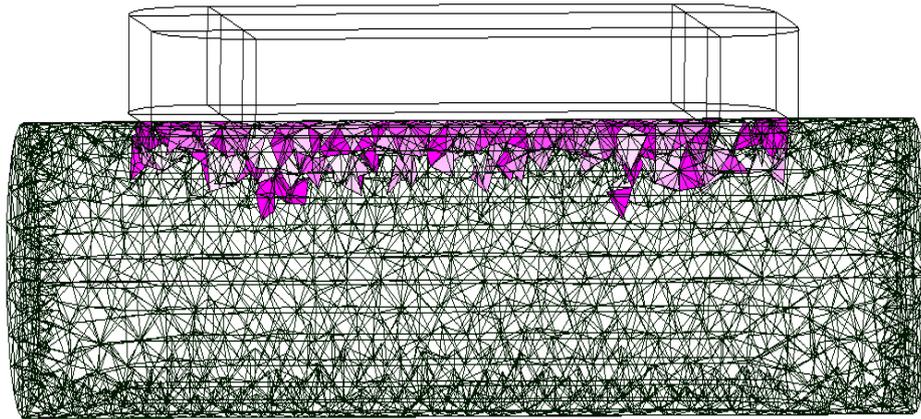
**Distribution de la concentration à  $t = 0.2406$  s**



**Distribution de la concentration à  $t = 0.4006$  s**



**Distribution de la concentration à  $t = 0.5506$  s**

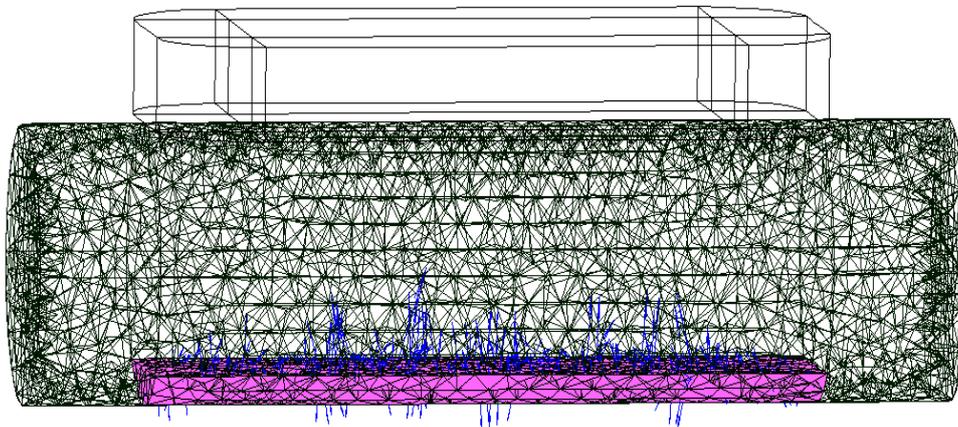


**Distribution de la concentration à  $t = 0.8806$  s**

**Figure 3.19. Evolution de la concentration locale des particules du dépôt final des particules dans le cas d'une concentration globale  $C_g = 1.18$  %.**

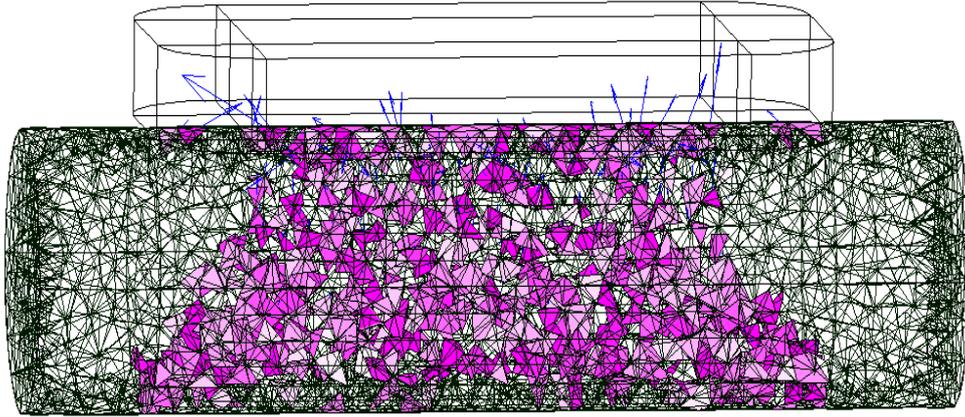
Pour cette concentration globale  $C_g = 1.18$  %, les conditions de calcul mentionnées auparavant ont donné un temps de séparation totale  $t = 0.9012$  s.

Pour estimer l'effet de l'interaction magnétique DD sur la capture, nous avons traité le cas d'une concentration globale plus élevée  $C_g = 2.34$  %. La distribution initiale (à  $t = 0$ ) de la concentration des particules et la densité de force magnétique locale appliquée est montrée dans la figure 3.20.



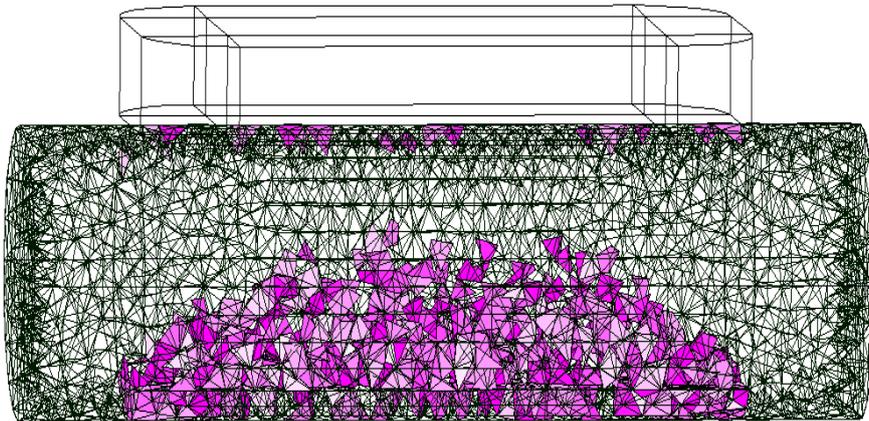
**Figure 3.20. Champ de la densité de force magnétique à  $t = 0$**

Sur la figure, on voit des forces répulsives plus importantes appliquées aux particules situées au fond du canal. Pour montrer le changement de la direction de ces forces lors du mouvement des particules situées au-dessus et qui conduit ainsi à leur capture, on présente la distribution de la concentration ainsi que la densité de force à un temps  $t = 0.14$  s.

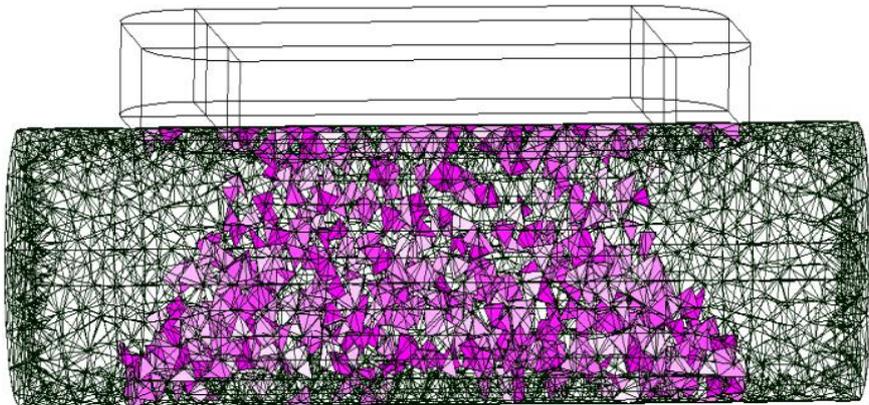


**Figure 3.21. Champ de la densité de force magnétique à  $t = 0.14s$**

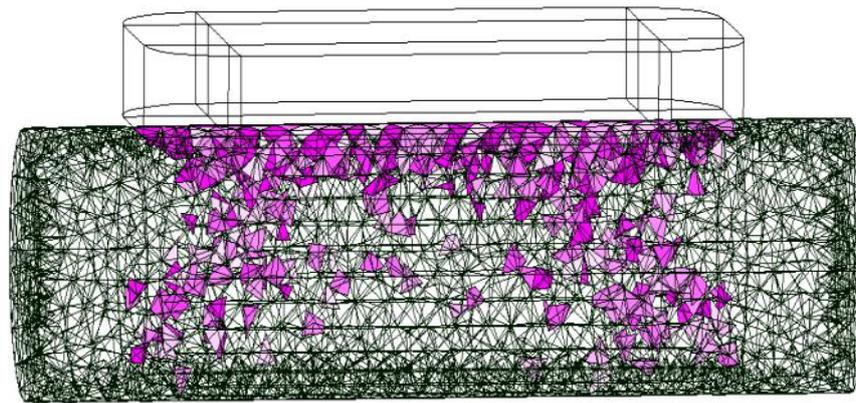
L'évolution de la concentration ainsi que le dépôt des particules séparées durant le processus de séparation est présentée dans la figure suivante :



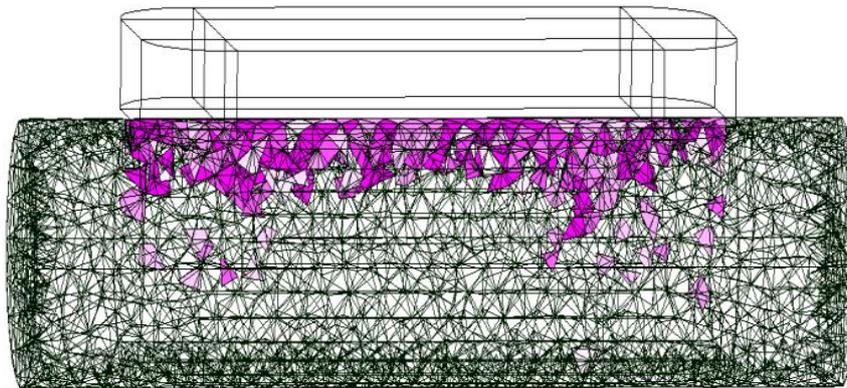
**Distribution de la concentration à  $t = 0.1 s$ .**



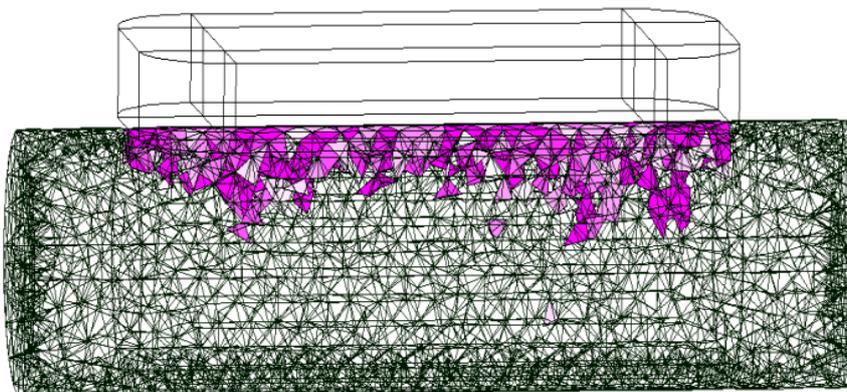
**Distribution de la concentration à  $t = 0.14 s$ .**



Distribution de la concentration à  $t = 0.2406$  s.



Distribution de la concentration à  $t = 0.3466$  s.



Distribution de la concentration à  $t = 0.4600$  s.

**Figure 3.22.** Evolution du dépôt des particules dans le cas d'une concentration globale  $C_g=2.34\%$ .

L'inspection des résultats de la figure ci-dessus montre une évolution de la couleur de quelques éléments. Dans ces éléments, la couleur devient plus intensité ce qui signifie que la concentration a augmenté suite à une agglomération des particules.

Comparativement au cas d'une concentration  $C_g = 1.18 \%$ , pour laquelle un temps total de séparation  $t = 0.6$  s est obtenu. L'augmentation de la concentration a considérablement réduit

le temps de séparation. Ce fait n'est lié qu'au phénomène de l'agglomération local des particules qui a conduit à des zones d'attraction locale.

### 3.4.7. Traitement d'un liquide en écoulement

Dans cette section, nous présentons les résultats du traitement d'un écoulement d'eau à une vitesse moyenne  $U_{\text{moy}} = 0.5$  m/s dans un canal de diamètre  $D = 3 \times 10^{-2}$  m. Le capteur est alimenté en continu par un courant d'intensité  $I = 10$  A. Pour réduire le temps de calcul, nous avons traité le cas d'une seule injection d'un volume de particules de particules ce qui a donné une concentration globale  $C_g = 0.36$  % de la quantité d'eau traité (voir Fig. 3.23).

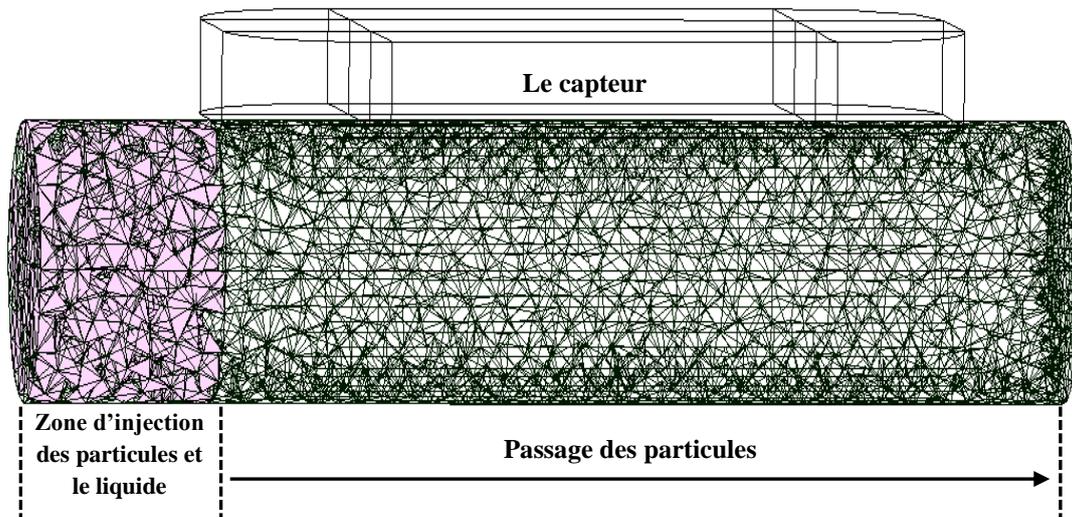
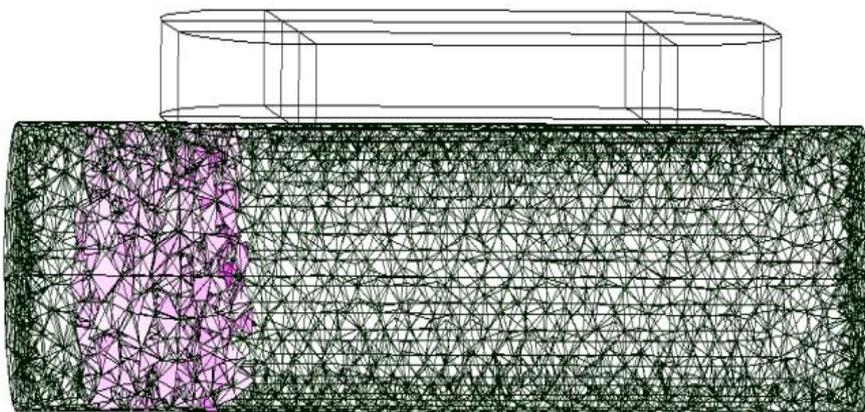
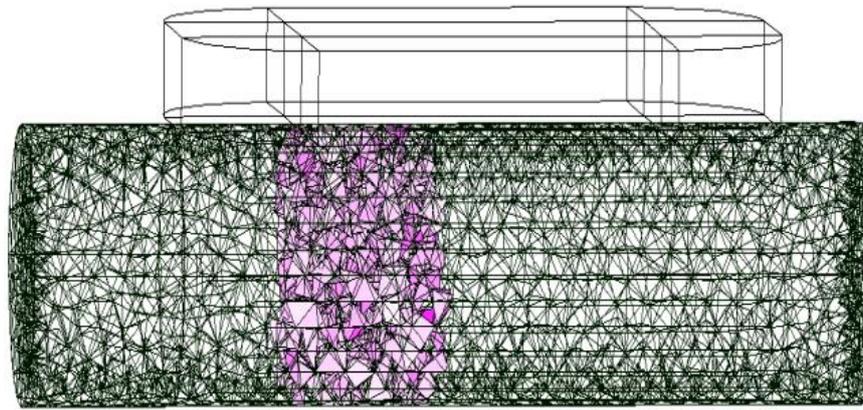


Figure 3.23. Injection des particules à l'entrée du canal.

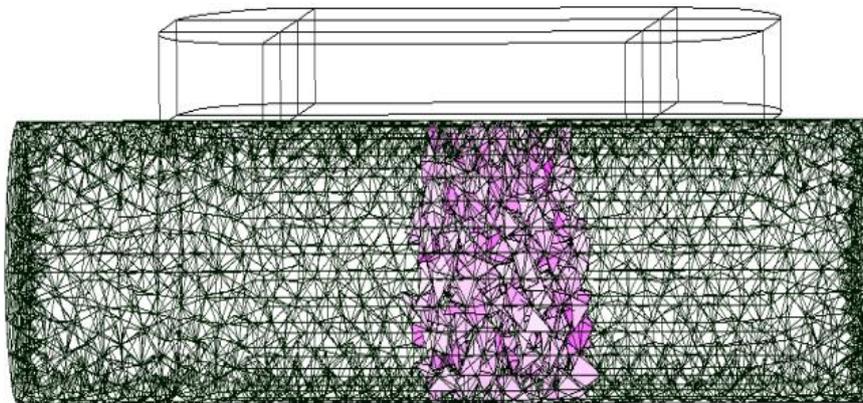
Pour vérifier la capacité de l'approche à prendre en compte les forces hydrodynamiques, nous avons étudié l'évolution de la concentration des particules en absence du champ magnétique (le capteur n'est pas excité). Pour un pas de temps de calcul  $\Delta t = 2 \times 10^{-3}$  s, nous avons obtenu les résultats suivants :



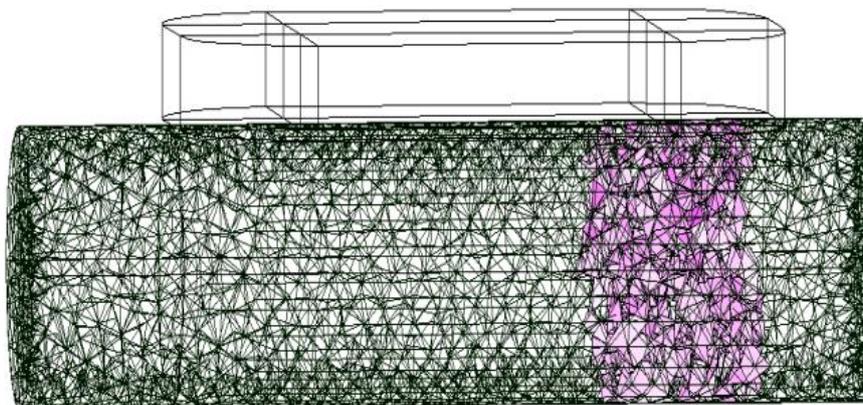
Distribution de la concentration à  $t = 0.1$  s



Distribution de la concentration à  $t = 0.18$  s



Distribution de la concentration à  $t = 0.26$  s



Distribution de la concentration à  $t = 0.32$  s

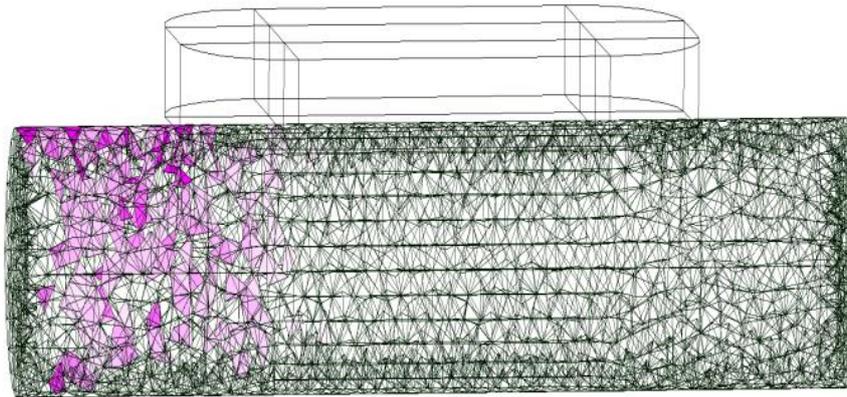
**Figure 3.24. Déplacement du volume injecté des particules avec l'écoulement.**

Sur la figure, on voit clairement le déplacement des particules avec l'écoulement. Le changement de l'intensité de couleur (augmentation de la concentration) n'est pas le résultat de l'agglomération des particules dû à l'effet des interactions magnétiques mais il est le résultat de la variation de la taille des éléments qui reçoit les particules. Ça veut dire que si les particules qui occupent un élément de volume important se déplacent, elles peuvent trouver

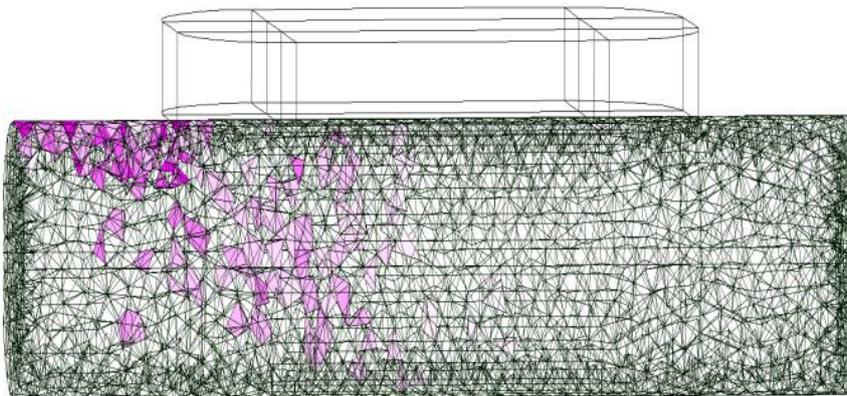
un élément de volume très petit. Ce dernier élément sera rempli complètement et l'intensité de sa couleur devient plus intense.

Pour vérifier la capacité de notre approche à prendre en compte la force magnétique principale et celle liée aux interactions particulières magnétiques, nous avons résolu le problème de la séparation pour une excitation du capteur par un courant  $I = 2$  A.

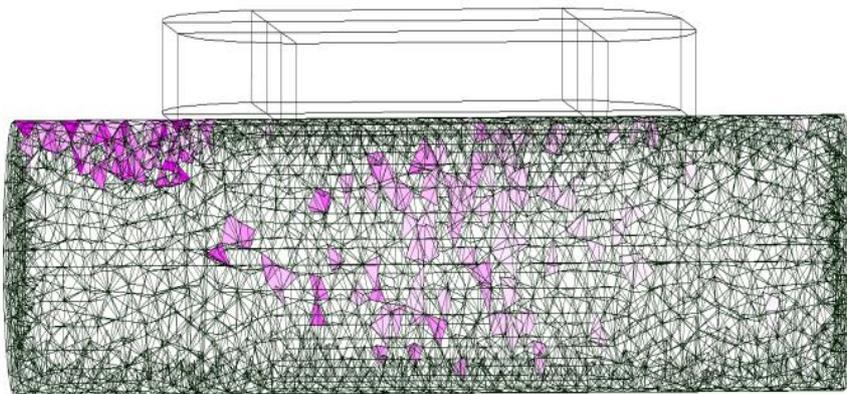
Pour une concentration globale  $C_g = 0.36$  % en particules de perméabilité relative  $\mu_r = 80$ , nous avons obtenu l'évolution de la concentration locale présentée dans la figure suivante :



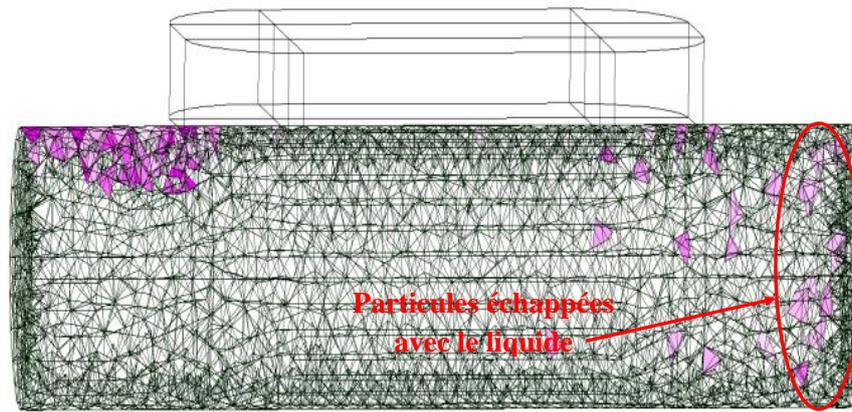
**Distribution de la concentration à  $t = 0.11$  s**



**Distribution de la concentration à  $t = 0.16$  s**



**Distribution de la concentration à  $t = 0.24$  s**



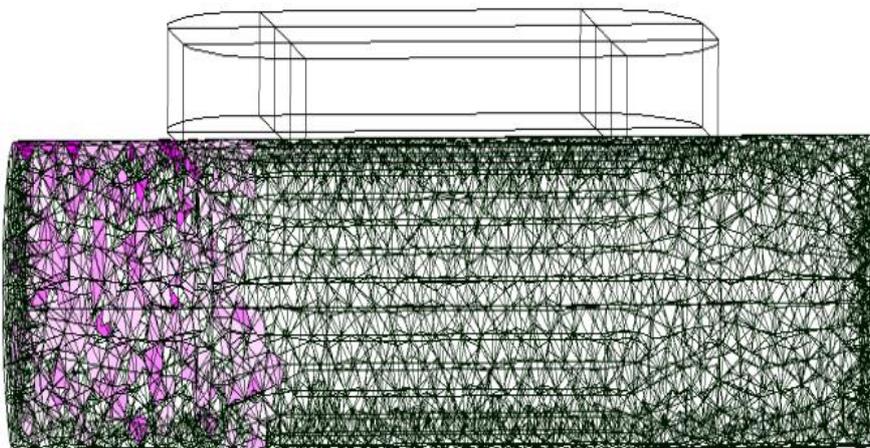
**Distribution de la concentration à  $t = 0.4$  s**

**Figure 3.25. Evolution de la dispersion des particules ainsi que leur dépôt dynamique pour une concentration globale  $C_g = 0.36$  %.**

La figure montre que pour l'écoulement considéré, l'excitation appliquée  $I = 2$  A ne permet qu'une séparation partielle. Sauf les particules initialement situées plus proche du capteur ont été capturées. Les autres particules ont été portées par l'écoulement.

Les particules capturées sont déposées à l'entrée du capteur à cause de la vitesse d'écoulement relativement faible à côté des parois du canal. Pour les conditions de calcul adoptées, un taux de capture  $\xi = 60.1$  % a été obtenu.

Pour améliorer le rendement de la séparation, nous avons augmenté le courant d'excitation. Pour un courant d'excitation  $I = 10$  A, les mêmes spécifications d'écoulement ont donné les résultats de la figure suivante :



**Distribution de la concentration à  $t = 0.1$  s**

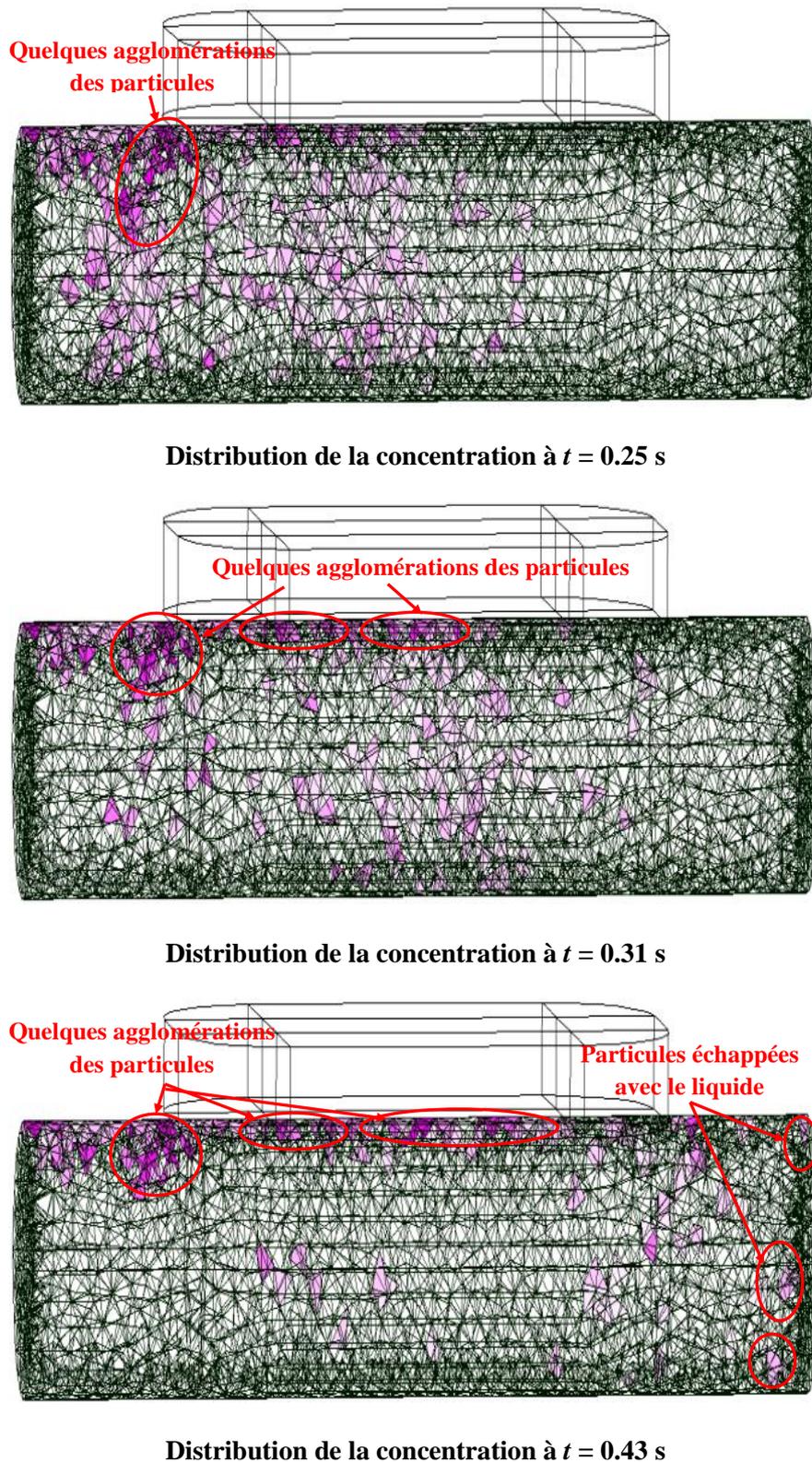


Figure 3.26. Evolution de la dispersion des particules pour un courant d'excitation  $I = 10$  A.

Pour une excitation  $I = 10$  A, la capture a été fortement améliorée. Le taux de capture calculé est  $\xi = 86$  %.

### 3.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simulation de la séparation magnétique. il s'agissait du calcul du comportement des particules ce qui a permis d'estimer la capacité des modèles mathématiques développés à prendre en compte d'une manière correcte les effets des actions appliquées. Un premier calcul fait sans tenir compte des interactions magnétiques dipolaires entre les particules a permis le calcul des trajectoires des particules et l'identification du lieu de dépôt statique des particules séparées. Cette approche de calcul nécessitant un temps de calcul réduit va être exploitée pour effectuer une étape d'optimisation du prototype proposé.

Dans une deuxième étape, nous avons effectué un calcul 3D avec la prise en compte de l'effet de l'interaction magnétique dipolaire. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de l'excitation peut fortement améliorer les performances du séparateur. Les résultats obtenus ont approuvé les capacités de l'approche à prendre en compte les effets des interactions magnétiques dipolaires ainsi que les agglomérations des particules.

# **Chapitre 4**

## **Optimisation du séparateur magnétique proposé**

#### 4. Optimisation du séparateur proposé

La réalisation d'une séparation magnétique avec un meilleur rendement exige l'application d'un champ magnétique efficace qui peut être obtenu par l'optimisation du dispositif proposé. Dans le cas d'utilisation des électroaimants comme source de champ, l'optimisation peut concerner la recherche du courant d'excitation et des paramètres géométriques qui permettent l'obtention d'une configuration spécifique du champ.

Dans notre cas, le dispositif de séparation proposé est constitué d'un arrangement d'inducteurs identiques montés sur le périmètre d'un canal dans lequel le matériau liquide (eau) à traiter s'écoule où chaque inducteur joue le rôle d'un capteur de particule.

L'optimisation de ce dispositif a été effectuée en deux étapes. Dans une première étape, nous avons optimisé le capteur élémentaire et dans une deuxième étape, nous avons effectué une optimisation globale du dispositif. Pour cela, différentes structures ont été proposées en fonction des spécifications des applications envisagées.

##### 4.1. Optimisation du capteur élémentaire (électroaimant)

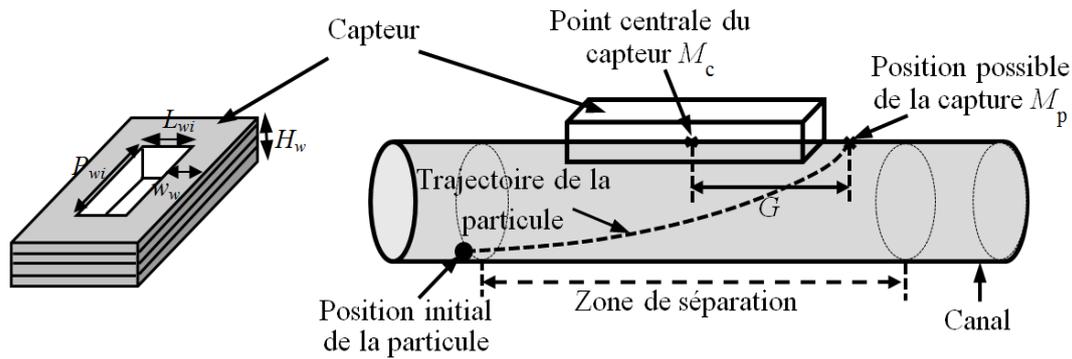
Dans la forme de séparation proposée, le capteur élémentaire de particule est un électroaimant à bobinage conventionnel (fil en cuivre) de forme géométrique rectangulaire alimenté en continu. L'optimisation de ce capteur concerne la recherche de l'intensité de courant d'excitation et de ses paramètres géométriques qui permettent l'extraction des particules de fer de taille fine (supposée sphérique) d'un écoulement d'eau dans un canal cylindrique. Les différents paramètres géométriques et physiques des particules et de l'écoulement à traiter sont montrés dans le tableau 4.1.

Rayon des particules $R_p$ (m)	$3 \times 10^{-5}$
Densité volumique de la particule $\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	7860
Perméabilité magnétique de la particule $\mu_r$	80
Profondeur interne du capteur élémentaire $P_{wi}$ (m)	$6 \times 10^{-2}$
Largeur interne du capteur élémentaire $L_{wi}$ (m)	$2 \times 10^{-2}$
Diamètre du canal $D$ (m)	$2.5 \times 10^{-2}$
Viscosité dynamique de l'eau $\eta$ (kg/m.s)	$10^{-3}$
Densité de masse de l'eau $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Vitesse moyenne de l'écoulement $U_{moy}$ (m/s)	0.5

**Tableau 4.1. Données géométriques et physiques de la particule et de l'écoulement.**

Pour les données du tableau 4.1, un nombre de Reynolds  $R_e = 12500$  est obtenu ce qui signifie que le régime d'écoulement est turbulent.

La forme du capteur et sa position par rapport à l'écoulement sont illustrés dans la figure 4.1.



**Figure 4.1 : Forme géométrique du capteur élémentaire et différents paramètres d'optimisation.**

#### 4.1.1. Fonction objectif et paramètres optimisés

Pour l'optimisation du capteur, nous avons considéré que la séparation soit parfaite si la capture des particules est obtenue au niveau du point central de l'élément capteur. De cela, notre optimisation a été basée sur la recherche du dimensionnement du capteur et de son courant d'excitation qui permettent la réalisation de telle capture. Afin de réduire le coût d'optimisation, nous avons limité la recherche à la hauteur du bobinage  $H_w$ , sa largeur  $w_w$  et le courant d'excitation  $I$  (voir fig. 4.1). Les autres dimensions, profondeur interne  $P_{wi}$  et largeur interne  $L_{wi}$  sont fixés au départ.

La force magnétique responsable à la capture dépend directement du champ généré par la force magnétomotrice donnée par :

$$f_{mm} = \Sigma H \cdot l = NI \quad (4.1)$$

Ici  $H$  est l'intensité du champ magnétique,  $l$  est la longueur du circuit magnétique,  $N$  est le nombre de spires du bobinage et  $I$  est le courant d'excitation.

Du fait que le nombre de spires est fonction de la forme et dimensionnement du capteur, et selon (4.1), on conclut que la force magnétique est fonction indirecte des paramètres géométriques du capteur. On peut alors écrire pour la force magnétique :

$$f_m = f(H_w, w_w, I) \quad (4.2)$$

Ici  $f$  désigne fonction.

Le mouvement de toute particule est régi principalement par la force magnétique appliquée. Alors, la position de sa capture  $M_p$  est donc influencée par le dimensionnement du capteur et le courant d'excitation. Pour cela, et en considérant un point de référence  $O$ , la distance entre le point de référence et la position de capture  $M_p$  est fonction indirecte des paramètres recherchés.

$$OM_P = f(H_w, w_w, I) \quad (4.3)$$

Tenant compte du point central du capteur  $M_C$ , la distance entre ce point et la position de la capture de la particule  $M_P$  qui représente ainsi la fonction à minimiser  $G$  est exprimée par

$$G = |\overline{OM_C} - \overline{OM_P}| = |\overline{M_P M_C}| = f(H_w, w_w, I) \quad (4.4)$$

#### 4.1.2. Méthode de minimisation appliquée

Pour minimiser une fonction, plusieurs méthodes peuvent être appliquées [Porte 02], [Ciuperca 12]. Dans notre cas, et tenant compte de sa simplicité à mettre en œuvre et sa capacité de prendre en charge les particularités de notre fonction objectif, nous avons choisi la méthode de recherche de *Tabou* [Berthiau 94], [Mehasni 07].

#### 4.1.3. Processus de minimisation et étapes suivies

Dans le processus de minimisation, le problème hydraulique est résolu une seule fois au départ ce qui donne une distribution inchangeable de la vitesse de l'écoulement. Lors de la minimisation, sauf les problèmes magnétique et dynamique particulière sont résolus à chaque pas de calcul. Afin de réduire le coût d'optimisation, nous n'avons considéré qu'une seule particule initialement située à une position plus loin du capteur. De telle position a été choisie en fonction des spécifications du champ appliqué et de l'écoulement définies par une analyse de leurs distributions dans la région de séparation. Selon le principe de la méthode *Tabou*, la minimisation de la fonction  $G$  est effectuée selon les étapes suivantes :

1. On choisit aléatoirement et on stocke des valeurs initiales (solution initiale) des paramètres à rechercher  $H_{w0}$ ,  $w_{w0}$  et  $I_0$ . On construit la géométrie relative à ces valeurs initiales, on calcule la répartition de la force magnétique dans la zone de séparation et on résout l'équation dynamique de la particule. La position finale obtenue à partir du calcul de la trajectoire de la particule nous permet d'évaluer la fonction objectif  $G$ . Les valeurs  $H_{w0}$ ,  $w_{w0}$  et  $I_0$  sont stockées dans la matrice *Tabou*. Les meilleures valeurs liées à la valeur acceptée de la fonction  $G$  sont stockées dans une autre matrice.
2. On perturbe la solution initiale  $H_{w0}$ ,  $w_{w0}$  et  $I_0$  par génération de  $m$  voisins de chaque paramètre  $H_w$ ,  $w_w$  et  $I$ . Si ces voisins n'existent pas dans la matrice *Tabou*, on construit la géométrie liée à chaque ensemble  $H_{wm}$ ,  $w_{wm}$  et  $I_m$ , et on calcule les trajectoires de la particule pour tous les cas de l'ensemble  $m$  des paramètres générés, et ensuite on stocke la valeur minimale des fonctions objectif trouvées et les paramètres  $H_w$ ,  $w_w$  et  $I$  liées à cette valeur minimale (les bonnes valeurs) dans la matrice *Tabou*. Si le critère de convergence  $|G_{\text{récent}} - G_{\text{ancienne}}| > \varepsilon$ , on ira à l'étape 3.

- On exécute itérativement l'étape 2 avec stockage des nouvelles solutions des paramètres  $H_{wm}$ ,  $w_{wm}$ ,  $I_m$  et la fonction objectif, jusqu'à ce que le critère de convergence est atteint. Les valeurs optimales finales  $H_{wf}$ ,  $w_{wf}$  et  $I_f$  sont celles liées à la valeur minimale des fonctions objectif stockées.

Pour une meilleure compréhension du processus de minimisation, nous présentons les étapes d'exécutions dans le schéma synoptique de la figure 4.2.

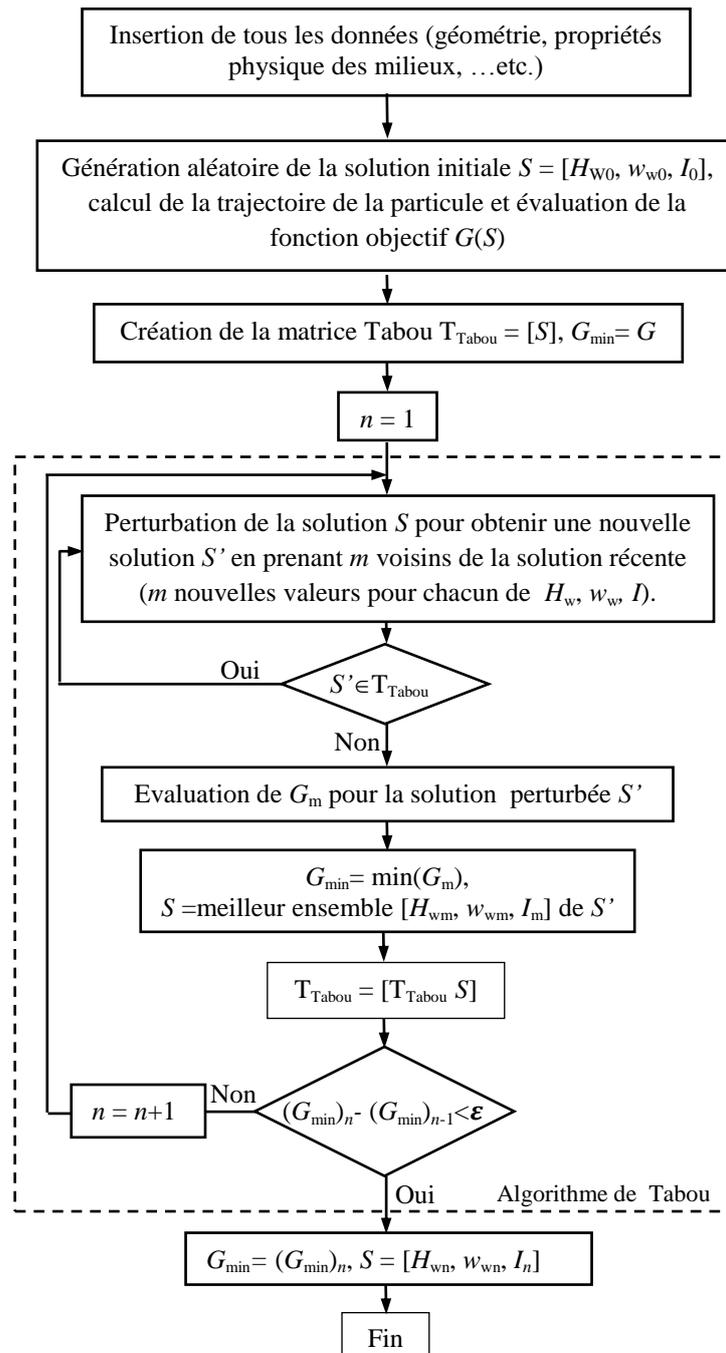


Figure 4.2. Processus d'optimisation.

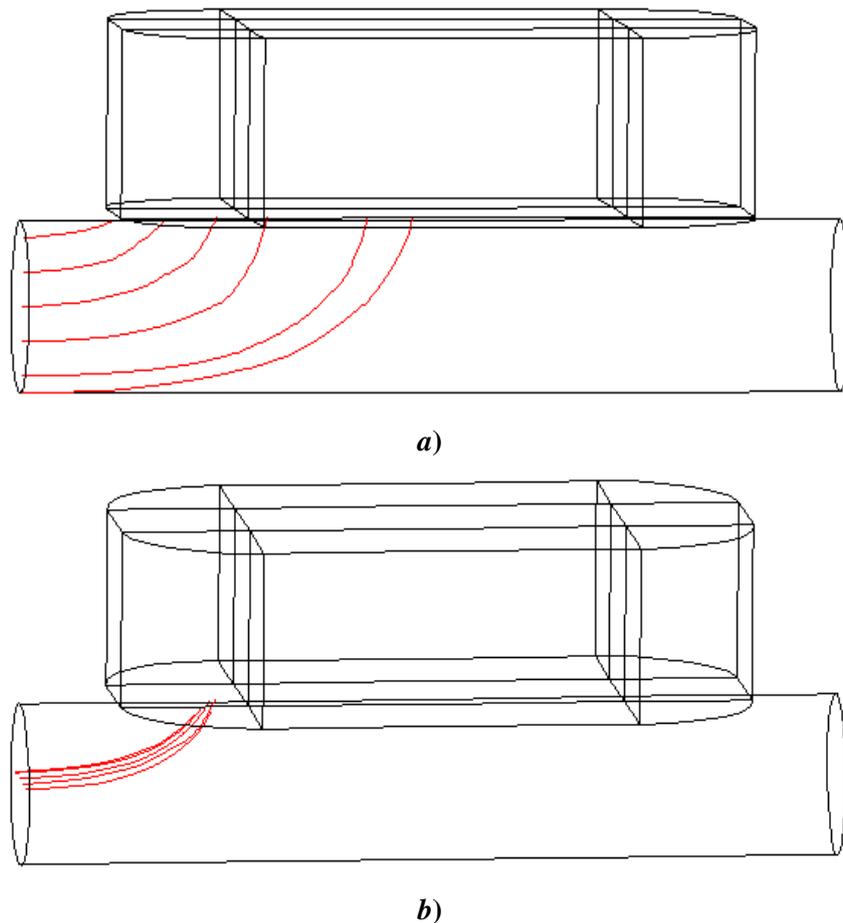
#### 4.1.4. Résultat d'optimisation

Pour les données du tableau précédent, et après 42 itérations d'exécution du processus de minimisation, nous avons obtenu les résultats du tableau suivant :

Courant d'excitation $I_f$ (A)	Hauteur du capteur $H_{wf}$ (m)	Largeur du capteur $w_{wf}$ (m)	Fonction objectif $G_{min}$ (m)
9.72	$2.74 \times 10^{-2}$	$2.02 \times 10^{-2}$	$35 \times 10^{-5}$

**Tableau 4.2. Les résultats d'optimisation obtenus.**

Pour vérifier ces résultats, nous avons calculé les trajectoires de six particules situées initialement dans différentes positions. Pour deux alignements vertical et horizontal de ces particules, nous avons obtenus les résultats de la figure suivante :



**Figure 4.3. Trajectoires obtenues par les paramètres optimisés. a) cas de particules alignées verticalement. b) cas de particules alignées horizontalement.**

La figure montre que toutes les particules ont été capturées avant leur passage du centre par le capteur. La particule sur laquelle nous avons basé notre optimisation a été capturée plus près du point central du capteur.

## 4.2. Optimisation des séparateurs magnétiques proposés

Dans cette section, on présente les approches appliquées pour optimiser des séparateurs magnétiques proposés pour le traitement de l'eau en écoulement. La diversification des configurations du séparateur est liée principalement aux régimes d'écoulement traités. A chaque fois la vitesse d'écoulement et le diamètre du canal augmentent, on se trouve dans l'obligation de multiplier le nombre de capteurs et de choisir convenablement leur installation par rapport à l'écoulement.

### 4.2.1. Optimisation d'un séparateur constitué d'une cascade de deux capteurs

#### 4.2.1.1. Forme géométrique du séparateur et conditions d'optimisation

Pour la purification d'un écoulement d'eau à une vitesse  $U_{\text{moy}} = 1.1$  m/s dans un canal de diamètre  $D = 3.1 \times 10^{-2}$  m, nous avons proposé et optimisé un séparateur magnétique formé de deux capteurs identiques placés en cascade sur le périmètre du canal et alimentés en série. L'approche d'optimisation est basée sur la minimisation d'une fonction objectif qui est la distance entre la position de capture d'une particule et le centre du deuxième capteur. Il s'agit de la recherche de la distance entre les deux capteurs et l'intensité de courant d'excitation qui permettent d'assurer la capture de toute particule avant son arrivée au centre du deuxième capteur. La configuration du capteur et les conditions d'optimisation sont montrées dans la figure suivante :

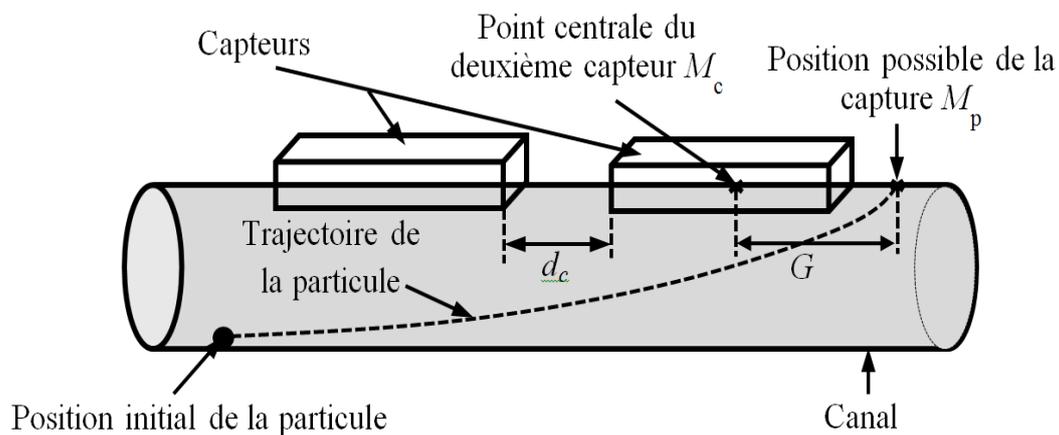
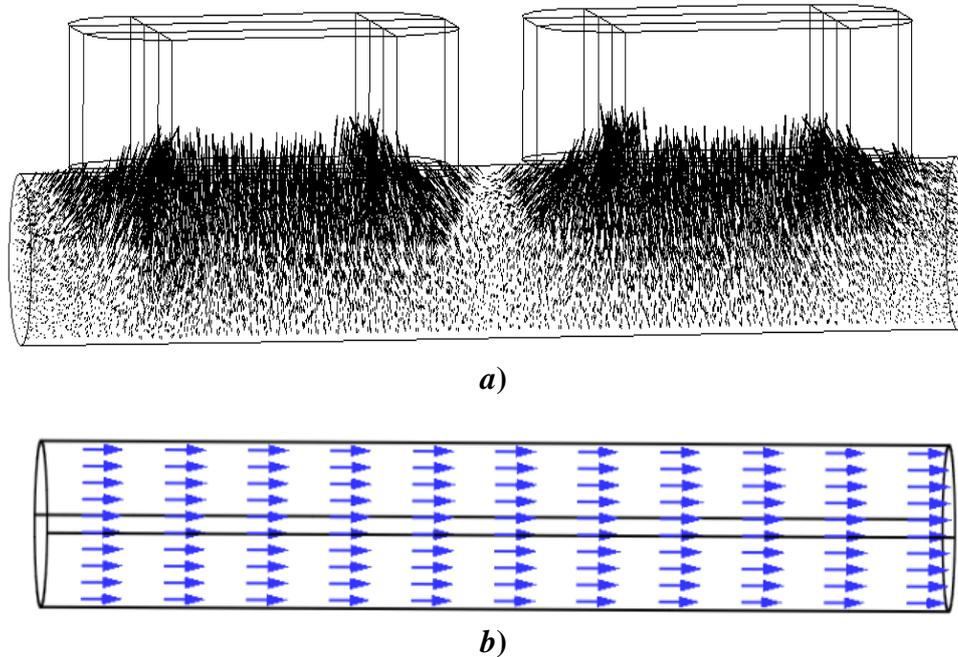


Figure 4.4. Séparateur magnétique constitué d'une cascade de deux capteurs identiques.

#### 4.2.1.2. Résultats d'optimisation

Le processus d'optimisation est basé sur un calcul itératif des trajectoires de la particule. Pour cela, on calcule pour chaque cas les distributions de la force magnétique et de la vitesse d'écoulement dans la région où la séparation se produit. Pour montrer le caractère attractif de

la force magnétique et les régions de sa concentration et le régime d'écoulement, on présente dans la figure suivante les distributions de la force magnétique et de la vitesse d'écoulement au voisinage des capteurs pour une distance  $d_c = 1.5 \times 10^{-2} \text{m}$  entre les capteurs et un courant d'excitation  $I = 7 \text{A}$ .



**Figure 4.5. Distributions de la force magnétique et de la vitesse d'écoulement dans la région de séparation. a) Distribution de la force magnétique, b) Distribution de la vitesse de l'écoulement.**

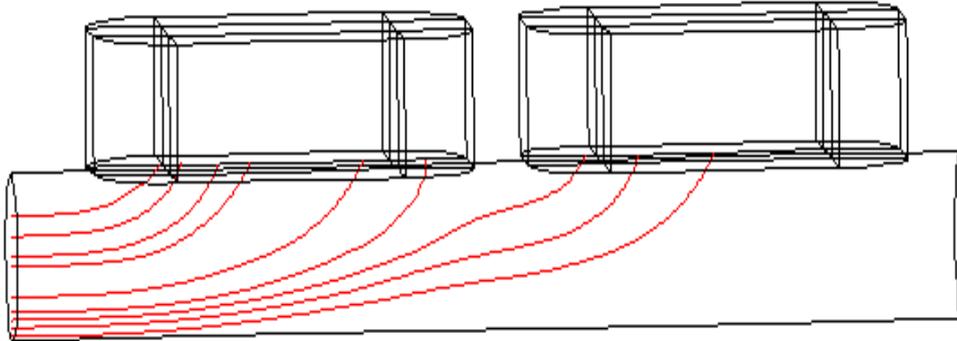
La figure 4.5.a montre que la force magnétique est fortement concentrée sous les capteurs. Une zone à très faible concentration de la force existe entre les deux capteurs. La minimisation de cette zone peut conduire à une force quasi homogène sous les capteurs. La figure 4.5.b montre que les conditions d'écoulement adoptées ont donné un régime d'écoulement turbulent (vitesse quasi homogène le long du diamètre du canal sauf sur les parois).

Après 35 itérations de calcul du processus d'optimisation, nous avons obtenu une valeur minimale de la fonction objectif  $G_{\min} = 5.1 \times 10^{-4} \text{m}$ . Les paramètres optimisés liés à cette valeur sont présentés dans le tableau suivant :

Courant d'excitation $I_{\text{excf}} \text{ (A)}$	Distance entre les capteurs $d_{\text{cf}} \text{ (m)}$	Fonction objectif $G_{\min} \text{ (m)}$
7.56	$1.22 \times 10^{-2}$	$5.1 \times 10^{-4}$

**Tableau 4.3. Les résultats des paramètres recherchés.**

Pour vérifier ces résultats, nous avons calculé les trajectoires d'un ensemble de particules initialement situées à des positions différentes et alignées verticalement. Les trajectoires ainsi que les lieux de capture des particules sont montrés dans la figure suivante :



**Figure 4.6. Trajectoires des particules obtenues par le séparateur optimisé.**

Selon les trajectoires obtenues, toutes les particules ont été capturées avant leur arrivée au point central du deuxième capteur ce qui vérifie les performances recherchées du séparateur proposé.

Lorsqu'il s'agit des écoulements d'eau dans un canal de diamètre important, le séparateur optimisé ne peut pas être utilisé car, il fournit des forces qui ne sont pas capable d'attirer les particules situées en bas du canal. Pour cela, on propose une autre configuration à capteur multiple.

#### **4.2.2. Optimisation d'un séparateur destiné aux écoulements à diamètre important**

Dans cette section, on présente l'approche appliquée pour optimiser la configuration d'un séparateur constitué d'un arrangement circulaire de plusieurs capteurs identiques installés sur le périmètre du canal.

##### **4.2.2.1. Approche d'optimisation et configurations traitées**

L'objectif de notre optimisation est la recherche du nombre de capteurs nécessaires et leur positionnement sur le périmètre du canal qui permettent la séparation de particules de fer (voir tableau 4.1) d'un écoulement d'eau à une vitesse moyenne  $U_{\text{moy}} = 0.2$  m/s dans un canal de diamètre  $D = 5 \times 10^{-2}$  m. L'approche appliquée est basée sur l'estimation et la comparaison entre les performances de séparation de plusieurs configurations du séparateur. Pour estimer les performances de séparation liée à une configuration donnée, nous définissons les lieux de capture (dépôt final) d'un ensemble de particules et nous évoluons le temps total de leur capture. Pour des raisons techniques et économiques (coût d'investissement et possibilité

d'installation), le nombre de capteurs à utiliser est limité préalablement à trois. Les différentes configurations proposées et traitées sont présentées dans la figure suivante :

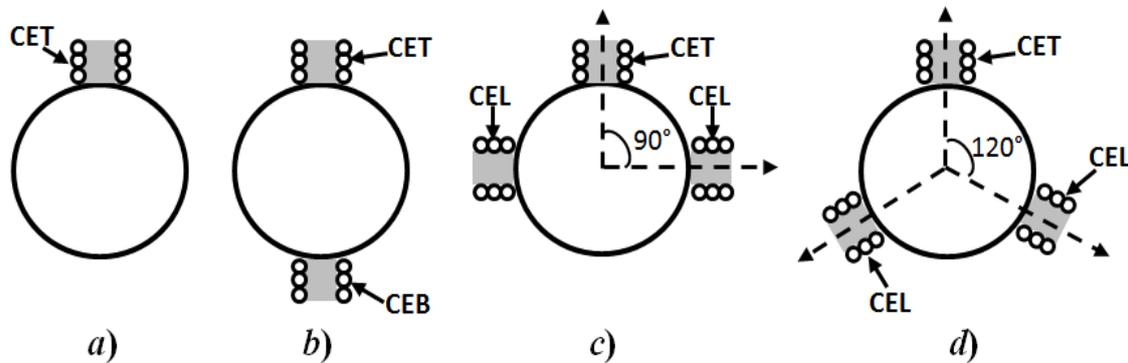


Figure. 4.7. Schéma 2D des cas traités de configurations du séparateur, *a)* un seul capteur, *b)* deux capteurs, *c)* trois capteurs décalés entre eux d'un angle de  $90^\circ$ , *d)* trois capteurs décalés entre eux d'un angle de  $120^\circ$  (CET signifie capteur élémentaire du top, CEB signifie capteur élémentaire du bas, CEL signifie capteur élémentaire du latérale).

#### 4.2.2.2. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal

Pour les données d'écoulement mentionnées précédemment, nous avons obtenu un nombre de Reynolds  $Re = 10^4$  qui signifie que le régime d'écoulement est turbulent. La distribution de la vitesse dans la région de séparation est montrée dans la figure suivante :

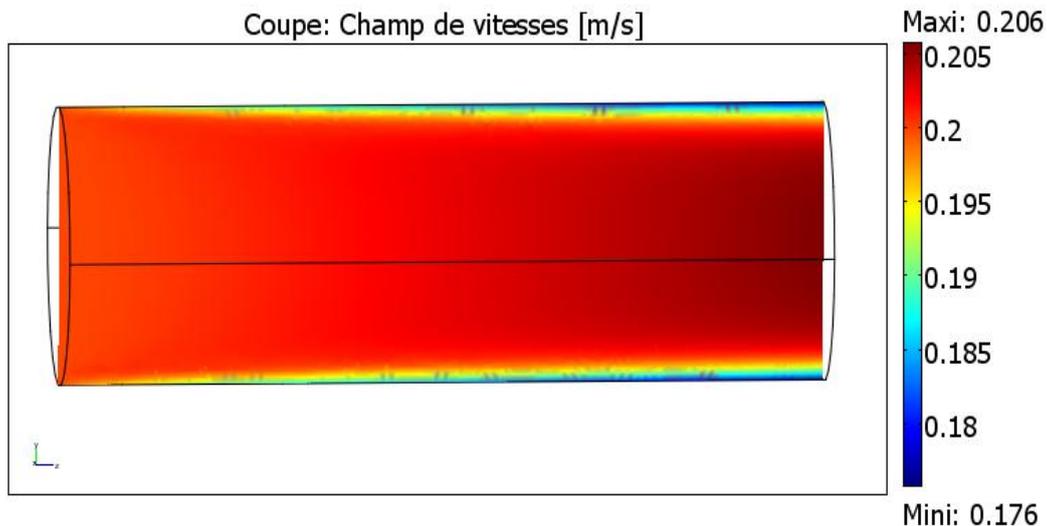


Figure. 4.8. Distribution de la vitesse d'écoulement dans le canal plus proche des capteurs

Pour mieux comprendre le régime d'écoulement et pour une lecture quantitative, on présente dans la figure suivante le profil de vitesse calculé à une distance  $Z = 0.1$  m (voir figure 4.9).

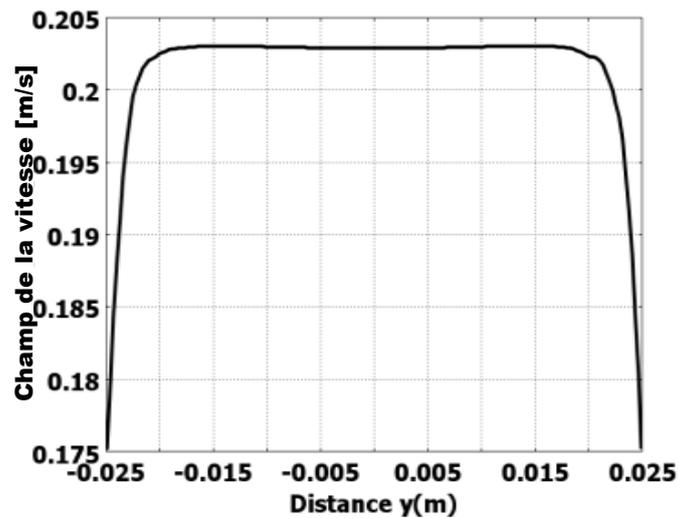


Figure. 4.9. Profil de la vitesse d'écoulement.

Le profil vérifie clairement le régime turbulent de l'écoulement.

#### 4.2.2.3. Distribution de la force pour les cas traités

Pour montrer le caractère attractif de la force magnétique, nous présentons dans les figures suivantes les distributions de la force magnétique dans la région de séparation liée à chaque configuration.

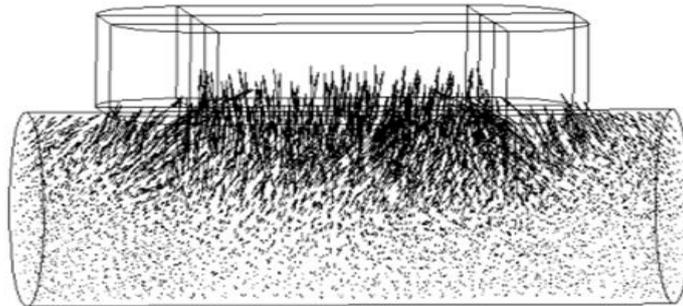


Figure. 4.10.a. Distribution de la densité de force magnétique pour le cas d'un séparateur à un seul capteur.

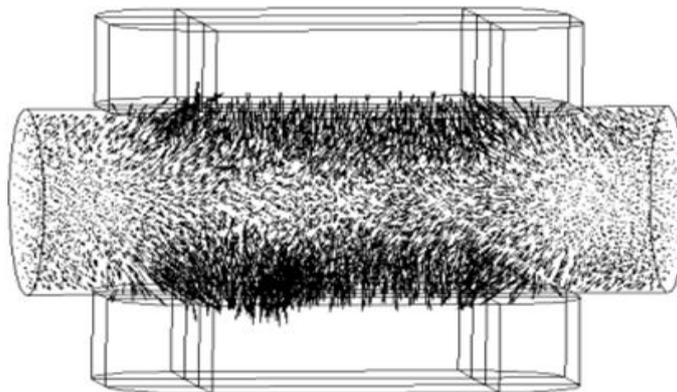
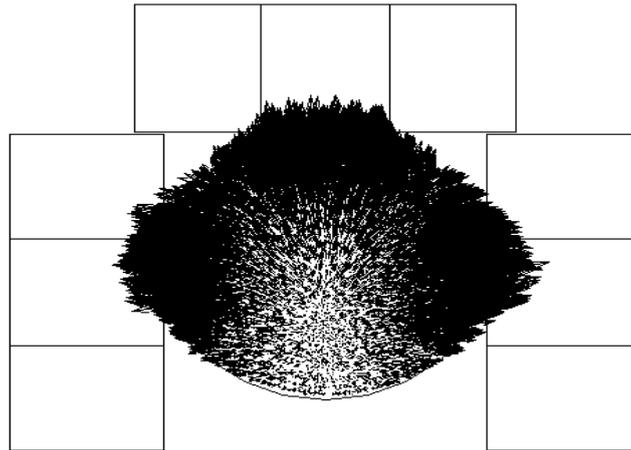
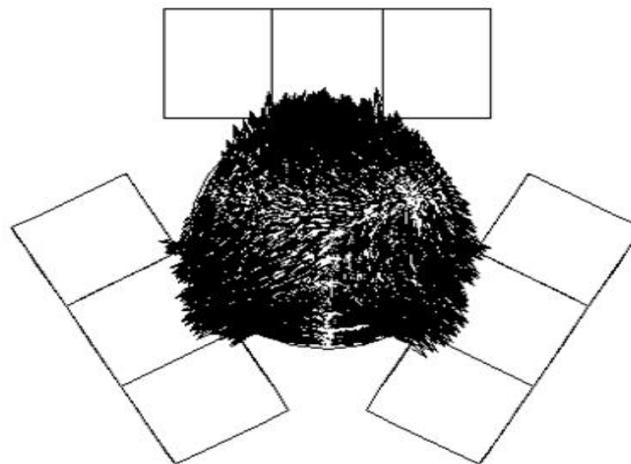


Fig.4.10.b. Distribution de la densité de force magnétique pour le cas d'un séparateur à deux capteurs.



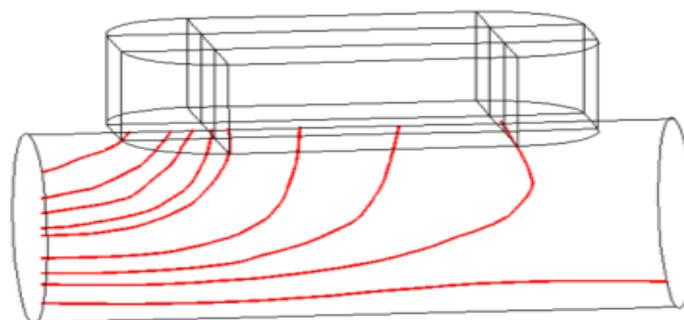
**Fig.4.10.c. Distribution de la densité de la force magnétique pour le cas d'un séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle de  $90^\circ$**



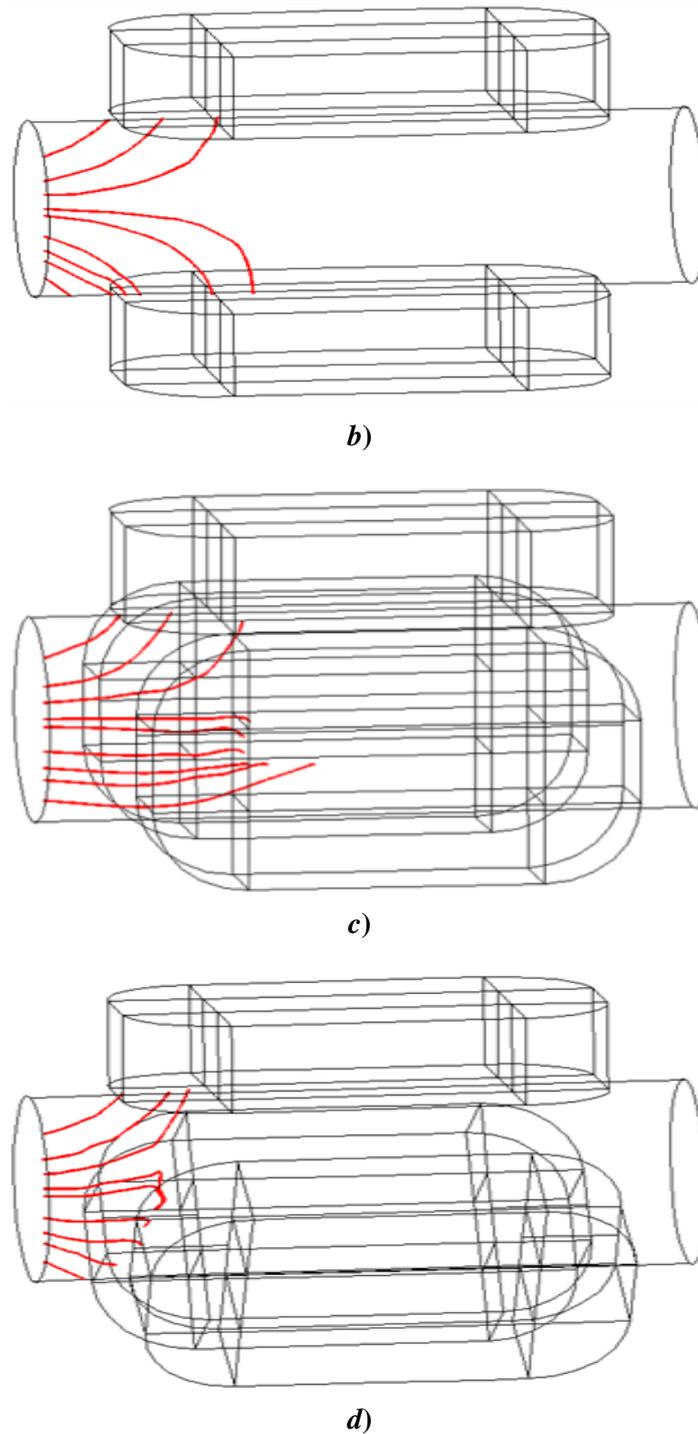
**Fig.4.10.d. Distribution de la densité de la force magnétique pour le cas d'un séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle de  $120^\circ$**

Les figures ci-dessus montrent qu'il s'agit des forces attractives dirigées vers les capteurs. Les zones de concentration indiquent les lieux probables de dépôts des particules séparées.

L'estimation du lieu de dépôt final de particules séparées et du temps total de séparation est basée sur le calcul des trajectoires des particules. Les trajectoires traduisant les performances de chaque type de configuration sont présentées dans la figure suivante :



a)



**Figure. 4.11. Trajectoires des particules pour les cas traités.**

La figure 4.11 montre que pour l'écoulement considéré, le cas d'un seul capteur ne permet qu'une capture partielle. Les particules situées en bas ont échappé avec l'écoulement. Les autres cas ont permis une séparation totale de toutes les particules considérées. Pour savoir la configuration qui donne les meilleures performances, nous avons calculé et comparé entre les temps de séparation totale. Les conditions de calcul précitées ont donné les résultats du tableau suivant :

Configuration du séparateur	Un seul capteur Cas (a)	Deux capteurs Cas (b)	Trois capteurs 90° Cas (c)	Trois capteurs 120° Cas (d)
Temps total de capture (s)	Capture partielle	0.5306	0.6044	0.4298

**Tableau 4.4. Temps de séparation totale liée aux configurations traitées.**

Les résultats du tableau ci-dessus ont été obtenu pour un pas de calcul du problème dynamique particulière  $\Delta t = 2 \times 10^{-4}$  s.

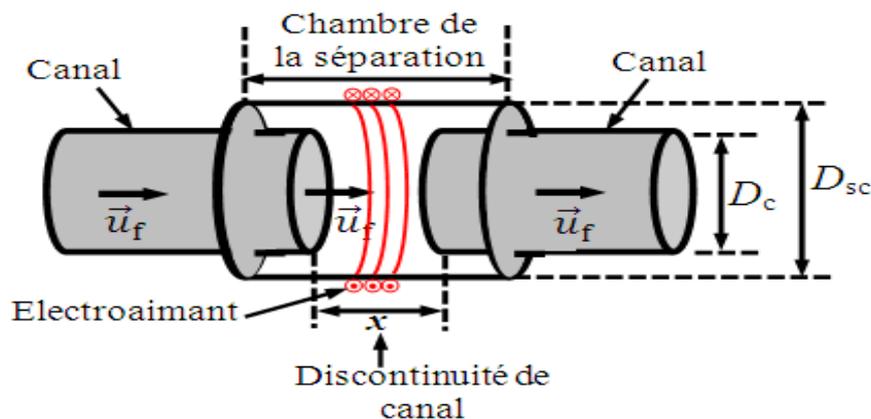
A partir de ces résultats, on constate que la configuration optimale qui donne les meilleures performances est celle à trois capteurs décalés entre eux d'un angle de 120°.

#### 4.2.3. Optimisation d'un séparateur destiné au traitement d'un écoulement à vitesse très élevé dans un canal étroit

Dans le cas de traitement des écoulements à vitesse élevée dans des canaux à diamètre très petit le dépôt des particules séparées peut perturber l'écoulement et même conduire à son arrêt. Pour cela, il est impératif de séparer les particules et les extraire définitivement en dehors de l'écoulement. Pour cela, on propose une technique de séparation basée sur la création d'une chambre de séparation par création d'une discontinuité du canal de sorte que l'écoulement ne sera pas affecté (pas de perte de charge).

##### 4.2.3.1. Forme du séparateur proposé

La forme géométrique du séparateur proposé est montrée dans la figure suivante :



**Figure. 4.12. Chambre de séparation créée**

Tenant compte des spécifications de l'application et afin de concentrer le champ magnétique juste au niveau de l'ouverture du canal, on propose un capteur de particule (inducteur) de forme circulaire muni de deux noyaux ferromagnétiques (voir Fig.4.13).

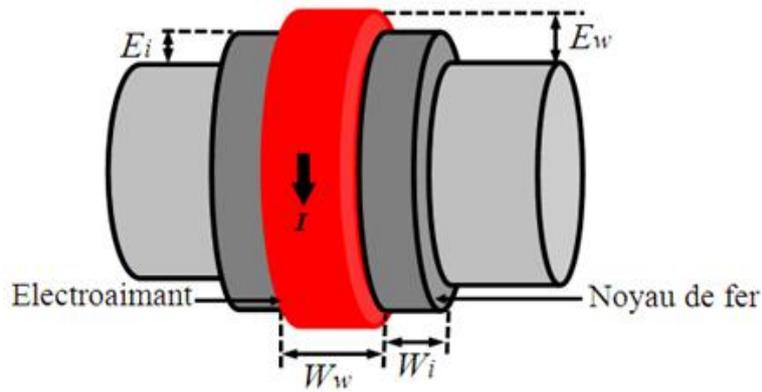


Figure. 4.13. Forme géométrique du capteur de particules proposé

#### 4.2.3.2. Approche d'optimisation et fonction objectif

Pour permettre l'extraction totale des particules en dehors de l'écoulement et empêcher toute agglomération des particules sur les parois du canal et sur les bords de l'ouverture créée, la force magnétique générée doit être parfaitement concentrée au centre de l'ouverture étroite du canal. Pour aboutir à cette objectif une approche d'optimisation basée sur la minimisation de trois fonction objectifs  $y_1$ ,  $y_2$  et  $y_3$  qui sont les distances entre les points de capture de trois particules situées à trois positions différentes le long de la hauteur du canal et le point du milieu de l'ouverture du canal. Afin de réduire le temps d'optimisation, nous avons limité la recherche à la largeur du bobinage  $W_w$ , l'épaisseur du bobinage  $E_w$ , la largeur du noyau de fer  $W_i$  et l'épaisseur du noyau de fer  $E_w$  (voir Figure 4.14).

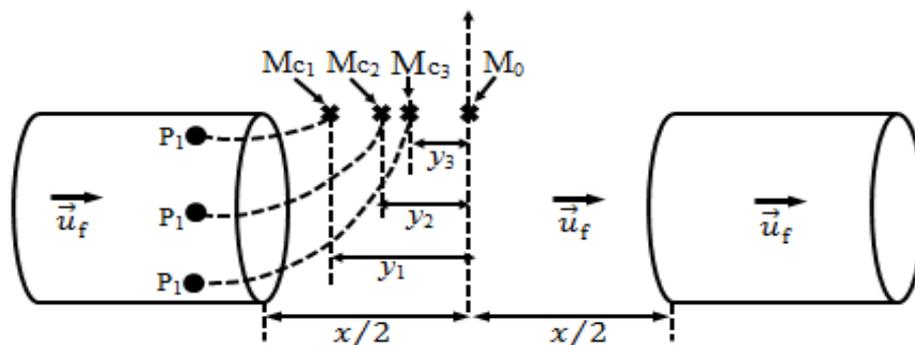
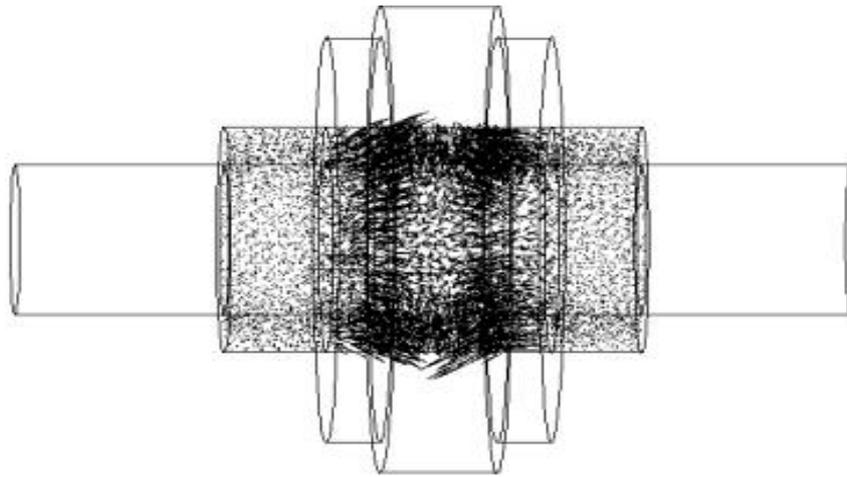


Figure. 4.14. Conditions d'optimisation

#### 4.2.3.3. Résultats d'optimisation

Lors de l'optimisation, le régime d'écoulement est supposé invariant. Seule la distribution de la force magnétique change avec la modification du dimensionnement du capteur. Pour montrer les spécifications de la force magnétique et son effet attractif, on présente sa distribution dans la région de séparation (voir figure 4.15).

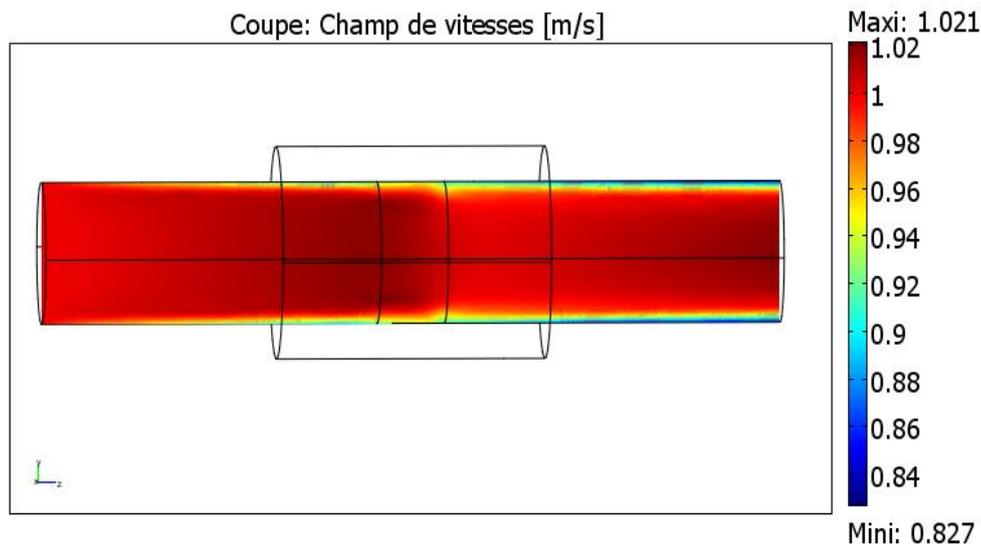


**Figure. 4.15. Distribution de la densité de force magnétique dans la chambre de séparation**

Ces résultats ont été obtenus pour un écoulement d'eau à une vitesse moyenne  $U_{\text{moy}} = 1$  m/s, une ouverture du canal  $x = 10^{-2}$  m, un diamètre de la chambre de séparation  $D_{\text{sc}} = 3 \times 10^{-2}$  m, un diamètre du canal  $D = 2 \times 10^{-2}$  m, et un courant d'excitation  $I = 9$  A.

La figure 4.15 montre clairement que les vecteurs de la force sont concentrés sur les limites de l'ouverture du canal et ils sont intensivement orientés vers le centre de l'ouverture ce qui signifie que les particules vont être attirées vers ce lieu.

Pour montrer l'effet de l'ouverture du canal et le régime d'écoulement obtenu, on présente la distribution de la vitesse d'écoulement dans la chambre de séparation (voir la figure 4.16).



**Figure. 4.16. Distribution de la vitesse de l'écoulement au niveau de la chambre de séparation.**

La figure 4.16 montre que l'ouverture  $x = 10^{-2}$  m créée dans le canal ne modifie pas considérablement l'écoulement.

Les résultats concernant les distributions de la force magnétique et la vitesse d'écoulement dans la chambre de séparation ont été obtenus pour les données du tableau suivant :

Courant d'excitation $I_{ex}$ (A)	9
Perméabilité relative du noyau de fer $\mu_r$	80
Ouverture du canal $x$ (m)	$10^{-2}$
Diamètre de la chambre de séparation $D_{SC}$ (m)	$3 \times 10^{-2}$
Longueur de la chambre de séparation $L_{SC}$ (m)	$5 \times 10^{-2}$
Diamètre du canal $D$ (m)	$2 \times 10^{-2}$
Vitesse moyenne de l'écoulement $U_{moy}$ (m/s)	1

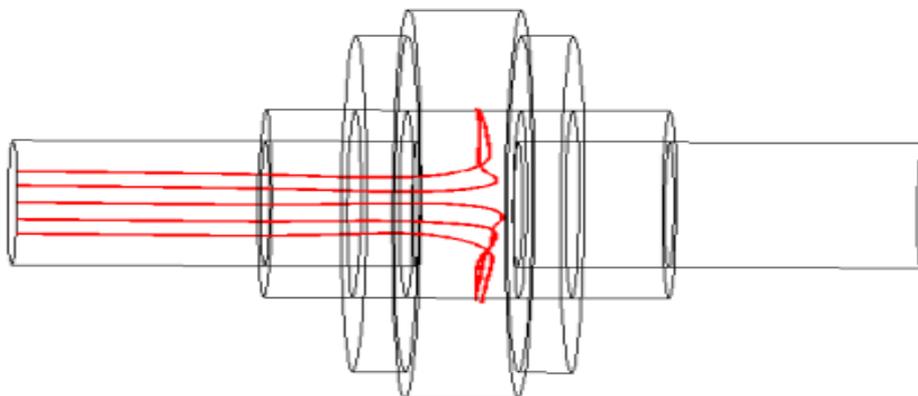
**Tableau 4.5. Données géométriques et physiques du séparateur et de l'écoulement.**

Après 54 itérations de calcul du processus d'optimisation, nous avons obtenu les valeurs minimales des fonctions objectif,  $y_{1min} = 1.5 \times 10^{-3}$  m,  $y_{2min} = 0.7 \times 10^{-3}$  m et  $y_{3min} = 1.2 \times 10^{-3}$  m. Les paramètres optimaux liés à ces valeurs sont présentés dans le tableau suivant :

Largeur de la bobine $W_{wf}$ (m)	Épaisseur de la bobine $E_{wf}$ (m)	Largeur du noyau de fer $W_{if}$ (m)	Épaisseur du noyau de fer $E_{if}$ (m)
$1.12 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-2}$	$0.52 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-2}$

**Tableau 4.6. Les résultats des paramètres optimisés.**

Pour vérifier notre approche d'optimisation ainsi que l'exactitude des résultats obtenus, nous avons calculé les trajectoires d'un ensemble de particules situées initialement à des positions différentes. Pour les conditions de calcul précédentes (taille des particules et régime d'écoulement), nous avons trouvé les résultats de la figure suivante :



**Figure. 4.17. Trajectoires des particules obtenues pour le dispositif de séparation optimisé.**

La figure 4.17 montre clairement que toutes les particules ont été capturées plus proche du centre de l'ouverture.

### 4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une optimisation sur différents types de séparateurs magnétiques. Pour cela, et tenant compte des spécifications de chaque type, des approches d'optimisation ont été proposés et mises en œuvre.

Ces approches sont principalement basées sur le calcul des trajectoires des particules qui permettent à la fois de vérifier la capture et d'identifier le lieu de capture des particules. Pour réduire le coût d'optimisation en terme de temps d'exécution et espace mémoire, une particule a été considéré pour les deux premiers cas.

# **Chapitre 5**

## **Validation expérimentale**

## 5. Validation expérimentale

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais expérimentaux effectués pour valider les approches développées et mise en œuvre et la vérification des performances du séparateur réalisé. Au départ, et pour permettre notre validation, un essai d'identification a été effectué pour déterminer la perméabilité magnétique des particules à utiliser. La connaissance de la perméabilité est très nécessaire pour permettre une confrontation entre les résultats théoriques et expérimentaux.

### 5.1. Identification de la perméabilité magnétique des particules utilisées

Les particules utilisées dans les expérimentations sont obtenues par découpage (cisaillement) d'un matériau de fer. Pour déterminer la perméabilité de ces particules, et en négligeant l'effet des contraintes de cisaillement qui peuvent considérablement modifier cette propriété magnétique, nous avons effectué un essai de transformateur à vide pour identifier la caractéristique  $B-H$  du matériau utilisé [Mehasni 07]. Le banc d'essai réalisé (voir figure 5.1) est constitué d'un cadre de fer (matériau des particules) sur lequel nous avons réalisé deux bobinages un primaire et un secondaire et deux voltmètres branchés aux bornes de chaque bobinage.

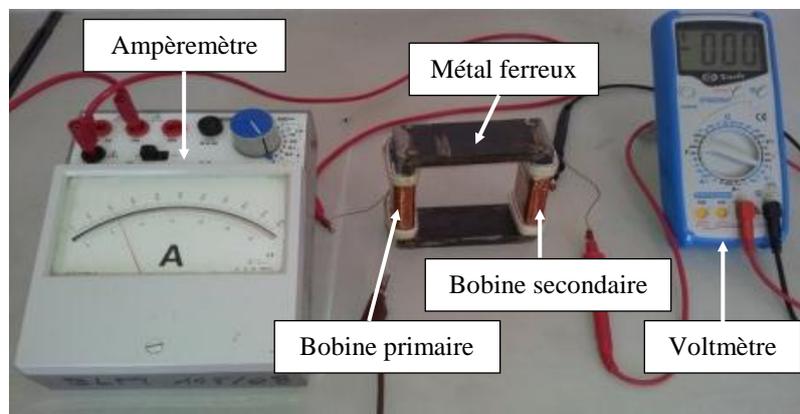


Figure 5.1. Dispositif expérimental pour caractériser le matériau de fer des particules.

Les paramètres géométriques du dispositif réalisé (transformateur) sont montrés dans le tableau suivant :

Longueur du circuit magnétique (m)	Nombre de spires au primaire	Nombre de spires au secondaire	Fréquence d'alimentation (Hz)	Section du noyau de fer ( $m^2$ )
$35.6 \times 10^{-2}$	240	236	50	$3.8 \times 10^{-4}$

Tableau 5.1 paramètres géométriques et physiques du transformateur utilisé.

Le protocole d'essai consiste à alimenter le primaire par une tension sinusoïdale, on varie le courant au primaire et on mesure la tension induite au secondaire.

Pour relever la caractéristique  $B-H$  du matériau des particules, nous nous sommes basés sur la caractéristique  $E_2=f(I_{ex})$  du transformateur. Le passage a été effectué en se servant du calcul suivant :

On sait que pour le circuit magnétique,

$$N_1 I_{ex} = H l_n \quad (5.1)$$

$H$  est le champ magnétique et  $l_n$  est la longueur du circuit magnétique.

(5.1) permet d'écrire

$$H = \frac{N_1}{l_n} I_{ex} \quad (5.2)$$

Posons  $\frac{N_1}{l_n} = C_2$ , on trouve finalement que

$$H = C_2 I_{ex} \quad (5.3)$$

D'autre part, et selon la loi de Boucherot, la force électromotrice induite au secondaire  $E_2$ ,

$$E_2 = 4.44 B N_2 f s_n \quad (5.4)$$

Ainsi l'induction magnétique  $B$  sera

$$B = \frac{E_2}{4.44 N_2 f s_n} \quad (5.5)$$

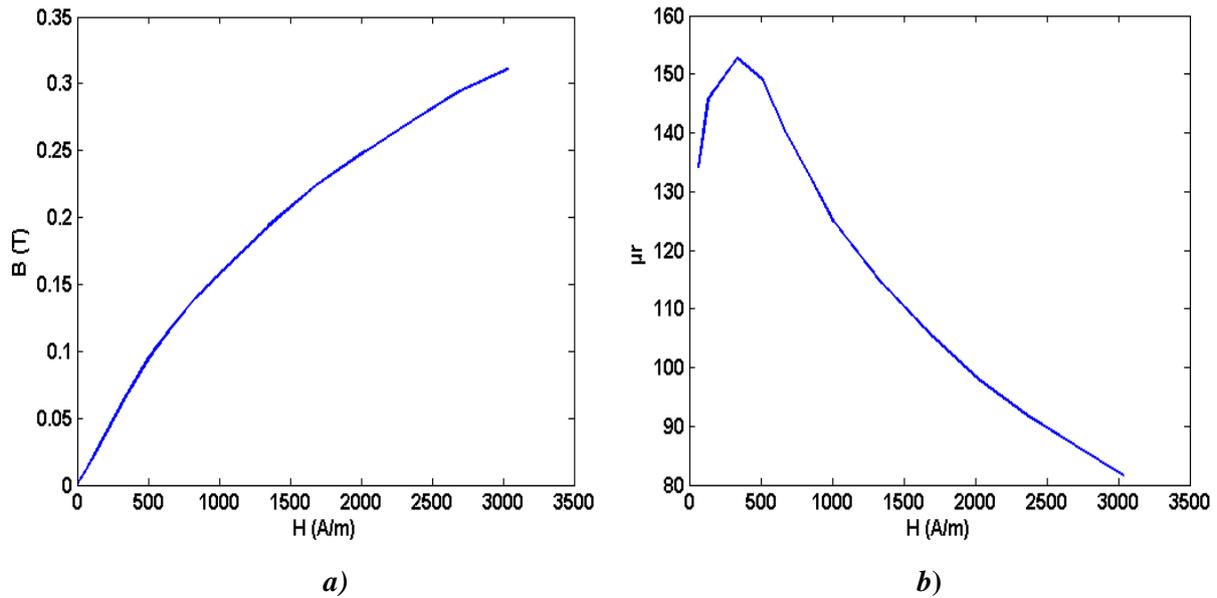
Posons  $C_1 = \frac{1}{4.44 N_2 f s_n}$ , on aura finalement

$$B = C_1 E_2 \quad (5.6)$$

Le champ  $H$  et l'induction  $B$  était connus, la perméabilité relative du matériau est ainsi

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5.7)$$

Les mesures effectuées ont permis de relever les caractéristiques présentées dans la figure suivante :



**Figure 5.2. Caractéristiques magnétiques du matériau utilisé. a) La caractéristique  $B = f(H)$ , b) La caractéristique  $\mu = f(H)$**

## 5.2. Vérification des performances des séparateurs optimisés

Dans cette section, on présente la validation des résultats de l'optimisation et cela par la vérification des performances des séparateurs optimisés. Deux types de vérification ont été effectuées, qualitative et quantitative. Pour la vérification qualitative, il s'agit de la localisation du lieu du dépôt final des particules séparées quant à la vérification quantitative, il s'agit de la mesure du volume des particules séparées.

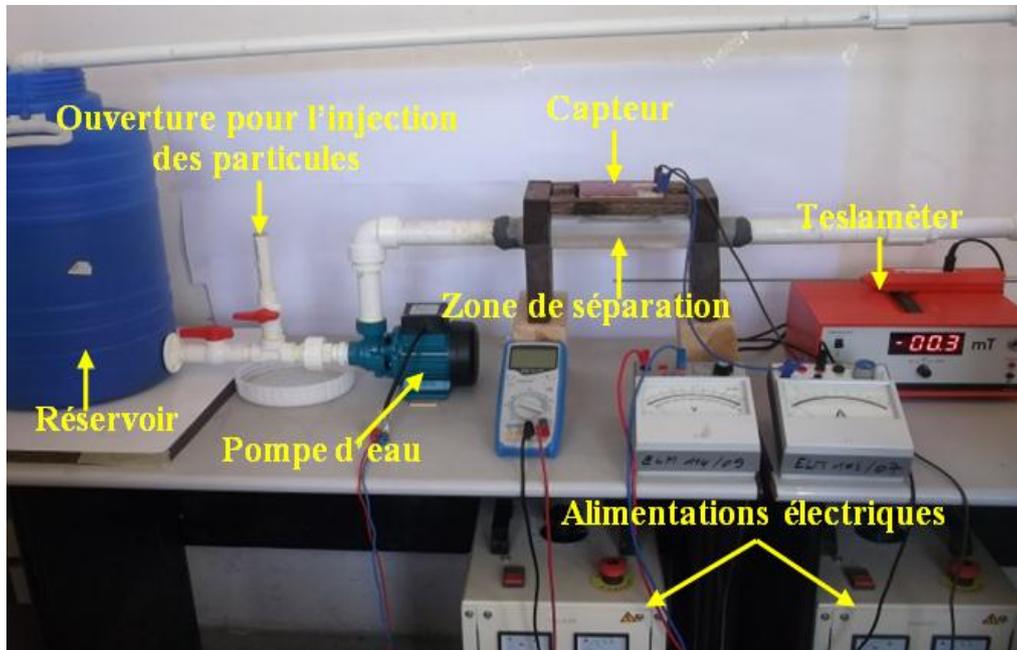
### 5.2.1. Banc d'essai réalisé et protocole expérimental

Notre objectif est la réalisation d'une séparation magnétique capable d'extraire des particules de fer à partir d'écoulements d'eau dans des canaux cylindriques fermés. Pour permettre la réalisation d'un écoulement d'eau, on pompe de l'eau à partir d'un réservoir à travers un canal formant un circuit fermé. Ce pompage permet d'avoir le régime d'écoulement voulu par action sur la vitesse de la pompe (action sur l'alimentation de la pompe).

Pour permettre la visualisation du processus de séparation, le contrôle de la capture ainsi que la localisation du dépôt final des particules séparées, nous avons utilisé des canaux transparents en verre. Pour permettre la suspension des particules dans l'eau à purifier lors de son passage dans la zone de séparation, les particules sont injectées juste à l'entrée de la pompe à eau à travers un orifice créé dans le canal. Pour positionner les capteurs de particules sur le périmètre du canal, ainsi que le changement de la configuration du séparateur, nous

avons construit un support en bois. Pour connaître la vitesse de l'écoulement, nous avons mesuré le volume d'eau déversé pendant un temps donné.

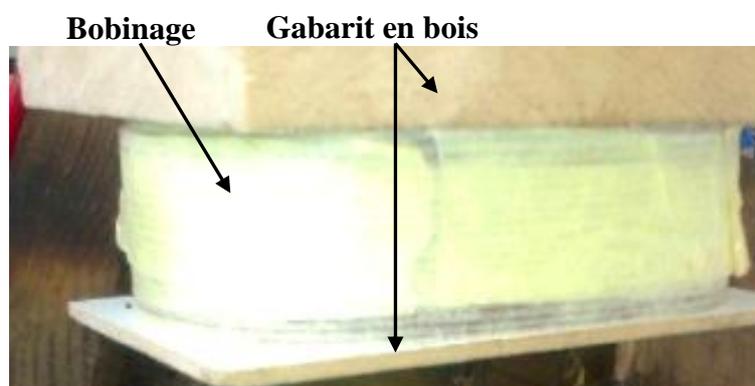
Le banc expérimental réalisé est montré dans la figure suivante:



**Figure 5.3.** Banc d'essai expérimental réalisé.

Le capteur élémentaire de particules (électroaimant) et les différents canaux utilisés sont montrés dans la figure suivante :

Les capteurs de particules réalisés sont identiques. Ils sont des électroaimants à bobinage en cuivre de forme géométrique rectangulaire sans noyau de fer. Le bobinage est formé sur un gabarit en bois (voir figure 5.4).



**Figure 5.4.** Capteur élémentaire, le bobinage est formé d'un fil de cuivre de section  $1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ .

Pour permettre le contrôle et l'enregistrement de la séparation des parties des canaux en verre ont été utilisés (voir figure 5.5).

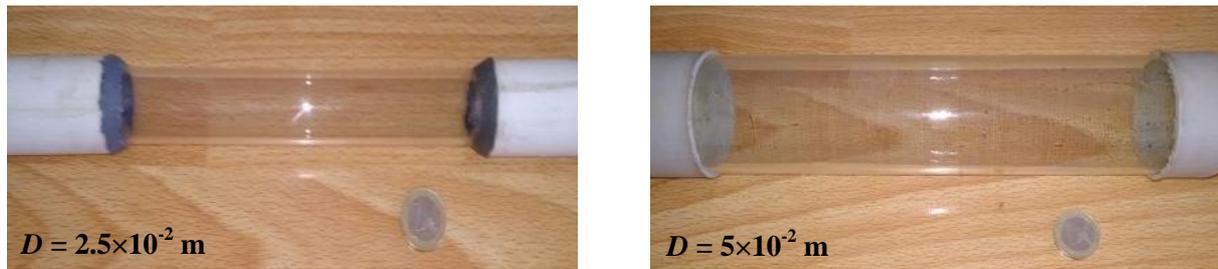


Figure 5.5. Canaux transparents en verre de différents diamètres.

### 5.2.2. Quantification du volume capturé de particules et technique utilisée

Dans notre approche, la mesure du volume de particules séparées est basée sur l'évaluation de la perturbation du champ magnétique à la localité de capture suite au dépôt des particules séparées [Mehasni 07]. Pour mesurer de telle perturbation, nous avons utilisé la technique de détection par effet Hall. Le dispositif de mesure réalisé est constitué d'une sonde à effet Hall et un aimant permanent (voir Figure 5.6). Le collage des particules séparées au capteur excité permet leur récupération à la fin du processus de séparation et leur déposer dans un endroit accessible. Le rôle de l'aimant permanent est de générer un champ magnétique faible à l'endroit du dépôt des particules et qui permet la détection de la composante perturbatrice du champ due à la présence des particules. La sonde à effet Hall permet la lecture du champ mesuré.

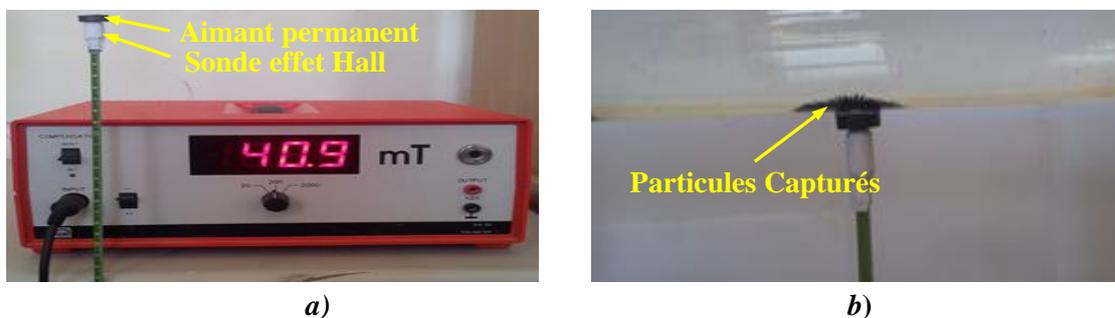


Figure 5.6. Dispositif de mesure réalisé, a) Teslamètre et éléments associés (aimant permanent et sonde à effet Hall), b) Mesure du champ en présence du dépôt des particules séparées.

La procédure de mesure est basée sur les deux phases suivantes [Mehasni 07]:

Dans une première phase, on procède à l'étalonnage du dispositif de mesure utilisé. En absence des particules, on mesure le champ magnétique généré par l'aimant permanent ce qui donne une valeur  $B_0$ . Ensuite, on met un volume connu de particules  $V_{ip}$  à l'endroit de mesure et on mesure de nouveau le champ magnétique ce qui donne une nouvelle valeur  $B_{i0p}$ . La présence des particules magnétiques perturbe le champ et donne une différence de champ lié au volume injecté de particule  $\Delta B_{ip} = |B_0 - B_{i0p}|$ .

Pour des volumes réduits de particules, la relation entre le volume de particules et le changement du champ  $\Delta B_{ip} = f(V_{ip})$  est trouvée linéaire. Le rapport entre le volume de particule et le changement du champ est ainsi connu  $\alpha = V_{ip} / \Delta B_{ip}$ .

Dans la deuxième phase où le processus de séparation est achevé, le volume de particules injectées étant connu, on récupère les particules séparées à l'endroit de mesure et on mesure le champ magnétique en leur présence ce qui donne une valeur  $B_{ps}$ . Le changement du champ suite à l'existence des particules séparées est ainsi  $\Delta B_{ps} = |B_0 - B_{ps}|$ . Le volume capturé de particules est  $\alpha \cdot \Delta B_{ps}$ . Si on considère que le volume injecté de particules est celui utilisé lors de l'étalonnage, on trouve un changement de champ  $\Delta B_{ip}$ . Ainsi, l'efficacité de capture a été évaluée en servant de la relation  $C_{eff}(\%) = 100 \times \Delta B_{ps} / \Delta B_{ip}$ .

Lors de l'utilisation réelle de la procédure de quantification, on ne connaît pas au départ le volume existant des particules, alors on ne peut pas évaluer l'efficacité de capture, par contre, on peut évaluer le volume de particules séparées  $V_{cp} = \alpha \Delta B_{ps}$ .

### 5.2.3. Validation des séparateurs optimisés

Dans cette section, on présente la validation des séparateurs optimisés. Il s'agit de la vérification de leur possibilité de capture et l'évaluation de leur efficacité de séparation.

#### 5.2.3.1. Séparateur à un seul capteur élémentaire

L'objectif de cette validation est double. Il s'agit de la validation des résultats de calcul et la vérification des performances du capteur élémentaire conçu (voir Figure 5.7.a).

Pour la validation des résultats de calcul, nous avons comparé entre les résultats théoriques et expérimentaux concernant les variations de l'induction magnétique au voisinage du capteur. Pour permettre cette comparaison, nous avons choisi des points d'une droite situés le long de la surface inférieure de l'élément capteur (voir Figure 5.7.b).

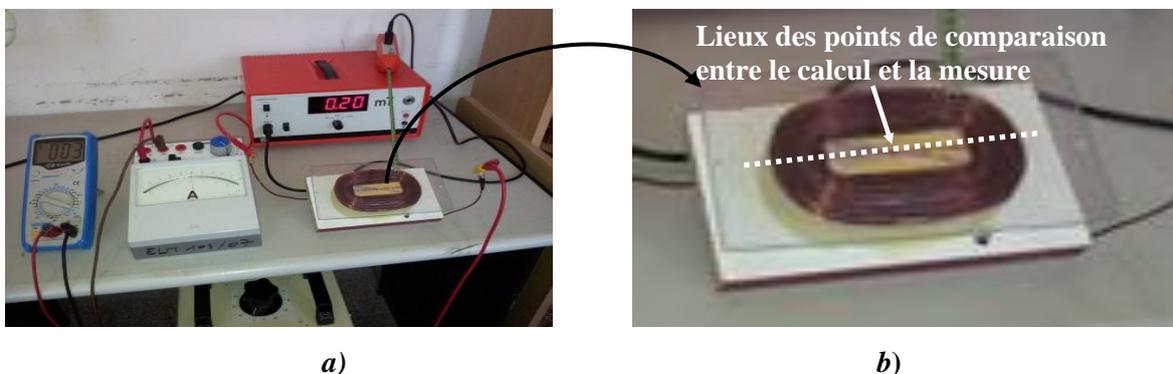
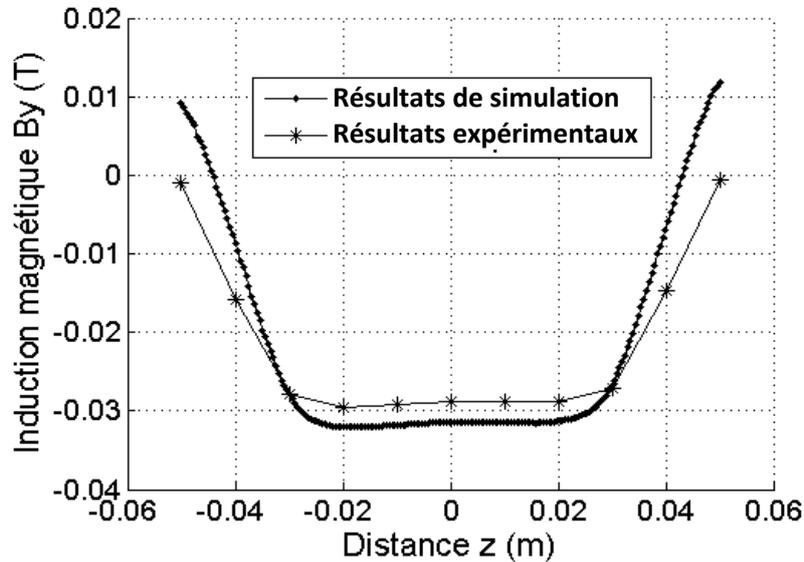


Figure 5.7. Mesure de l'induction magnétique. a) Montage de mesure, b) Lieux des points de comparaison entre les résultats de calcul et de mesure.

La comparaison des résultats expérimentaux et théoriques concernant la composante  $B_y$  de l'induction (la composante la plus significative pour la séparation) est montrée dans la figure suivante :



**Figure 5.8. Variation de la composante  $B_y$  de l'induction magnétique le long d'une droite située sur la surface inférieure du capteur.**

L'écart entre les résultats expérimental et théorique est lié principalement à la différence entre les formes géométriques des prototypes réalisés et simulés. Lors de la réalisation, le prototype n'est pas parfaitement rectangulaire et symétrique en comparaison avec celui utilisé dans le calcul.

Après la validation de l'outil de calcul du problème magnétique en terme de champ, nous avons procédé à la validation de l'approche d'optimisation ainsi que la vérification des performances du capteur élémentaire conçu. De telle vérification a été réalisée pour un écoulement d'eau à une vitesse moyenne  $U_1 = 0.56$  m/s qui a conduit à un régime d'écoulement turbulent  $Re = 1.4 \times 10^4$ . Pour un volume total de particules de fer  $V_{ip} = 35.34 \times 10^{-8} \text{ m}^3$  de perméabilité magnétique relative  $\mu_r = 80$  injecté dans le volume d'eau traité  $V_{\text{eau}} = 3.5$  L, on a eu une concentration globale  $C_g = 0.8$  g/L. De telle concentration est qualifiée de faible ce qui a permis de considérer le liquide traité comme non magnétique et de négliger les effets d'interaction magnétique entre les particules ainsi que leurs agglomération loin du capteur lors de leur mouvement [Williams 10]. Pour une excitation du capteur  $I = 10$  A, nous avons mesuré une valeur de l'induction magnétique au centre du capteur  $B = 0.029$  T. La vérification des performances du capteur a été basée sur le contrôle de l'évolution du dépôt des particules séparées et la localisation de son lieu final. L'enregistrement photographique de

l'évolution du dépôt des particules pour différents instants a permis d'avoir les résultats de la figure suivante :

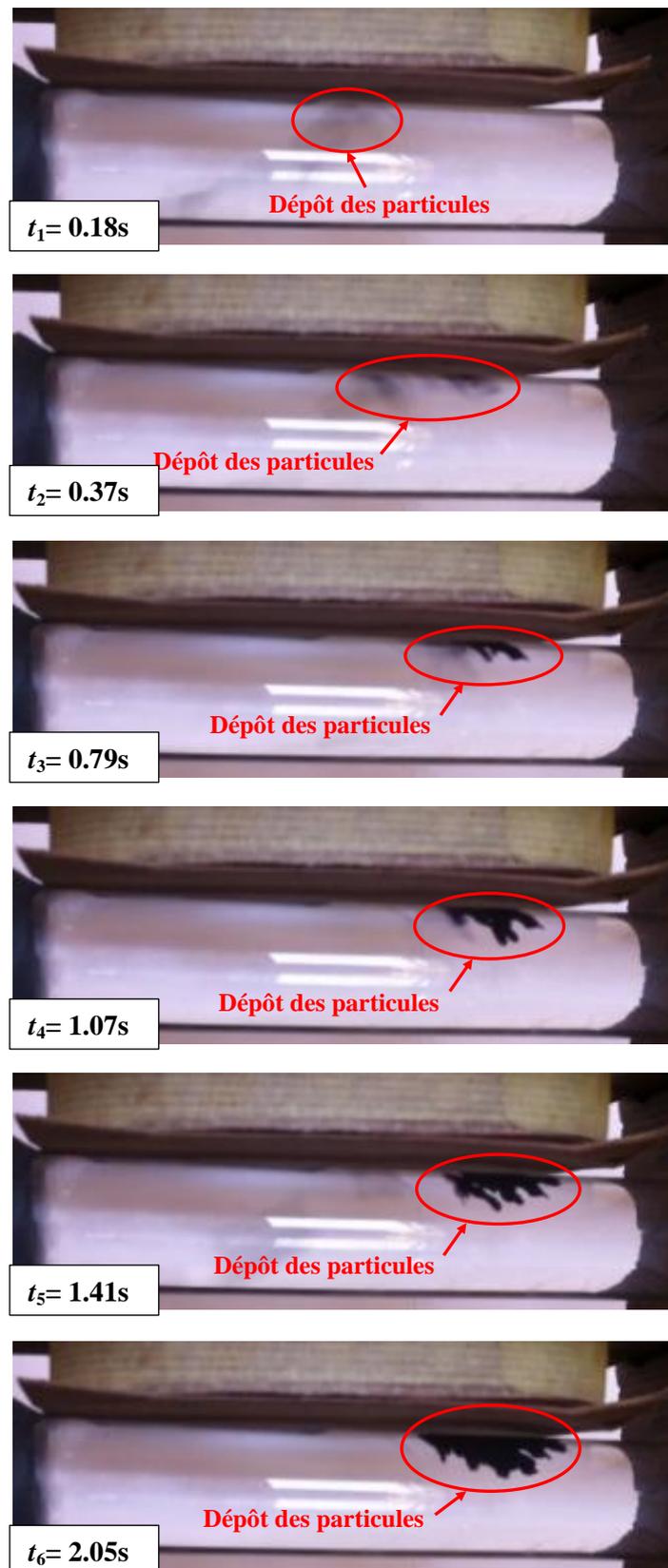


Figure 5.9. Evolution du dépôt des particules séparée dans le temps.

Sur la figure, on voit que les particules se déposent à l'extrémité avale du capteur. Cela est fortement lié à l'effet de l'écoulement qui tend à leur porter.

La forme du dépôt final (dépôt statique) après l'arrêt de l'écoulement est montrée dans la figure suivante :



**Figure 5.10. Dépôt final des particules après l'arrêt de l'écoulement.**

Les résultats des figures 5.9 et 10 montrent clairement que pour le régime d'écoulement considéré le capteur conçu permet une séparation de haute performance. Le lieu du dépôt final des particules séparées est influé par l'écoulement.

Afin de valoriser les performances de séparation, nous avons effectué une vérification quantitative basée sur la mesure du volume capturé par rapport au volume injecté. L'utilisation de la technologie de l'effet Hall précitée a donné les résultats du tableau suivant :

Induction magnétique $B_0$ (T)	Induction magnétique $B_{iop}$ (T)	Induction magnétique $B_{cp}$ (T)	Pourcentage du volume capturé (%)
$39.6 \times 10^{-3}$	$34.9 \times 10^{-3}$	$35 \times 10^{-3}$	97.87

**Tableau 5.2. Valeurs mesurées de l'induction et efficacité de capture.**

Selon les résultats obtenus, on conclut que l'approche d'optimisation appliquée a conduit à des résultats valables permettant la réalisation d'une séparation de haute performance.

### 5.2.3.2. Séparateur à deux capteurs en cascade série

Ce type de séparateur a été validé pour un écoulement d'eau à une vitesse  $U_1 = 0.9$  m/s dans un canal de diamètre  $D = 2.7 \times 10^{-2}$  m. Pour ces conditions, nous avons obtenu un régime turbulent  $R_e = 2.43 \times 10^4$  (valeur calculée). Les deux capteurs montés en cascade sont alimentés en série par un courant continu d'intensité  $I = 7.5$  A. La distance séparant les deux capteurs est  $x = 1.2 \times 10^{-2}$  m. La concentration des particules dans le volume traité d'eau est  $C_g = 0.58$  g/l. L'enregistrement photographique de quelques séquences de séparation et qui sert de validation qualitative a permis le contrôle de l'évolution du dépôt de particules séparées ainsi que la localisation de son lieu final (voir figure 5. 11).

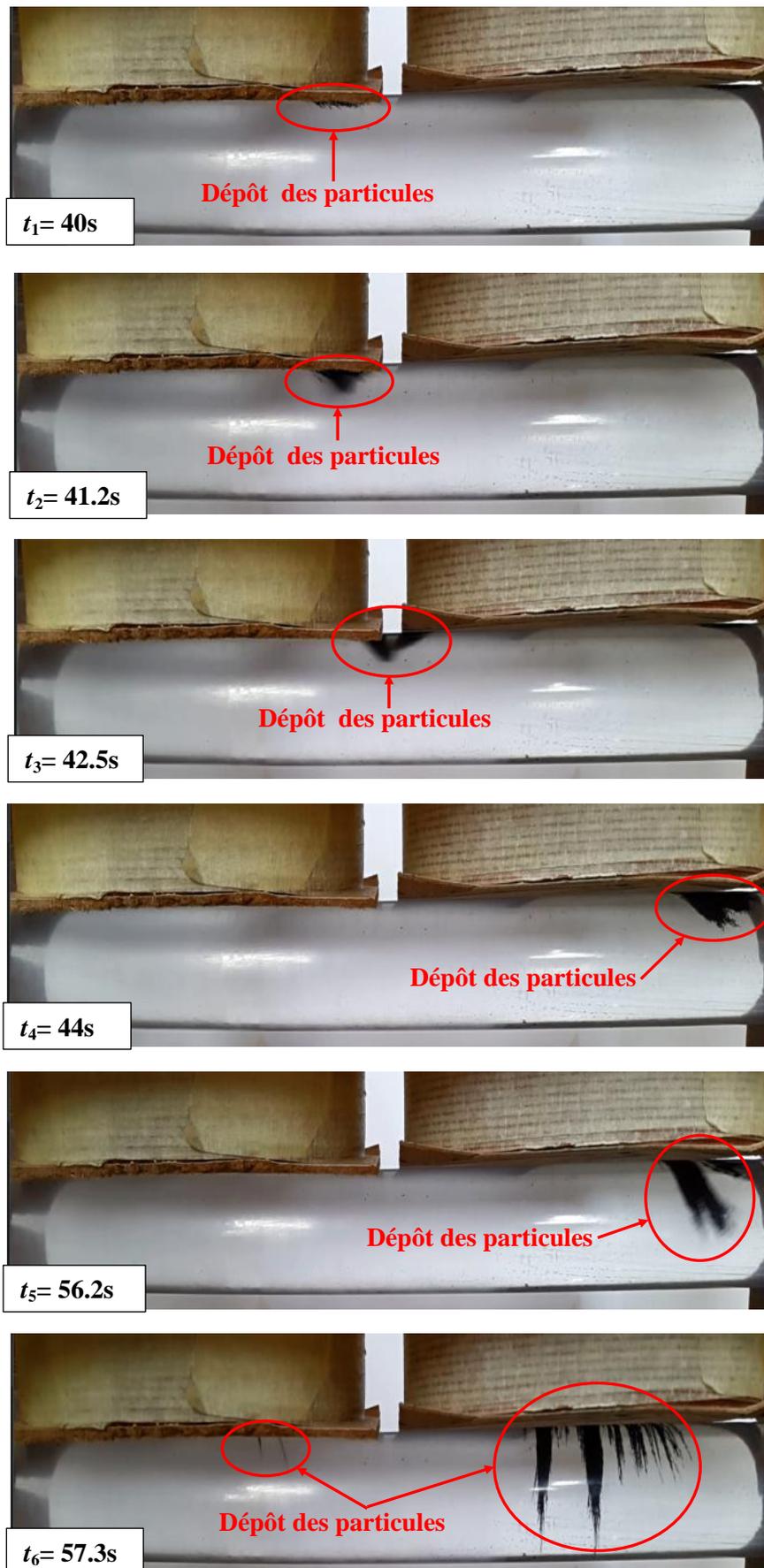


Figure 5.11. Evolution du dépôt des particules séparées

La figure montre que le dépôt des particules séparées est stabilisé dans une région située après le point central du deuxième (ordre par rapport au sens de l'écoulement). Cela est dû principalement à l'influence de la vitesse de l'écoulement sur l'agglomération des particules. La forme du dépôt final lié au temps  $t_6$  est obtenue après l'arrêt de l'écoulement où le dépôt des particules revient au centre du deuxième capteur ce qui est en concordance avec le résultat de l'optimisation.

Pour évaluer les performances du séparateur réalisé, nous avons mesuré le volume de particules séparées. L'application de la technique précitée a permis l'obtention des résultats du tableau suivant :

Induction magnétique $B_0$ (T)	Induction magnétique $B_{i0p}$ (T)	Induction magnétique $B_{cp}$ (T)	Taux de volume capturé (%)
$43 \times 10^{-3}$	$38 \times 10^{-3}$	$38.4 \times 10^{-3}$	92

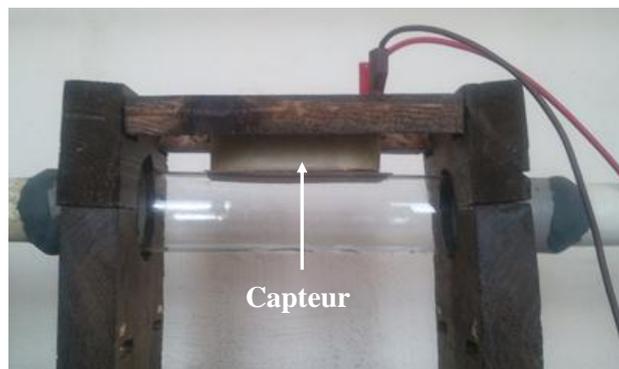
**Tableau 5.3. Valeurs d'induction mesurées et taux de capture obtenu.**

Le taux de capture mesuré approuve la validité de l'approche d'optimisation appliquée ainsi que les performances du séparateur réalisé. Pour l'excitation mentionnée ci-dessus, le séparateur présente des pertes Joules très raisonnable  $P_j = 81.4$  W. Dans les limites de linéarité, le taux de séparation obtenu peut être considérablement amélioré par utilisation d'un capteur avec noyaux de fer.

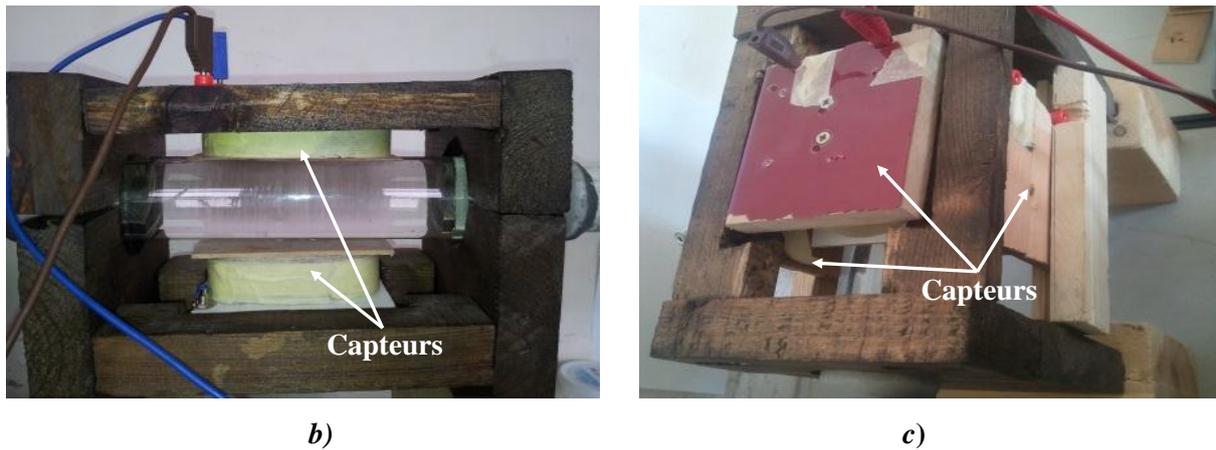
### 5.2.3.3. Séparateur à arrangement circulaire de capteurs

Ce type de séparateur est conçu pour traiter un écoulement d'eau dans un canal de diamètre important par rapport aux cas précédents. Pour une vitesse d'écoulement  $U_1 = 0.2$  m/s dans un canal de diamètre  $D = 5 \times 10^{-2}$  m, on a obtenu un écoulement turbulent  $R_e = 10^4$ .

Les configurations réalisées sont montrées dans la figure suivante :



a)



**Figure 5.12. Configurations réalisées du séparateur. a) un seul capteur, b) deux capteurs, c) trois capteur décalés de  $90^\circ$  entre eux.**

Pour valider l'approche d'optimisation utilisée, ainsi que le résultat obtenu concernant le prototype réalisé, nous avons effectué une vérification qualitative basée sur le contrôle du processus de séparation pour les cas des configurations traitées. De tel contrôle est réalisé par l'enregistrement de l'évolution du dépôt des particules séparées ainsi que sa localisation finale. Pour une excitation des capteurs par un courant  $I = 10$  A, nous avons obtenu les résultats suivants :

#### a) Séparateur à un seul capteur

L'évolution du dépôt des particules séparées pour le cas d'un séparateur à un seul capteur est présenté dans la figure suivante :

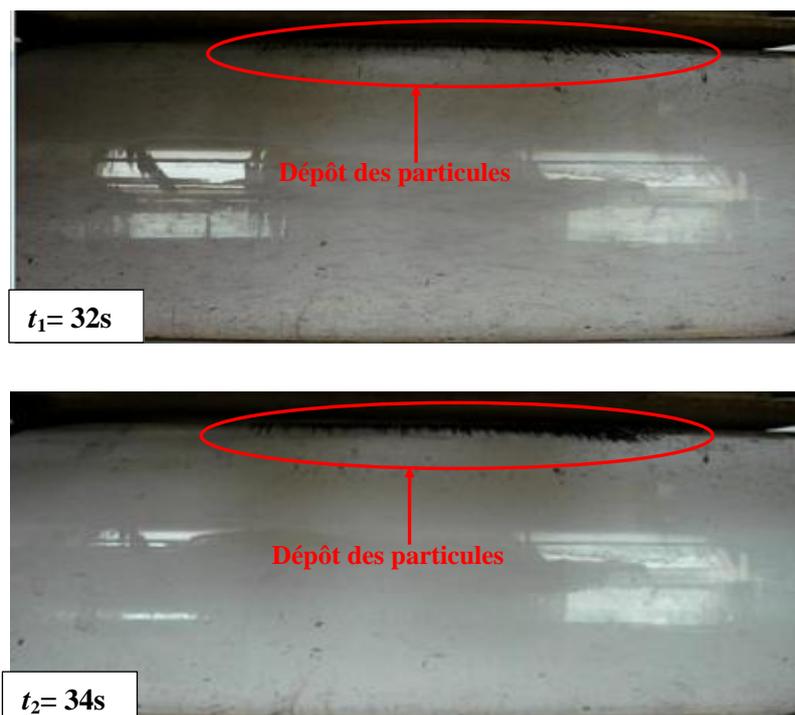




Figure 5.13. Evolution du dépôt des particules séparées.

### b) Séparateur à deux capteurs

L'évolution du dépôt des particules séparées pour le cas d'un séparateur à deux capteurs est présenté dans la figure suivante :

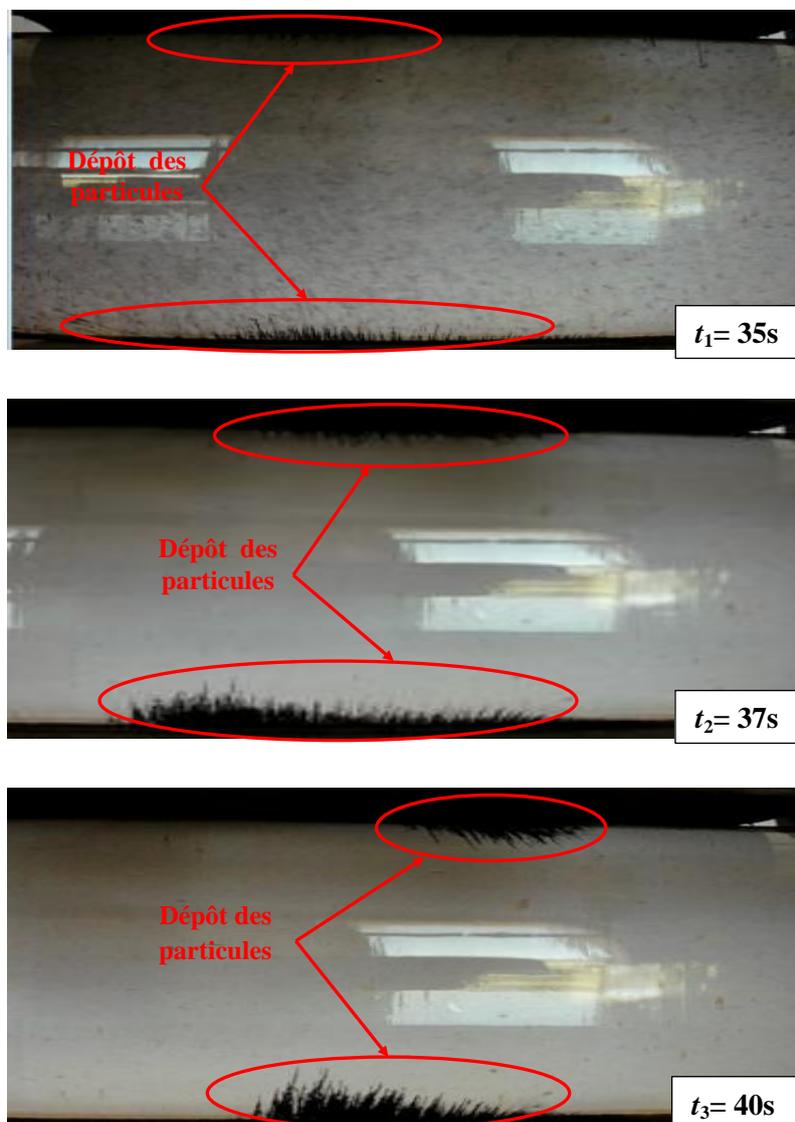


Figure 5.14. Evolution du dépôt des particules séparées.

**c) Séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $90^\circ$** 

L'évolution du dépôt des particules séparées obtenu par un séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $90^\circ$  est présenté dans la figure suivante :

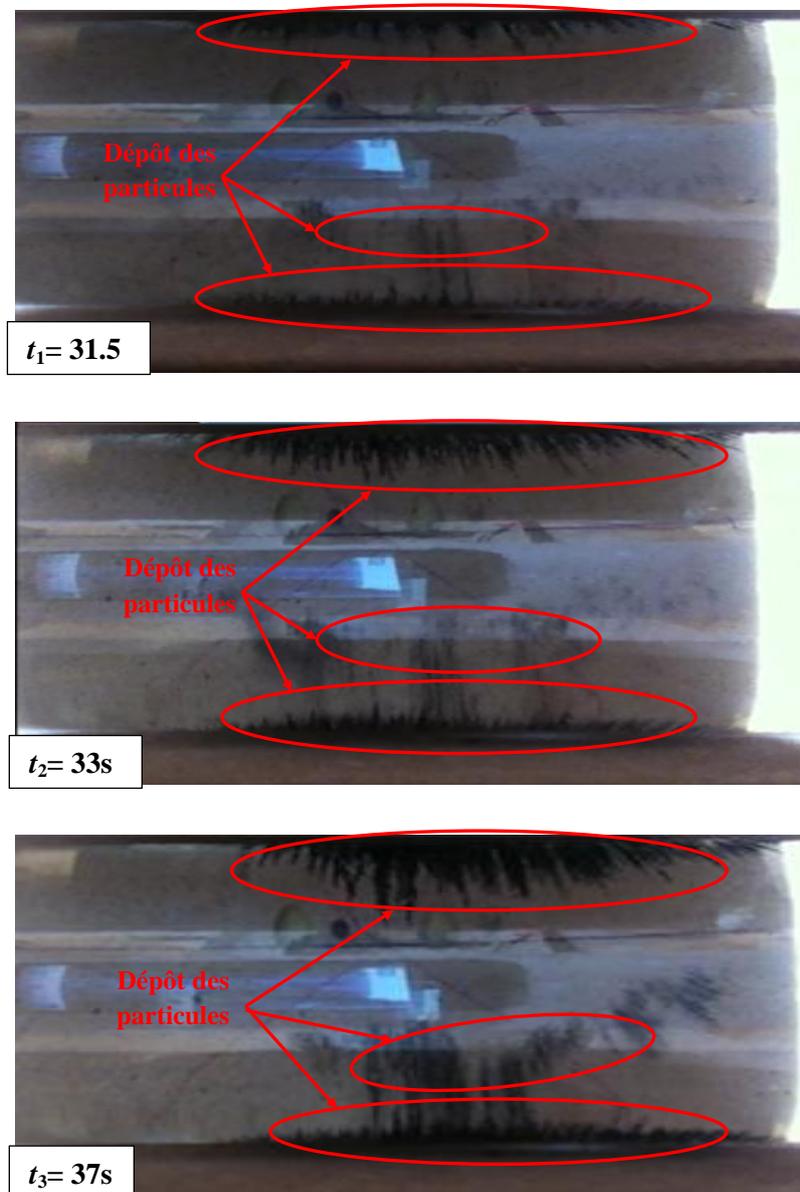
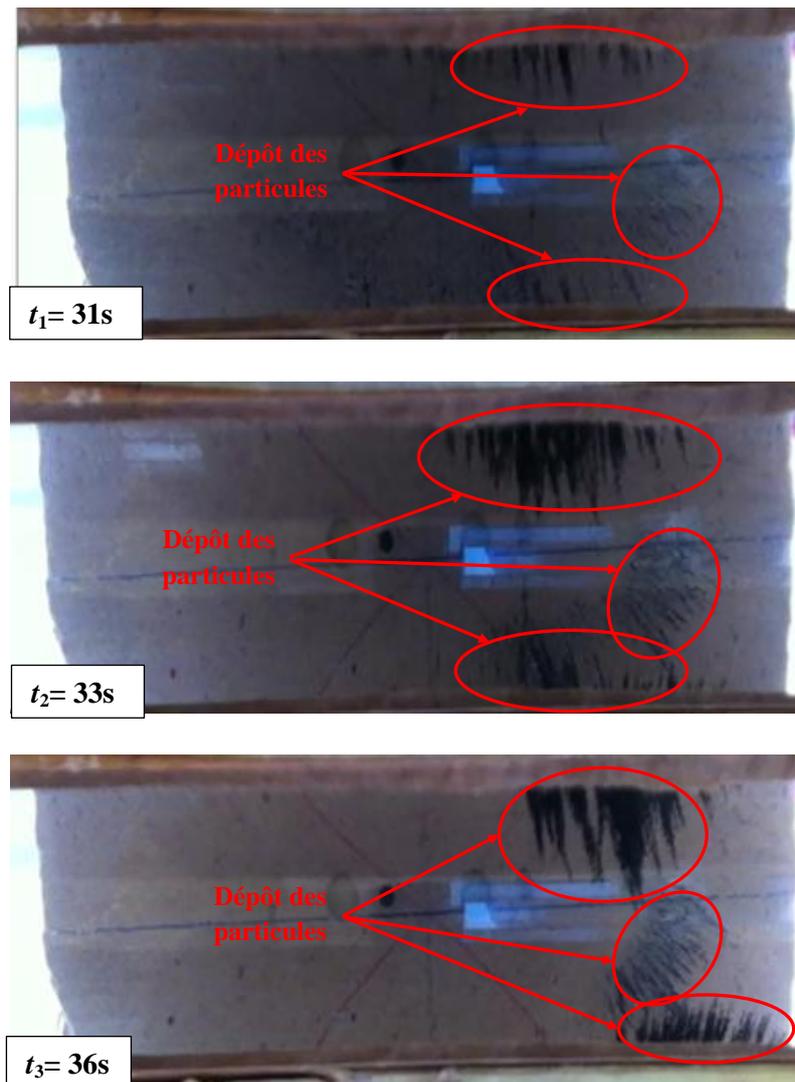


Figure 5.15. Evolution du dépôt des particules séparées.

**d) Séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $120^\circ$** 

L'évolution du dépôt des particules séparées obtenu pour un séparateur à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $120^\circ$  est présenté dans la figure suivante :



**Figure 5.16. Evolution du dépôt des particules séparées.**

La figure 5.13, 5.14, 5.15 et 5.16 montrent que toutes les configurations ont permis la séparation du type spécifié de particules dans les conditions considérées de fonctionnement. L'examen des volumes des dépôts finaux des particules séparées montre que la multiplication des capteurs améliore les performances de séparation. De même, on voit que ces performances sont influées par le positionnement des capteurs (décalage angulaire entre les capteurs). Pour les cas traités, la meilleure configuration est celle à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $120^\circ$ . Pour se rassurer de ce résultat, nous avons effectué une comparaison quantitative entre les volumes capturés pour les cas traités (voir tableau 5.4).

Configuration du séparateur	Un seul capteur Cas <i>a</i>	Deux capteurs Cas <i>b</i>	Trois capteurs $90^\circ$ Cas <i>c</i>	Trois capteurs $120^\circ$ Cas <i>d</i>
Taux de séparation (%)	26	83.78	84.62	87.88

**Tableau 5.4. Taux de séparation pour les configurations traitées du séparateur.**

Le tableau montre que le meilleur taux de séparation est obtenu par la configuration à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $120^\circ$ , ce qui confirme ce qu'on a obtenu lors de l'optimisation (tableau 4.4).

### 5.3. Validation de l'approche utilisée pour la simulation du phénomène de la séparation

Après avoir validé notre approche d'optimisation ainsi que la vérification des performances des prototypes réalisés, on procède dans cette section à la validation de l'approche 3D appliquée pour le calcul du problème de la séparation. De telle validation sera basée sur la vérification du lieu du dépôt des particules séparées et la capacité de l'approche à prendre en compte l'effet de l'interaction dipolaire d'origine magnétique entre les particules ainsi que leurs agglomérations transitoires lors de leur mouvement. Pour effectuer cette validation, on prend le cas d'un séparateur à un seul capteur.

#### 5.3.1. Cas d'un liquide statique

Dans ce cas, l'eau à traiter est mis dans un récipient tubulaire (la partie transparente du canal utilisé). Les particules à séparer ne sont pas suspendues mais stagnées en bas du récipient. L'élément capteur est excité par un courant d'intensité  $I = 9A$ . Le dispositif utilisé ainsi que la position initiale des particules à séparer sont montrés dans la figure suivante :

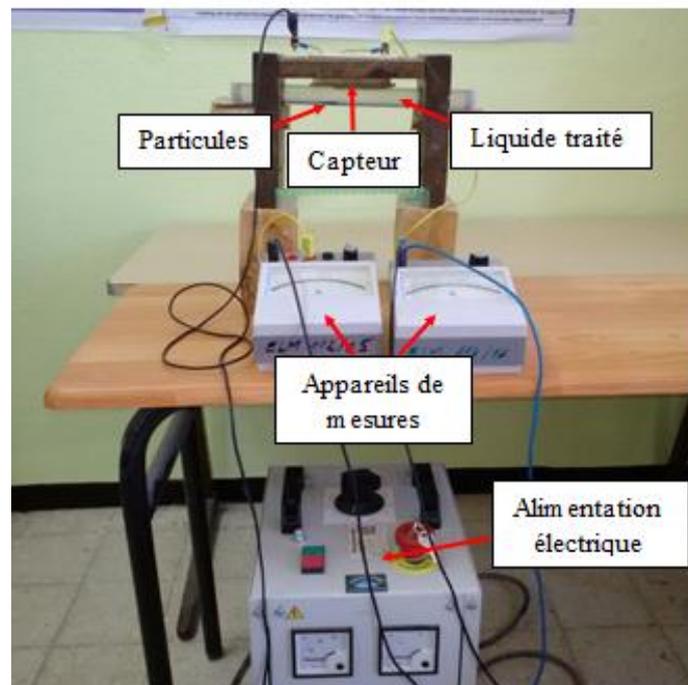
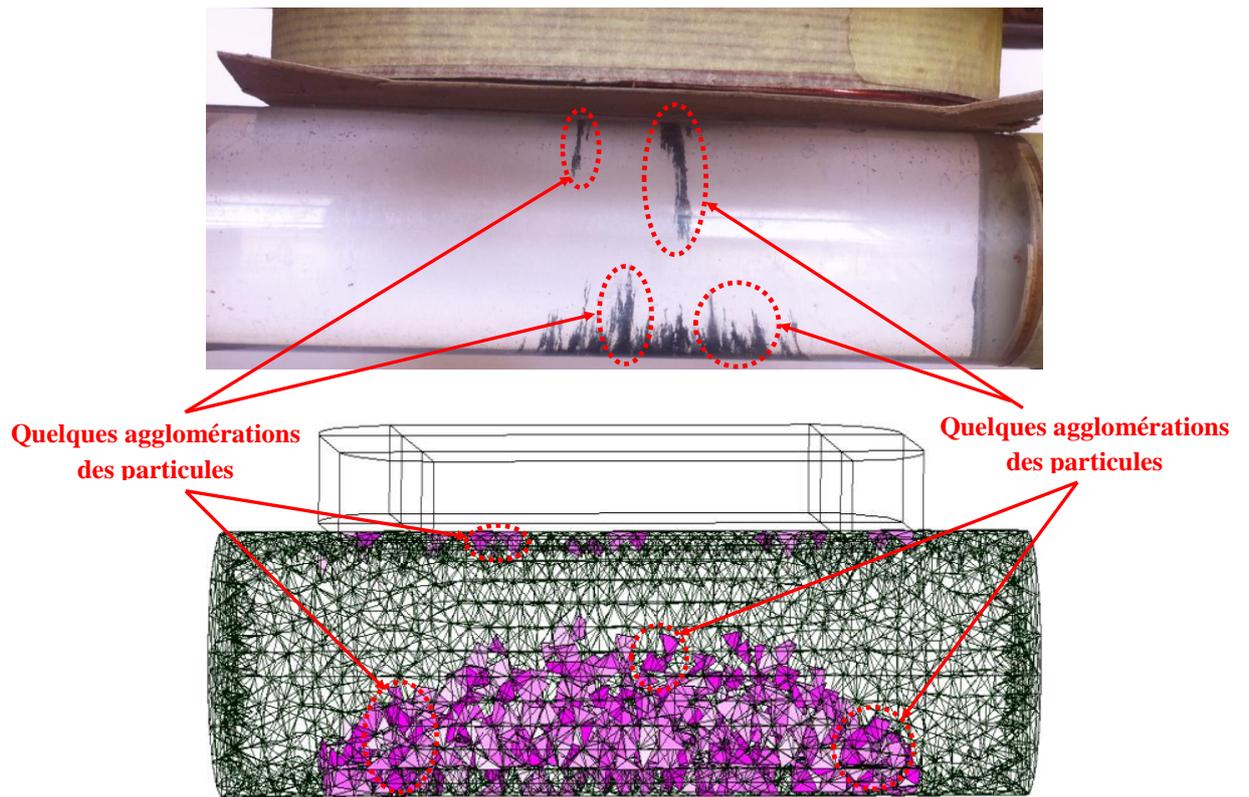
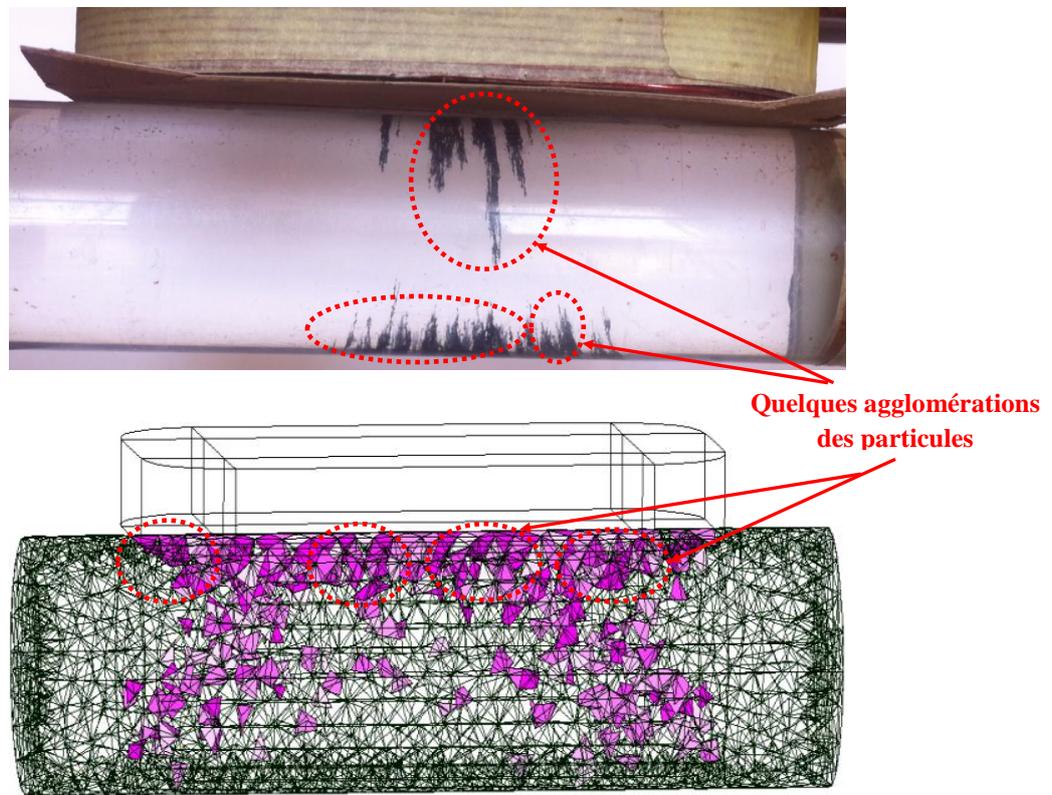


Figure 5.17. Dispositif expérimental réalisé

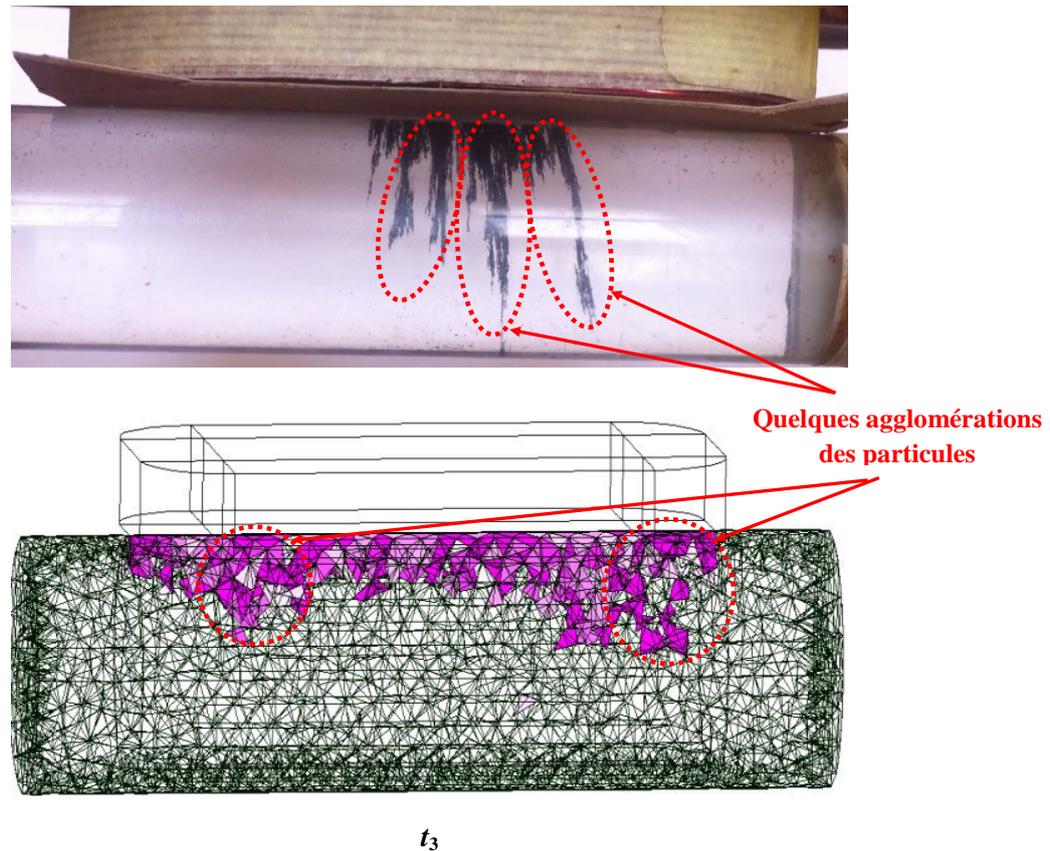
La comparaison entre des séquences enregistrées et des phases de calcul de la séparation est montrée dans la figure suivante :



$t_1$



$t_2$



**Figure 5.18. Agglomération transitoire des particules lors de processus de séparation.**

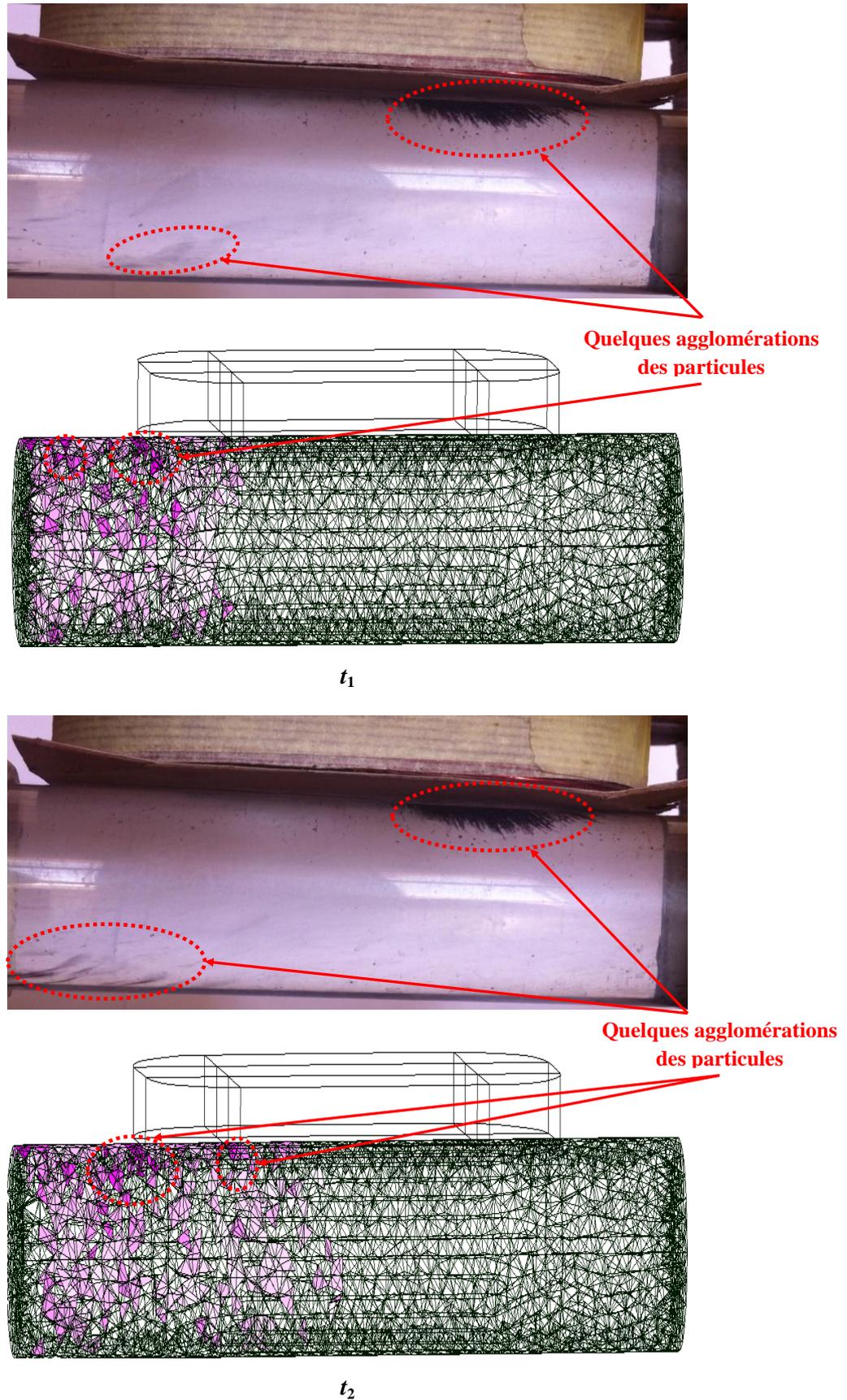
La figure montre clairement que notre approche tient en compte l'interaction particulaire d'origine magnétique ainsi que l'agglomération des particules avant leur capture finale. L'intensité de la couleur est proportionnelle avec la concentration des particules. Plus la concentration est importante plus la couleur est intense.

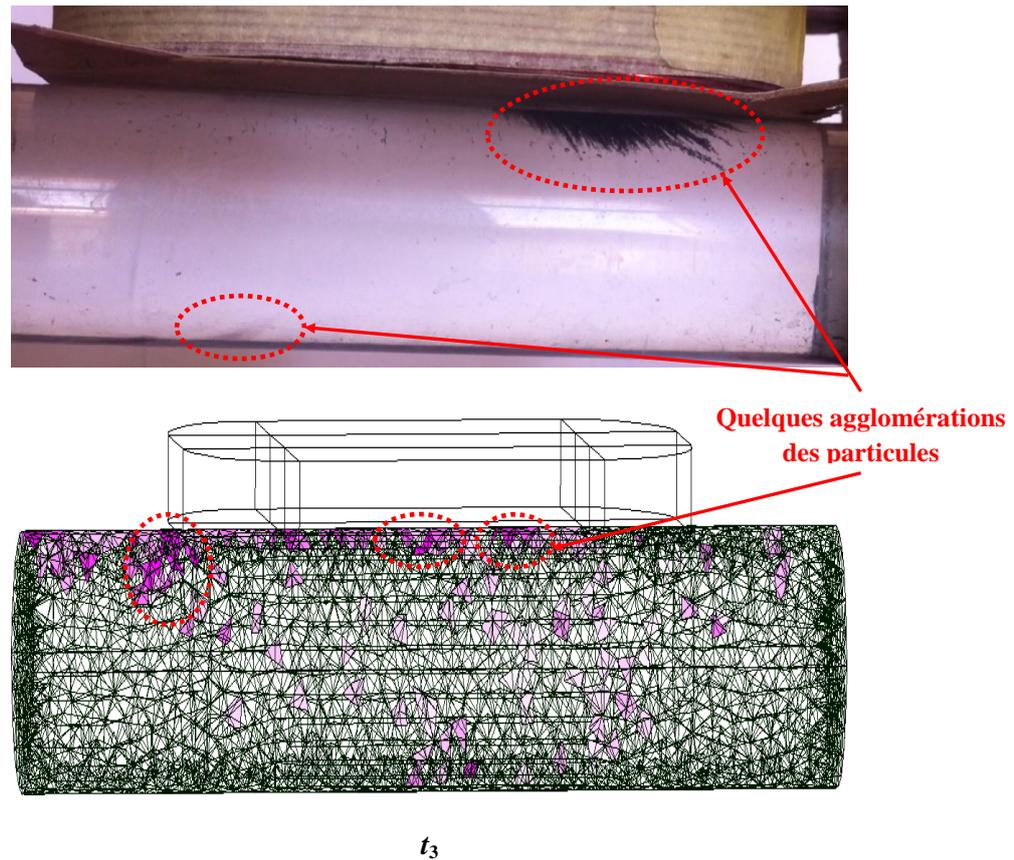
### 5.3.2. Cas d'un liquide en mouvement

Pour valider les résultats obtenus pour à un écoulement d'eau, nous avons utilisé le banc d'essai de la figure 5.3. L'eau est mis en écoulement à une vitesse moyenne  $U_1 = 0.62$  m/s dans un canal de diamètre  $D = 3.4 \times 10^{-2}$  m. L'injection des particules à travers l'ouverture (orifice) créée à l'entrée du séparateur permet d'obtenir une suspension de particules lors du passage de l'eau dans le séparateur.

Comme nous l'avons vu précédemment (chapitre 3), l'application de l'approche 3D développées a démontré sa capacité de prendre en compte l'interaction particulaire de type dipolaire magnétique. Cela se voit clairement dans les agglomérations des particules représentées pour les zones à couleur intense. Pour vérifier expérimentalement ce résultat, nous avons confronté les résultats théoriques et expérimentaux. La comparaison qualitative

de l'évolution de la dispersion des particules lors de la séparation est montrée dans la figure suivante :





**Figure 5.19. Agglomération transitoire des particules lors du processus de séparation.**

Malgré la difficulté de réaliser une comparaison parfaite entre les résultats expérimentaux et théoriques, nous avons pu faire une confrontation entre les évolutions des dispersions des particules pendant la séparation. Cette confrontation montre que théoriquement la capture commence au niveau de l'entrée du séparateur et s'étend pour couvrir toute la base du capteur. Pratiquement, la figure montre que la zone de capture est située au niveau du côté arrière du capteur. Ce fait est lié principalement à l'effet de l'écoulement qui porte les particules lors de leur agglomération jusqu'à cette zone où la force intense conduit à leur stabiliser dans cet endroit. Ce résultat montre que l'approche de particules équivalentes donne des résultats plus proches de la réalité du point de vue magnétique mais du point de vue hydraulique cette approche ne reflète pas exactement la réalité.

#### 5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étape de validation expérimentale des résultats obtenus. Malgré la différence entre les données utilisées dans la théorie (paramètres géométriques et propriétés physiques des particules et d'écoulement), une confrontation

qualitative a permis à des résultats approuvant la validation des approches de calcul et d'optimisation appliquées.

La vérification quantitative basée sur l'utilisation de la technique de l'effet Hall a permis de vérifier la capacité de séparation des prototypes réalisés ainsi que l'identification de la configuration qui donne les meilleurs performances. Le paramètre important négligé et qui peut améliorer notre validation est l'identification de la granulométrie réelle des particules qui influe fortement sur l'aimantation des particules et les contraintes hydrodynamiques appliquées.

## Conclusion Générale

Dans ce travail de thèse, nous avons traité un problème de la séparation magnétique en voie humide. Nous avons tout d'abord effectué un état de l'art sur la séparation magnétique ce qui nous a permis de se situer par rapport aux travaux déjà réalisés dans le domaine. Ensuite, nous avons procédé à l'élaboration des modèles mathématiques qui régissent les phénomènes en présence et le développement des codes de calcul nécessaires pour la simulation de la séparation magnétique. De telle simulation nous a permis de maîtriser les phénomènes en présence et l'identification des différents paramètres influant sur l'efficacité de la séparation. Cela, nous a permis par la suite de procéder à l'optimisation des séparateurs proposés. Pour le dernier cas, nous avons recherché le nombre de capteurs et leur positionnement sur le périmètre du canal pour aboutir aux meilleures performances de la séparation pour un écoulement d'eau dans un canal de diamètre important et vitesse significative.

Pour la validation des résultats obtenus, une série d'expérimentations a été effectuée et cela en réalisant un banc d'essai expérimental. Ce dernier permet d'obtenir des écoulements de différents régimes et l'injection des particules pour obtenir une suspension aléatoire. Pour quantifier le volume séparé des particules, une technique basée sur la technologie à effet Hall a été utilisée. Les résultats obtenus ont montré que dans des conditions spécifiques le séparateur qui permet une séparation très efficace est celui à trois capteurs décalés entre eux d'un angle  $120^\circ$ .

Pour permettre l'étude théorique de notre problème de séparation, des hypothèses simplificatrices ont été introduites. Nous nous sommes limités au traitement des écoulements d'eau à faibles concentrations globales en particules de fer. Ces gammes de concentration ont permis de considérer que les milieux traités sont non magnétiques. De même, les particules sont supposées homogènes et de taille fine de géométrie régulière sphérique.

Pour déterminer la perméabilité magnétique des particules, nous avons identifié expérimentalement la perméabilité magnétique du matériau duquel nous avons obtenu les particules. En réalité, les contraintes mécaniques dues au cisaillement du matériau ont un effet très fort sur les propriétés magnétiques des particules ce qui conduit à une perméabilité très différente que celle du matériau d'origine.

Lors de notre étude, l'effet des agglomérations transitoires des particules formées lors de leur mouvement a été pris en compte dans la résolution du problème magnétique. Cet effet a été

très faiblement pris en compte dans la résolution du problème hydraulique où on a considéré une particule équivalente d'un rayon équivalent qui dépend de la concentration locale des particules et qui remplace le volume de l'agglomérat dans chaque localité (éléments finis). Pendant l'étude, l'écoulement est considéré inchangeable et le champ de vitesse est calculé une seule fois au départ du processus de résolution.

La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux a montré un écart important concernant le lieu du dépôt statique des particules séparées. Cet écart est principalement lié à l'approche géométrique sphérique des agglomérations des particules qui sont en réalité des chaînes de particules fortement influées par l'écoulement. Cette influence apparait dans l'effet que ces chaînes sont attirées par l'écoulement jusqu'à la fin du capteur où l'agglomération de toutes les particules séparées conduit à une force très importante capable de les coller au capteur et qui domine l'effet des actions hydrodynamiques.

Comme perspective à ce travail, on va introduire une nouvelle approche statistique qui permet l'étude de l'évolution de la dispersion aléatoire des particules. En plus, on procédera à l'amélioration de l'approche 3D pour prendre en compte la forme géométrique réelle des agglomérations des particules. Sur le plan expérimental, on procédera à la mesure de la taille des particules ce qui permettra une comparaison exacte entre la théorie et l'expérimentation.

## **Bibliographie**

- [**Qing-tao 93**] G. Qing-tao, ‘‘ Separation efficiency of alumina particles in Al melt under high frequency magnetic field’’. *Article*. Elsevier, 2010.
- [**Maraspin 04**] F. Maraspin and al, ‘‘ Modelling the throw of metals and nonmetals in eddy current separations’’. *Article*. Elsevier, 2004.
- [**Ikezoe 02**] Y. Ikezoe and al, ‘‘ Separation of feeble magnetic particles with magneto-Archimedes levitations’’. *Article*. Elsevier, 2002.
- [**Zhenming Xu 11**] Y. Zhenming Xu, ‘‘ A new model of repulsive force in eddy current separation for recovering waste toner cartridges’’. *Article*. Elsevier, 2002.
- [**Zhang 99**] S. Zhang, ‘‘Particle trajectory simulation of two-drum eddy current separators’’. *Article*. ELSEVIER, 1999.
- [**Lungu 01**] M. Lungu, ‘‘ Vertical drum eddy current separators with permanent magnets’’. *Article*. Elsevier, 2001.
- [**Braam 88**] B. C. Braam, ‘‘ Eddy-current separation by permanent magnets Part II: Rotating Disc Separators’’. *Article*. Elsevier, 1988.
- [**Oda 87**] T. Oda, and al, ‘‘ Pulverized Goal Beneficiation by a fluidized High Gradient Magnetic Separation Process With Slotted Steel Plates’’. *Article*. IEEE Transactions on magnetics, 1987.
- [**Svoboda 04**]. J. Svoboda ‘‘Magnetic Techniques for the Treatment of Materials’’. *Kluwer Academic Publishers*, 2004.
- [**Bureau 93**] 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.
- [**Gillet 88**] G. Gillet ‘‘La séparation magnétique sous champs intenses en minéralurgie : les systèmes cryoélectriques’’. *Thèse de doctorat*. INP de Lorraine, Nancy.
- [**Gillet 03**] G. Gillet ‘‘Séparation magnétique à basse et à haute intensité’’. *J3221*. Techniques de l’ingénieur, Génie des procédés, Nancy, 2003.

- [Mariani 09]**. G. Mariani “Theoretical and Experimental Study of the Magnetic Separation of Pollutants from Wastewater”. *Thèse de doctorat*. Alma Mater Studiorum-University of Bologna.
- [Gillet 04]** G. Gillet “Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ”. *article*. Techniques de l'ingénieur, Génie des procédés, Nancy, 2004.
- [Šafaríková 00]**. M. Šafaríková “ The application of magnetic techniques in biosciences”. *article*. Magn. Electr. Separation. 2000.
- [Pasteur 14]** A. Pasteur and al, “Optimization of High Gradient Magnetic Separation Filter Units for the Purification of Fermentation Products” *Article*. IEEE Transactions on magnetics, 2014.
- [Hayashi 11]** S. Hayashi and al, ‘Study on High Gradient Magnetic Separation for Selective Removal of Impurity From Highly Viscous Fluid’ *Article*. IEEE Transactions on magnetics, 2011.
- [Sharma 15]** S. Sharma and al, “Mathematical modelling for trajectories of magnetic nanoparticles in a blood vessel under magnetic field,” *Article*, Elsevier, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015.
- [Lungu 09]** M. Lungu, “ Separation of small nonferrous particles using a two successive steps eddy-current separator with permanent magnets”. *Article*. ELSEVIER, 2009.
- [Mishima 07]** F. Mishima and al, “A superconducting magnetic separation system of ferromagnetic fine particles from a viscous fluid,” *Article*, Elsevier, *PHYSICA C*, 2007.
- [Nishimura 09]** K. Nishimura and al, “Removal of Radioactive Heavy Metal Ions From Solution by Superconducting High-Gradient Magnetic Separation With Schwertmannite and Zirconium-Ferrite Adsorbents,” *Article*, IEEE Transactions on applied Superconductivity, 2009.
- [Kim 15]** Y. G. Kim and al, “Purification of Chemical Mechanical Polishing Wastewater via Superconducting High Gradient Magnetic Separation System With Optimal Coagulation Process,” *Article*, IEEE Transactions on applied Superconductivity, 2015.
- [Fukui 04]** S. Fukui and al, “ Study on Open Gradient Magnetic Separation Using Superconducting Solenoid Magnet” *Article*, IEEE Transactions on applied Superconductivity, 2004.

- [**Takahashi 05**] M. Takahashi and al, “ Numerical Evaluation of Separation Characteristics of Open Gradient Magnetic Separation Using Quadrupole Magnetic Field” *Article*, IEEE Transactions on applied Superconductivity, 2005.
- [**Mehasni 07**]. R. Mehasni “Elaboration de modèles de calcul de dispositifs à induction électromagnétique : application a un système de séparation magnétique dans les milieux particuliers”, *Thèse de Doctorat*. Université de Constantine, 2007.
- [**Winters 90**]. A. J. Winters “Large-scale superconducting separator for kaolin processing”. *article*. Chem. Eng. Progress, 1990.
- [**Wang 96**]. Y. Wang and al “Development and application of magnetic separation techniques in processing Swedish minerals”. *Conférence*. South Africa, Proc. Int. Conf. "Minerals & Materials '96, South Africa.
- [**Williams 81**]. J. Williams and al “The application of HGMS in nuclear fuel reprocessing”. *article*. Nucl. Technol. 52, pp 284.
- [**Harding 81**] K. Harding, and al “Application of high gradient magnetic separation to ferric hydroxide filtration”. *article*. IEEE Transactions on magnetics, 1981.
- [**Tsuge 87**]. M Tsuge, and al “Treatment of cold rolling coolant for steel by HGMS. *article*. IEEE Transactions on magnetics, 1987.
- [**Corrans 85**] I. J. Corrans and al, “Magnetic Separation in South Africa”, *article*. Magnetic Separation News, 1985.
- [**Nunez 99**] L. Nunez and al, “ Superconducting Open-Gradient Magnetic Separation for the Pretreatment of Radioactive or Mixed Waste Vitrification Feeds”, *rapport*, Argonne National Laboratory, 1999.
- [**Svarovski 01**] L. Svarovski and al, “Solid-liquid separation”, *livre*, Elsevier, 2001.
- [**Hatch 01**] G. P. Hatch, “ Magnetic design considerations for devices and particles used for biological high-gradient magnetic separation (HGMS) systems”, *Article*, Elsevier, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001.
- [**Beharrell 04**] P. A. Beharrell, “Applications of Superconducting Magnetic Separation”, *Rapport*, Corporate Headquarters, San Diego, USA, 2004.
- [**Tarleton 06**] S. Tarleton and al, “Solid/Liquid separation”, *livre*, Elsevier, 2006.

- [Rocher 08]** V. Rocher, ‘‘ Synthèse et caractérisation de billes d’alginate magnétiques pour l’élimination de polluants organiques dans les effluents par séparation magnétique ‘’, *Thèse de Doctorat*, Université Pierre et Marie Curie, 2008.
- [Bertrand 10]** C. Bertrand, ‘‘Modélisation de la séparation magnétique de basse intensité sur tambours rotatifs.’’ *Mémoire*, Université Laval, 2010.
- [Ghasemlouy 11]** R. A. Ghasemlouy, ‘‘ Separation and Focusing of Magnetic Beads for Agglutination Tests’’, *Thèse de Doctorat*, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 2011.
- [Hournkumnuard 11]** K. Hournkumnuard and al, ‘‘Parallel simulation of concentration dynamics of nano-particles in High Gradient Magnetic Separation ‘’, *Article*, Elsevier, 2001.
- [Lohrengel 14]** S. Lohrengel, ‘‘Contributions aux méthodes numériques en électromagnétisme’’, *Mémoire Habilitation*, Ecole Doctorale Sciences, Technologies, Santé. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2014.
- [Katrib 11]** J. Katrib ‘‘Étude théorique et expérimentale des implants médicaux actifs en environnement électromagnétique : application aux défibrillateurs implantables en champ magnétique basse fréquence dans la bande 50 Hz-50 kHz’’. *Thèse de Doctorat*. Université Henri Poincaré – NANCY1, 2011.
- [Le Floch 02]** Y. Le Floch, ‘‘Développement de formulations 3D éléments finis T0 pour la prise en compte des conducteurs massifs et bobinés avec un couplage circuit’’. *Thèse de Doctorat*. Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, 2002.
- [Aubertin 11]** M. Aubertin, ‘‘Contribution à la modélisation 3d des systèmes électromagnétiques : étude de méthodes de recollement de maillages’’, *Thèse de doctorat de l’université de Lille*, 2011.
- [Magnet 13]** C. Magnet, ‘‘Mécanismes de capture de nanoparticules magnétiques : Application à la purification de l’eau’’, *Thèse de Doctorat*. Université Nice Sophia Antipolis, 2013.
- [Heyrendt 12]** L. Heyrendt. ‘‘Études 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.
- [Buzid 09].** S. Buzid ‘‘détection magnétique de matériaux enterres’’. *Thèse de Doctorat*. Université de Reims Champagne Ardenne, 2009.

[**Sihvola 92**]. A. H. Sihvila ‘‘Effective permeability of mixtures’’. *Article*, Elsevier, Sciences publishing Co. Progress In Electromagnetics research PIER 6, 1992.

[**Moon 94**] F. Moon ‘‘Superconducting levitation applications to bearings and magnetic transportation’’. *Liver*, Ithaca, New York, 1994.

[**Shevkoplyas 07**] S. Shevkoplyas, ‘‘the force acting on a superparamagnetic bead due to an applied magnetic Field’’, *Article*, Lab on a Chip, 2007.

[**Durand 68**] E. Durand, ‘‘Magnétostatique’’, *Masson et Cie*, 1968.

[**Louisnard 12**] O. Louisnard, ‘‘Cours de mécanique des fluides’’, *Livre*, 2012.

[**Ancey 15**] C. Ancey, ‘‘Notes de cours Mécanique des fluides’’, *Livre*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Ecublens, 2015.

[**Plaut 15**] E. Plaut, ‘‘Mécanique des milieux continus’’, *Livre*, Mines Nancy. 2015.

[**Brun 08**]. J. M. Brun ‘‘Mécanique des fluides. *Livre*, 2008.

[**Machicoane 14**] N. Machicoane, ‘‘Particules matérielles en écoulement turbulent. Transport, dynamique aux temps longs et transfert thermique’’, *Thèse de Doctorat*, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 2014.

[**Thual 10**] O. Thual, ‘‘Hydrodynamique de l’environnement’’, *Cours*, Ecole Polytechnique, Université de Toulouse, 2010.

[**Bigillon 01**]. F. Bigillon ‘‘Etude du mouvement bidimensionnel d’une particule dans un courant d’eau sur forte pente’’. *Thèse de Doctorat*. Université Grenoble 1- Joseph Fourier, 2001.

[**Bratu 89**]. C. Bratu et al ‘‘Simulation numérique par éléments finis de l’écoulement turbulent autour d’un outil de forage’’. *Article*, 2<sup>ème</sup> Journées de l’hydrodynamique. Nantes, 1989.

[**Pinson 06**] F. Pinson, ‘‘Modélisation à l’échelle Macroscopique d’un écoulement turbulent au sein d’un milieu poreux’’, *Thèse de Doctorat*, institut national Polytechnique de Toulouse, 2006.

[**Motta 13**] J. C. B. Motta. ‘‘Simulation des écoulements turbulents avec des particules de taille finie en régime dense’’. *Thèse de Doctorat*. Université de Toulouse, 2013.

[**Bonnefoy 15**] O. Bonnefoy, ‘‘Approche microscopique des écoulements polyphasiques’’, *Cours*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2015.

**[Chrust 12]** M. Chrust “Etude numérique de la chute libre d'objets axisymétriques dans un fluide newtonien”. *Thèse de Doctorat*. Université de Strasbourg, 2012.

**[Stout 07]** B. Stout, “Méthodes numériques de résolution d'équations différentielles”, *Cours*, Université de Provence Institut Fresnel, 2007.

**[Descombes 08]** S. Descombes, “ Résolution de systèmes d'équations différentielles ordinaires non raides et raides”, *Cours*, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2008.

**[Williams 10]** P. S. Williams, and all, “Characterization of magnetic nanoparticles using programmed quadrupole magnetic field-flow fractionation”, *Article*, Philos. Trans. Roy. Soc. London A, Math. Phys. Sci., 2010.

**[Porte 02]** C. Porte “ Méthodes directes d'optimisation - Méthodes à une variable et Simplex”. *Livre*. Techniques de l'ingénieur, 2002.

**[Ciuperca 12]** I. S. Ciuperca “ Cours optimisation”. *Cours*. Université Claude Bernard Lyon-1, 2002.

**[Berthiau 94]** G. Berthiau, “ La méthode du recuit simulé pour la conception des circuits électroniques : Adaptation et comparaison avec d'autres méthodes d'optimisation”, *Thèse de doctorat*, Ecole centrale de Paris, 1994.

## Production personnelle

- 1- Abdallah. Belounis, R. Mehasni, M. Ouili, M. Feliachi, M EL-H. Latreche, “Design With Optimization of a Magnetic Separator for Turbulent Flowing Liquid Purifying Applications” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, no. 8, pp. 4003508, August 2015.  
DOI: 10.1109/TMAG.2015.2424401  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7089255&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F20%2F4479871%2F07089255.pdf%3Farnumber%3D7089255>
- 2- Abdallah. Belounis, R. Mehasni, M. Ouili, M EL-H. Latreche, “Optimization of the capture element for an OGMS based on the 3D computation of the magnetic particle behavior” *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 48, no. 4, pp. 387-397, July 2015.  
DOI: 10.3233/JAE-140157  
<http://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae140157>
- 3- Abdallah. Belounis, R. Mehasni, M. Ouili, M. Feliachi, M EL-H. Latreche, “Optimization of a dual capture element magnetic separator for the purification of high velocity water flow” *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* Vol. 73, no. 2, p1-p6, 20601. Feb 2016.  
DOI: 10.1051/epjap/2016150372  
<http://www.epjap.org/articles/epjap/pdf/2016/02/ap150372.pdf>
- 4- A. Belounis, R. Mehasni M.E.Latreche and M.Feliachi, “Definition of a Magnetic Separator for Turbulent Flowing Liquids Purifying Applications”. *CEFC 2014, 16<sup>th</sup> biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Annecy, France no.122. pp1. May 25-28, 2014.
- 5- A. Belounis, R. Mehasni, M. Ouili, M. Feliachi, M EL-H. Latreche, “Optimisation d’un Séparateur Magnétique Double Capteur Pour La Purification de Liquides en écoulement à Vitesses élevées”, *NUMELEC 2015, 8th European Conference on Numerical Methods in Electromagnetics*, Saint-Nazaire, France, June 3-5, 2015.
- 6- A. Belounis, R. Mehasni, M. Ouili, M. Feliachi, M EL-H. Latreche, “Design of a Magnetic Separator Based on The Local Concentration of The Applied Magnetic Force”, *ISEF 2015, XVII International symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Valencia, Spain, September 10-12, 2015
- 7- Belounis, R. Mehasni, M. Ouili and M.E. Latreche, “3D optimization of the capture element in an OGMS based on the particle motion computation”, *Coi3, 3<sup>ème</sup> Colloque inductique*, Tizi-Ouzou, Algérie no.06, p1-p2, 24-25 Avr, 2013.

## ملخص

يعتبر هذا العمل مساهمة في دراسة مشاكل العزل المغناطيسي. إنه عبارة عن دراسة ثلاثية الأبعاد للظواهر الموجودة (المغناطيسية، الهيدروليكية و الديناميكية للجزيئات) و كذلك تصميم و إنجاز نموذج موجه لتصفية ماء متدفق وذلك باستخراج جزيئات من الحديد ذات حجم دقيق. و لهذا تم تكييف و استعمال مقاربة رقمية في شكل ثلاثي الأبعاد و ذلك للأخذ بالحسبان و بطريقة دقيقة للقوى المغناطيسية و الهيدروديناميكية المؤثرة على الجزيئات. دراسة سلوك عشوائي للجزيئات داخل تدفق دوامي للماء يسمح بتحديد الوسائط المؤثرة على النجاعة العزلية و التي تعتبر كمفاتيح لتحسين جهاز العزل المقترح. التحسين المنجز على الجهاز المقترح أعتمد على البحث عن القيمة الصغرى للدالة الهدف و التي هي المسافة بين نقطة وسط اللاقط و نقطة التقاط جزيئة معينة. اين تم اختيار الشروط الإبتدائية على أساس خصائص التدفق و المجال المغناطيسي المطبق. من أجل هذا استعملت طريقة البحث طابو. نتائج التحسين المحصل عليها بينت أن أحسن نجاعة عزل حصلت بواسطة عازل ذو ثلاث لواقط مثبتة بفرق زاوي  $120^\circ$ . من أجل التحقق من النتائج المحصل عليها أجريت عدة تجارب. نظام التدفق حصل بواسطة نظام ضخ اللواقط المستعملة عبارة عن وشائع كهرومغناطيسية ماثائلة ذات شكل مستطيل. الجزيئات المراد عزلها غمست في السائل المراد معالجته عن طريق فتحة صممت عند مدخل القناة. من أجل مراقبة حركة الجزيئات و ترتيبها بعد العزل استعملنا آلة تصوير. من أجل قياس حجم الجزيئات المعزولة استعملنا جهاز ذا استعمال مبني على تقنية مفعول هول.

كلمات مفاتيح: ربط مغنوديناميكي، العناصر المنتهية، المجانسة، التكييف و الأختيار، الجزيئات الدقيقة، الجزيئات المتحركة و الموجهة، العزل و الألتقاط المغناطيسي

## Résumé

Ce travail présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique. Il s'agit d'une étude 3D des phénomènes magnétique, hydraulique et dynamique particulaire présents, de la conception et de la réalisation d'un prototype destiné à la purification de l'eau en écoulement par extraction des particules de fer de taille fine. Une approche numérique a été adaptée et utilisée dans une configuration tridimensionnelle qui présente l'avantage de prendre en compte les effets réels des actions magnétiques et hydrodynamiques appliquées sur les particules à séparer. L'étude du comportement d'une dispersion aléatoire des particules dans un écoulement turbulent a permis l'identification des paramètres influant sur les performances de la séparation et qui sont considérés comme des clés de l'optimisation du séparateur proposé. L'optimisation effectuée a été basée sur la minimisation d'une fonction objectif qui est la distance entre le point milieu du capteur et le lieu de capture d'une particule où les conditions initiales ont été choisies en fonction des spécifications de l'écoulement et du champ appliqué. Pour cela, la méthode de recherche Tabou a été appliquée. Les résultats de l'optimisation ont montré que les meilleures performances ont été obtenues par un séparateur à trois capteurs décalés l'un de l'autre d'un angle de  $120^\circ$ . Pour la validation de ces résultats, des expérimentations ont été effectuées. Le régime d'écoulement est obtenu par un système de pompage. Les capteurs sont des électroaimants identiques rectangulaires. Les particules sont injectées à travers un orifice situé à l'entrée du canal. Pour contrôler le mouvement des particules et leur dépôt, une caméra a été utilisée. Le volume capturé a été quantifié en utilisant un dispositif de mesure de champ à effet Hall.

**Mots clés : Éléments finis 3D, écoulement turbulent, homogénéisation locale, optimisation, particules ferromagnétiques, séparation magnétique.**

## **Abstract**

This work presents a contribution to the study of the problems of the magnetic separation. It is a 3D study of the existing magnetic, hydraulic and particle dynamic phenomena, the conception and the realization of a prototype intended to purify flowing water by the extraction of contained ferromagnetic fine particles. A numerical approach has been adapted and used in a 3D configuration. Such approach permits the taking into account the real effect of the acting magnetic and hydrodynamic actions applied on the particles. The study of the particle behaviour in water turbulent flow has permitted the identification of the parameters influencing on the separation performances. These parameters are considered as optimization keys of the proposed device. The optimization was based on the minimization of an objective function which is the distance between the central point of the capture element and the capture site of a given particle with initial conditions chosen as a function of the flow and applied field specifications. To implement the optimization approach, the Tabu search method has been used. The obtained results have shown that the best capture is obtained by a separator with three capture element spaced between them by an angle of  $120^\circ$ . For a practical validation, a device has been realized and experiments have been achieved. The flow regime is obtained by a pumping system. The capture elements are identical rectangular electromagnets. The particles are injected through an opening made in the entrance of the channel. For a quantitative validation, the particle motion and the captured particle build-up have been controlled by a camera. The quantitative validation has been achieved by using a Hall effect sensing device.

**Keywords: 3D finite element, turbulent flow, local homogenization, optimization, ferromagnetic particles, magnetic separation**

يعتبر هذا العمل مساهمة في دراسة مشاكل العزل المغناطيسي. إنه عبارة عن دراسة ثلاثية الأبعاد للظواهر الموجودة (المغناطيسية، الهيدروليكية و الديناميكية للجزيئات) وكذلك تصميم و إنجاز نموذج موجه لتصفية ماء متدفق وذلك باستخراج جزيئات من الحديد ذات حجم دقيق. ولهذا تم تكيف و استعمال مقاربة رقمية في شكل ثلاثي الأبعاد و ذلك للأخذ بالحسبان و بطريقة دقيقة للقوى المغناطيسية و الهيدروديناميكية المؤثرة على الجزيئات. دراسة سلوك عشوائي للجزيئات داخل تدفق دوامي للماء يسمح بتحديد الوسائط المؤثرة على النجاعة الدالية و التي تعتبر كمفاتيح لتحسين جهاز العزل المقترح. التحسين المنجز على الجهاز المقترح أعتمد على البحث عن القيمة الصغرى للدالة الهدف و التي هي المسافة بين نقطة وسط اللاقط و نقطة التقاط جزيئة معينة. اين تم اختيار الشروط الابتدائية على أساس خصائص التدفق و المجال المغناطيسي المطبق. من أجل هذا استعملت طريقة البحث طابو. نتائج التحسين المحصل عليها بينت أن أحسن نجاعة عزل حصلت بواسطة عازل ذو ثلاث لواقط مثبتة بفرق زاوي  $120^\circ$ . من أجل التحقق من النتائج المحصل عليها أجريت عدة تجارب. نظام التدفق حصل بواسطة نظام ضخ. اللواقط المستعملة عبارة عن وشائع كهرومغناطيسية ماثالة ذات شكل مستطيل. الجزيئات المراد عزلها غمست في السائل المراد معالجته عن طريق فتحة صممت عند مدخل القناة. من أجل مراقبة حركة الجزيئات و ترتيبها بعد العزل استعملنا آلة تصوير. من أجل قياس حجم الجزيئات المعزولة استعملنا جهاز ذا استعمال مبني على تقنية مفعول هول.

كلمات مفاتيح: ربط مغنوديناميكي، العناصر المنتهية، المجانسة، التكيف و الاختيار، الجزيئات الدقيقة، الجزيئات المتحركة و الموجهة، العزل و الألتقاط المغناطيسي

## Résumé

Ce travail présente une contribution à l'étude des problèmes de la séparation magnétique. Il s'agit d'une étude 3D des phénomènes magnétique, hydraulique et dynamique particulaire présents, de la conception et de la réalisation d'un prototype destiné à la purification de l'eau en écoulement par extraction des particules de fer de taille fine. Une approche numérique a été adaptée et utilisée dans une configuration tridimensionnelle qui présente l'avantage de prendre en compte les effets réels des actions magnétiques et hydrodynamiques appliquées sur les particules à séparer. L'étude du comportement d'une dispersion aléatoire des particules dans un écoulement turbulent a permis l'identification des paramètres influant sur les performances de la séparation et qui sont considérés comme des clés de l'optimisation du séparateur proposé. L'optimisation effectuée a été basée sur la minimisation d'une fonction objectif qui est la distance entre le point milieu du capteur et le lieu de capture d'une particule où les conditions initiales ont été choisies en fonction des spécifications de l'écoulement et du champ appliqué. Pour cela, la méthode de recherche Tabou a été appliquée. Les résultats de l'optimisation ont montré que les meilleures performances ont été obtenues par un séparateur à trois capteurs décalés l'un de l'autre d'un angle de  $120^\circ$ . Pour la validation de ces résultats, des expérimentations ont été effectuées. Le régime d'écoulement est obtenu par un système de pompage. Les capteurs sont des électroaimants identiques rectangulaires. Les particules sont injectées à travers un orifice situé à l'entrée du canal. Pour contrôler le mouvement des particules et leur dépôt une caméra a été utilisée. Le volume capturé a été quantifié en utilisant un dispositif de mesure de champ à effet Hall.

**Mots clés :** Eléments finis 3D, écoulement turbulent, homogénéisation locale, optimisation, particules ferromagnétiques, séparation magnétique.

## Abstract

This work presents a contribution to the study of the problems of the magnetic separation. It is a 3D study of the existing magnetic, hydraulic and particle dynamic phenomena, the conception and the realization of a prototype intended to purify flowing water by the extraction of contained ferromagnetic fine particles. A numerical approach has been adapted and used in a 3D configuration. Such approach permits the taking into account the real effect of the acting magnetic and hydrodynamic actions applied on the particles. The study of the particle behaviour in water turbulent flow has permitted the identification of the parameters influencing on the separation performances. These parameters are considered as optimization keys of the proposed device. The optimization was based on the minimization of an objective function which is the distance between the central point of the capture element and the capture site of a given particle with initial conditions chosen as a function of the flow and applied field specifications. To implement the optimization approach, the Tabu search method has been used. The obtained results have shown that the best capture is obtained by a separator with three capture elements spaced between them by an angle of  $120^\circ$ . For a practical validation, a device has been realized and experiments have been achieved. The flow regime is obtained by a pumping system. The capture elements are identical rectangular electromagnets. The particles are injected through an opening made in the entrance of the channel. For a quantitative validation, the particle motion and the captured particle build-up have been controlled by a camera. The quantitative validation has been achieved by using a Hall effect sensing device.

**Keywords:** 3D finite element, turbulent flow, local homogenization, optimization, ferromagnetic particles, magnetic separation