

5.1. AUGMENTATION DE LA TENEUR EN FER DANS LA FRACTION MAGNÉTIQUE

Dans cette section, l'influence de la préparation du matériel avant le processus de séparation sur le taux de récupération et la teneur en fer de la fraction magnétique est abordée. Ensuite, les effets des paramètres géométriques et opérationnels du processus seront présentés. Enfin, les résultats des simulations numériques permettant d'appuyer les essais expérimentaux sont présentés et discutés.

5.1.1. Résultats expérimentaux

5.1.1.1. Effet de la préparation du matériel

L'observation du comportement du matériel face au champ magnétique et sa caractérisation (présentés dans les sections 4.1 et 4.2 respectivement) ont montré que le résidu de bauxite calciné doit être préparé avant d'être séparé.

5.1.1.1.1. Broyage

Le résidu de bauxite a été broyé dans un broyeur à barre. Le procédé vise à libérer les inclusions et d'uniformiser la granulométrie par rapport à un matériel non broyé. La Figure 5.55 et la Figure 5.54 présentent les effets du broyage sur le taux de récupération et la teneur en fer de la fraction magnétique à différents débits d'eau lors du processus de séparation. Les essais ont été réalisés avec la première configuration des aimants (deux aimants permanents disposés de part et d'autre du tube de plexiglas). La masse de matériel dans le circuit est de 5 g soit une

concentration solide de 2,5 g/L. On peut remarquer que le broyage n'améliore pas le taux de récupération du fer dans la fraction magnétique qui diminue lorsque le débit d'eau augmente. En revanche, la teneur en fer de la fraction magnétique est plus élevée lorsque le matériel est broyé et augmente avec le débit. Autrement dit, la fraction magnétique contient moins de fer mais celui-ci est plus pur lorsque le matériel a été initialement broyé. En distinguant quatre types de particules (magnétiques, non-magnétiques, magnétiques avec inclusions non-magnétiques et non-magnétiques avec inclusions magnétiques), les résultats peuvent s'expliquer de la manière suivante :

- Lorsque le matériel n'est pas broyé, les quatre types de particules sont attirées par les aimants. En augmentant le débit d'eau, les particules non-magnétiques sont décollées des aimants par l'eau. Les trois autres types de particules restent collées sur la surface intérieure du tube à chaque aimant. Ainsi, le taux de récupération reste élevé car la majorité des particules contenant du fer magnétique sont attirées sur les aimants, mais la teneur en fer augmente peu car il reste toujours beaucoup de particules contaminants.
- Lorsque le matériel est broyé, la granulométrie est uniformisée, il y a moins d'agrégats, et une partie des inclusions est libérée. Cependant, seules les particules magnétiques les plus grosses et fortement magnétiques vont demeurer sur les aimants, les particules moins magnétiques vont être entraînées par le débit d'eau. Ce phénomène s'accroît en augmentant le débit puisque la force de traînée augmente avec celui-ci. En effet, le broyage a permis de réduire la taille des particules, et la force de traînée hydrodynamique ressentie par les particules les plus

fines surpasse la force magnétique, et celles-ci sont entraînées par la circulation d'eau.

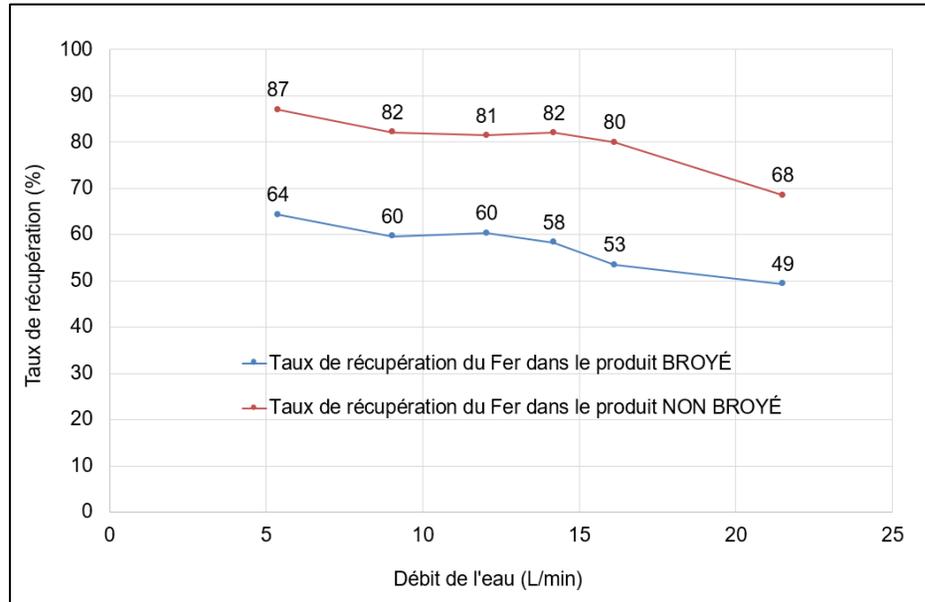


Figure 5.55 - Taux de récupération du fer dans la fraction magnétique à différents débits d'eau ©Yoann Robert

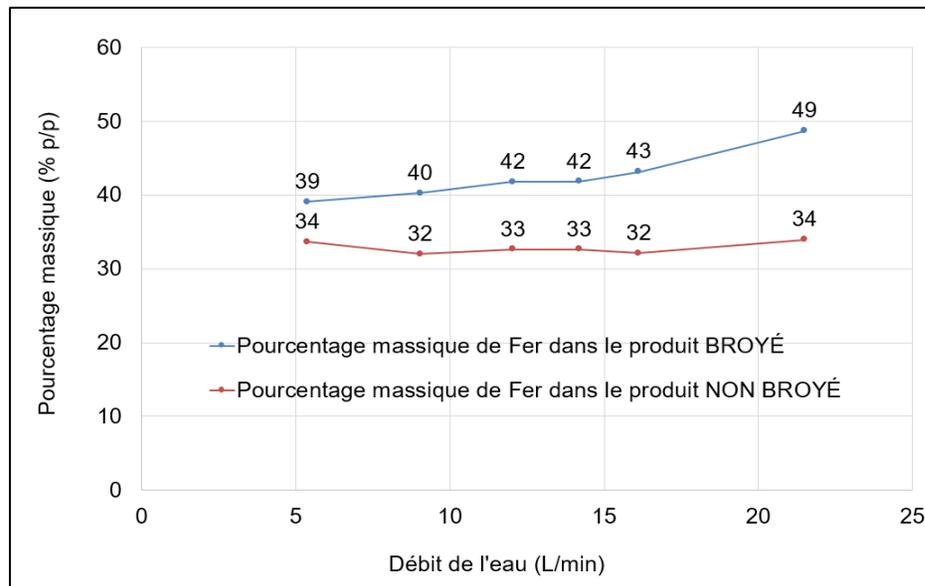


Figure 5.54 - Effet du broyage sur la teneur en fer de la fraction magnétique à différents débits d'eau ©Yoann Robert

5.1.1.1.2. Mise en pâte

Malgré le broyage, les agrégats subsistent toujours dans le matériel. La granulométrie est très fine et les forces de surface entre les particules sont très fortes provoquant l'agglomération des particules. La mise en pâte effectuée dans un mixeur de cuisine permet de détruire les agrégats et limiter de nouvelles agglomérations de particules. Ces dernières mises en suspension sont maintenues en mouvement dans le liquide. Le Tableau 5.18 montre que la mise en pâte a un effet positif sur la teneur en fer dans la fraction magnétique. Le broyage, suivi d'une mise en pâte, avant la séparation magnétique, conduit à une augmentation de la teneur en fer d'environ 10 à 12 % en poids (absolue) plus élevée dans la fraction magnétique. La première séparation correspond à un premier procédé de séparation, la fraction magnétique est ensuite récupérée et réinjectée dans le système afin de procéder à une seconde séparation pour augmenter la teneur en fer. Le taux de récupération entre les différents tests se situe entre 30 et 35 %.

Tableau 5.18 - Effet de la mise en pâte sur la teneur en fer dans la fraction magnétique

	1ère séparation (% p/p)	2ème séparation (% p/p)
Pas de mise en pâte	42,7	47,0
Mise en pâte	52,3	59,3

5.1.1.2. Effet du débit

La variation du débit a une grande influence sur le taux de récupération du fer et la teneur en fer de la fraction magnétique. La Figure 5.55 et la Figure 5.54, présentées à la section 5.1.1, montrent ces effets. L'augmentation du débit d'eau dans le circuit diminue le taux de récupération du fer dans la fraction magnétique, car l'eau va décoller les particules faiblement magnétiques (contenant des oxydes de fer magnétique avec inclusion non-magnétique et vice-versa) ou les plus éloignées des aimants. Ce décollement s'explique par la différence d'intensité entre la force de trainée hydrodynamique et la force magnétique, cette dernière devenant plus faible pour des particules faiblement magnétiques et à plus forte raison si elles sont éloignées des aimants. À contrario, l'augmentation du débit permet d'augmenter le teneur en fer de la fraction magnétique, le flux d'eau permettant de décoller les particules non-magnétiques ou faiblement magnétique, seules les particules fortement magnétiques restent collées aux aimants, ainsi la teneur en magnétite augmente dans la fraction magnétique.

5.1.1.3. Effets de la concentration solide

5.1.1.3.1. Concentration solide de la pâte

Les effets de la concentration solide de préparation de la pâte sur la séparation magnétique ont été évalués. Quatre concentrations solides ont été testées : 200, 374, 550 et 740 g/L. La préparation de la pâte est effectuée dans un mélangeur de cuisine à haute vitesse à température ambiante (25 °C) pendant une durée de 2 min. Le Tableau 5.19 présente les différentes teneurs en fer selon la concentration solide de la pâte. Les teneurs en fer dans la fraction magnétique sont assez proches (entre 46 et 52 % p/p) avec une valeur maximale de 52 % p/p lorsque la pâte a une concentration solide de 374 g/L.

Tableau 5.19 - Teneur en fer en fonction de la concentration solide de la pâte

Concentration solide de la pâte (g/L)	200	374	550	740
Teneur en fer (% p/p)	46	52	48	48

Il semble que la valeur de 374 g/L permet d'obtenir une pâte dans laquelle le nombre de particules est optimal pour les maintenir en mouvement sans qu'elles s'agglomèrent. La concentration de 374 g/L sera retenue pour la suite des expérimentations sur le montage.

5.1.1.3.2. Concentration solide dans le circuit

Une fois la pâte préparée, une certaine quantité est prélevée puis diluée dans le circuit avant le début du processus de séparation. Les quantités prélevées dépendent de la concentration solide désirée dans le circuit. Pour les expérimentations effectuées sur le premier montage, la concentration solide dans le circuit varie entre 2,5 et 20 g/L. Les expérimentations ont été réalisées avec une pâte d'une concentration solide de 374 g/L et avec un débit d'eau de 15 L/min. La Figure 5.56 présente les effets de la variation de la concentration solide sur le taux de récupération et la teneur en fer de la fraction magnétique. Lorsque la concentration solide augmente, le taux de récupération diminue d'un maximum de 39 % à 2,5 g/L jusqu'à un minimum de 30 % à 20 g/L; alors que la teneur en fer reste presque constante entre 54 et 51 % (p/p). L'augmentation de la concentration augmente le nombre de particules dans le circuit. Les aimants sont rapidement saturés en particules magnétiques et ne peuvent pas récupérer plus de particules. Malgré une baisse du taux de récupération, l'augmentation de la concentration solide influence très faiblement la teneur en fer dans la fraction magnétique.

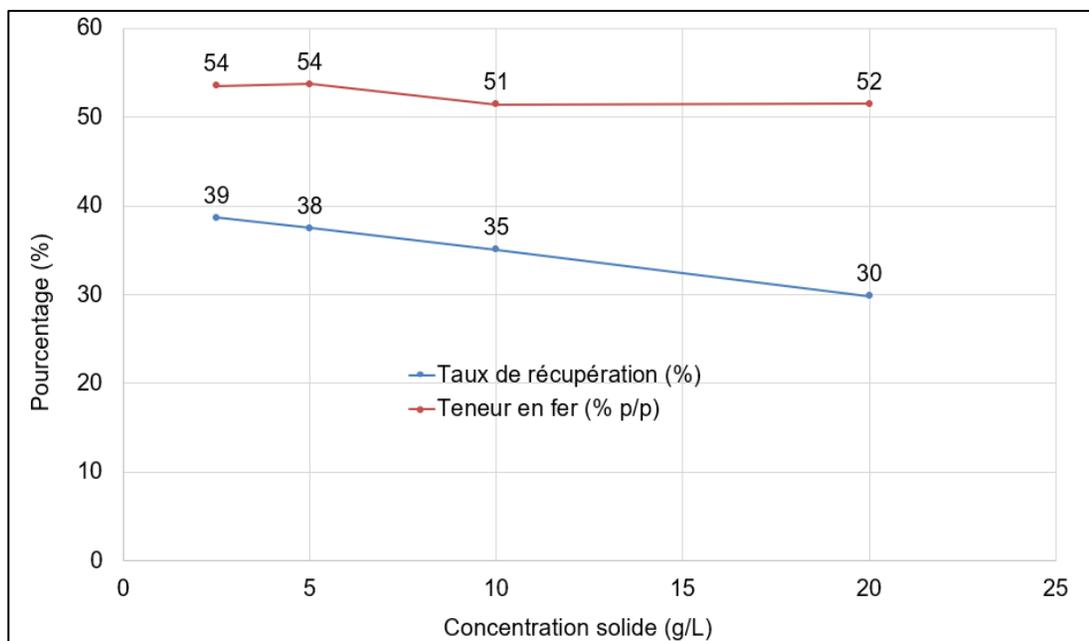


Figure 5.56 - Effets de la concentration solide sur la séparation magnétique ©Yoann Robert

5.1.1.4. Configuration des aimants

Les effets de la configuration des aimants (distanciation entre le tube et les aimants et influence de chaque aimant) ont été évalués. Pour ces essais, c'est la seconde configuration d'aimants, présentée à la section 4.3.2 qui est utilisée. Ainsi, plusieurs distances entre le tube et les aimants ont été testées : 0, 3,0, 6,5 et 13,0 mm. Les tests ont été réalisés avec une concentration solide de 5 g/L avec un débit de circulation de 21,5 L/min. Le Tableau 5.20 montre la teneur en fer dans la fraction magnétique mesurée pendant les tests. Au plus proche des aimants, la teneur en fer est maximale à 59 % (p/p) et minimale à 37 % (p/p) pour une distance de 13,0 mm. Il est évident que le champ magnétique est le plus fort lorsque le tube est au plus proche des aimants. Mais il s'agit d'évaluer s'il est possible de conserver une teneur en fer optimale avec un champ magnétique minimal, permettant de statuer

sur la puissance des aimants ou du système magnétique sur un équipement industriel.

Tableau 5.20 - Teneur en fer dans la fraction magnétique selon la distance entre le tube et les aimants

Distance entre le tube et les aimants (mm)	0	3,0	6,5	13,0
Teneur en fer dans la fraction magnétique (% p/p)	59	47	46	37

Ensuite, l'influence de chaque aimant a été évaluée, c'est-à-dire, si un aimant récupère une fraction magnétique avec une plus grande teneur en fer qu'un autre aimant. Les tests ont été effectués à une concentration solide de 5 g/L avec un débit de 21,5 L/min. Le Tableau 5.21 présente les teneurs en fer de la fraction magnétique sur chaque aimant. Les teneurs en fer sont sensiblement identiques. Il n'y a pas d'aimant qui récupère une fraction magnétique de « meilleure » qualité. Il est observé que si un aimant est saturé de particules, les particules vont se coller aux aimants suivants et ainsi de suite. Le taux de récupération des oxydes de fer est entre 30 et 35 %.

Tableau 5.21 - Teneur en fer sur chaque aimant

Aimants	Aimant 1	Aimant 2	Aimant 3	Aimant 4
Teneur en fer (% p/p)	59	57	58	58

5.1.1.5. Effet du nombre de cycle de séparation

Les effets du nombre de séparation ont été évalués sur le montage expérimental. Un cycle de séparation se définit comme un processus de séparation de 4 minutes (voir section 4.3.2.2.). Après le premier cycle de séparation, la fraction magnétique est récupérée, puis réinjectée dans le système pour un autre cycle de séparation. Entre chaque cycle de séparation, la fraction magnétique est filtrée, et analysée par gravimétrie et analyses XRF pour déterminer le taux de récupération et la teneur en fer. La Figure 5.57 indique la teneur en fer dans la fraction magnétique après chaque cycle de séparation. Les tests ont été réalisés avec une pâte d'une concentration de 374 g/L avec un débit d'eau de 15 L/min. D'une teneur initiale en fer de 30 % p/p dans le matériel brut, une première séparation augmente la teneur à 52 % p/p. Celle-ci atteint un plateau d'environ 60 % p/p après la seconde séparation. Cependant, le taux de récupération est de 35 % après la première séparation puis tombe à 11 % après la quatrième séparation. Augmenter le nombre de séparations permet de purifier la fraction magnétique mais engendre des pertes de matériel diminuant le taux de récupération.

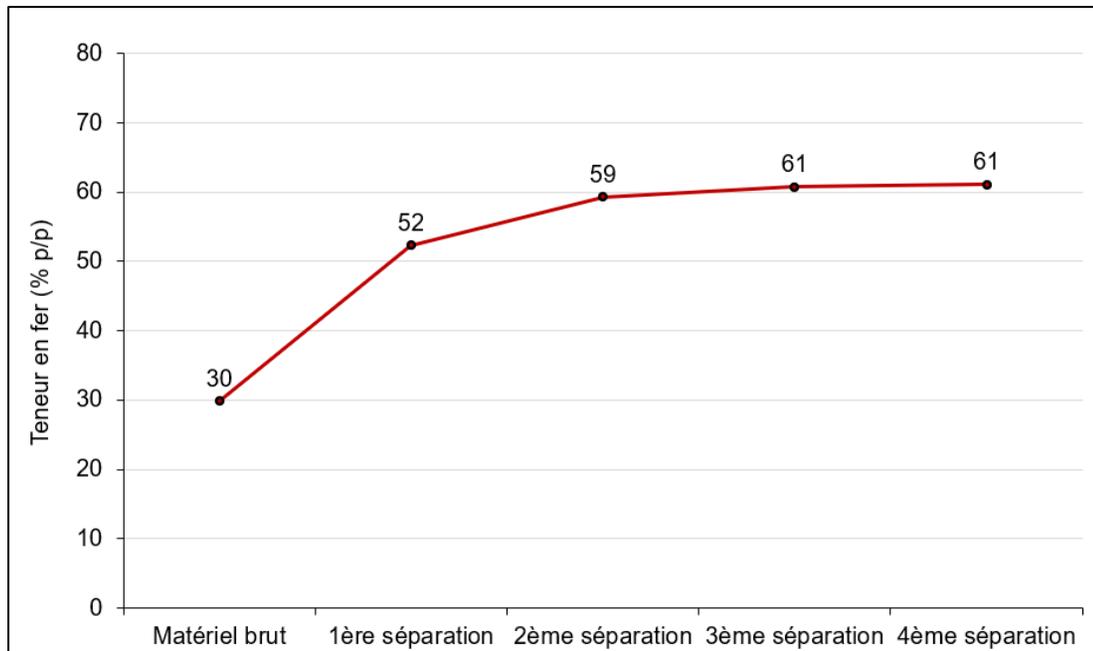


Figure 5.57 - Effet du nombre de cycles de séparation sur la séparation magnétique
©Yoann Robert

5.1.2. Simulation numérique

Un modèle numérique du processus de séparation magnétique a été développée en simultanément avec les tests expérimentaux. Cette simulation permet d'une part de comprendre le processus de séparation, de visualiser le mouvement des particules dans l'écoulement et les interactions avec le champ de force. D'autre part, elle permet aussi de tester certaines combinaisons de paramètres sans avoir à les réaliser expérimentalement afin d'évaluer les limites du système. Pour le modèle numérique, c'est la configuration de quatre aimants qui est simulée. La Figure 5.58 représente la géométrie modélisée, il s'agit du tube d'acrylique avec la surface intérieure du tube la plus proche des aimants.

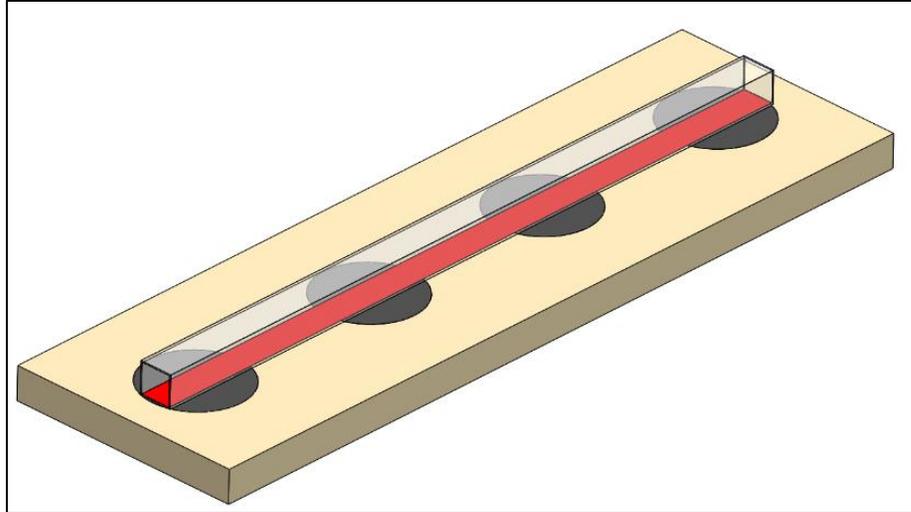


Figure 5.58 - Représentation de la géométrie modélisée ©Yoann Robert

Un écoulement multiphasique dont les trois phases sont: une phase liquide (l'eau) et deux phases solides (la magnétite et la silice) est simulé. Les données d'entrées du modèle sont répertoriées dans le Tableau 5.22. Les forces magnétiques s'exerçant sur les particules magnétiques et non magnétiques sont ajoutées aux termes sources des équations du modèle eulérien (voir équation 4.31).

Tableau 5.22 - Paramètres d'entrée de la simulation numérique

Élément	Phase	Valeurs
Densité des phases (kg/m ³)	Eau	1000
	Magnétite	5200
	Silice	2200
Concentration (g _s /L _T)	Magnétite	2
	Silice	3
Diamètre des particules (µm)	Magnétite, silice	5
Viscosité dynamique du mélange (Pa.s)		0,01
Vitesse d'écoulement axiale (m/s)		1,2

La Figure 5.59 représente les fractions volumiques des phases solides de magnétite (6a) et de silice (6b) aux abords des aimants. La Figure 5.59a montre les effets de la force magnétique sur les particules de magnétite qui sont retenues à chaque emplacement des aimants. Les cercles noirs désignent la position des aimants. On peut remarquer que les valeurs de fraction volumiques de la silice sont plus faibles au niveau des aimants. En effet, l'intensité de la force magnétique qui s'exerce sur les particules de silice est plus faible que l'intensité des forces d'écoulement fluide. Par conséquent, les particules de silice vont suivre la direction de l'écoulement. Cependant, la valeur de la fraction volumique n'est pas nulle à l'emplacement des aimants car quelques particules de silice vont être entraînées par les particules de magnétites se dirigeant vers les aimants.

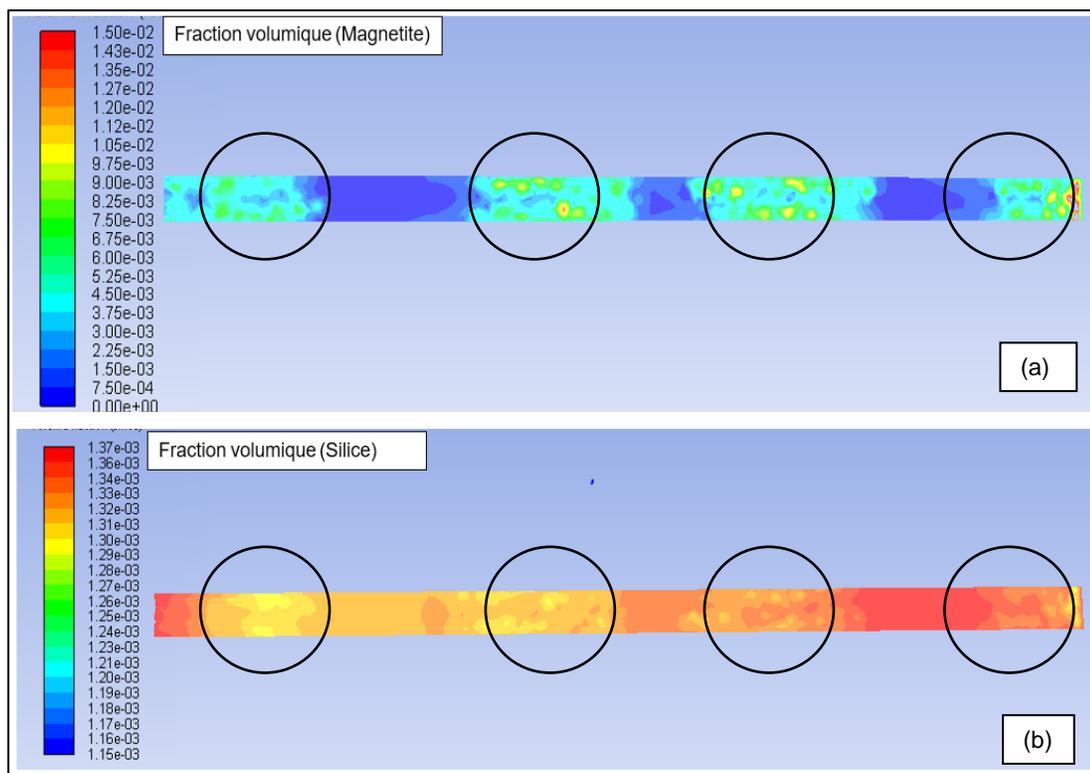


Figure 5.59 - Représentation des fractions volumiques de la magnétite (a) et la silice (b) ©Yoann Robert

La Figure 5.60 représente le champ de déplacement des particules de magnétite. A l'approche des aimants, la direction de déplacement des particules est modifiée par l'action de la force magnétique exercée sur ces dernières. L'apparition de petits phénomènes de turbulence devant chaque aimant peut être également observée. Ces phénomènes de turbulence sont causés par le brusque changement de direction des particules vers les aimants.

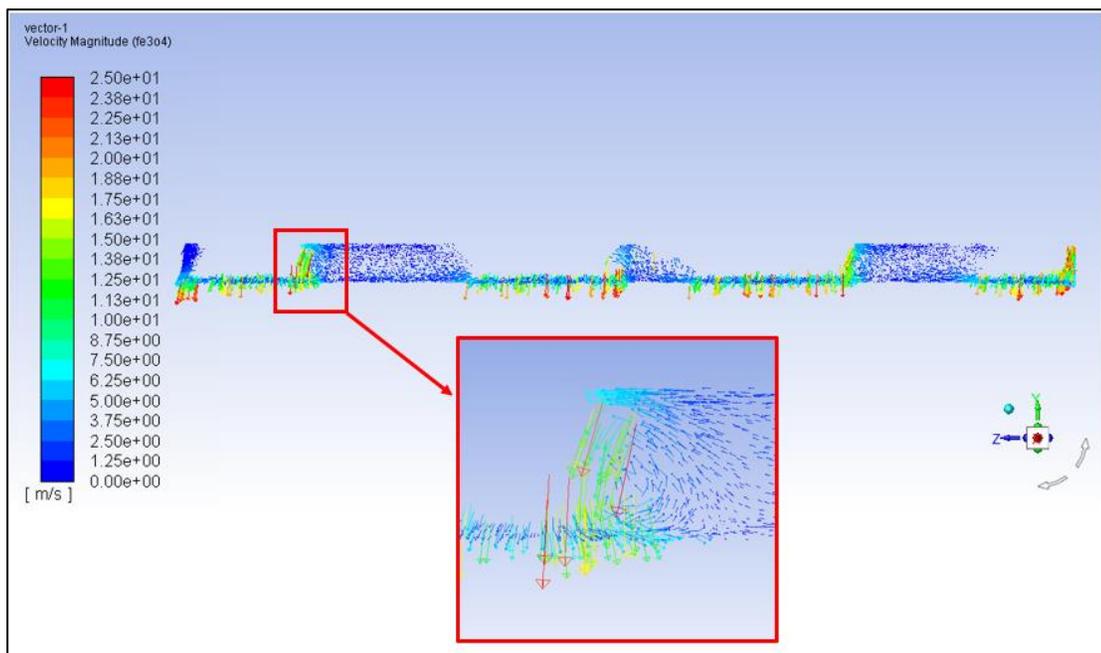


Figure 5.60 - Représentation du champ de déplacement des particules de magnétite
©Yoann Robert

Cette première simulation numérique permet de visualiser l'écoulement multiphasique et le comportement des particules à l'intérieur du tube vis-à-vis de la force magnétique. De plus, le développement de la simulation du montage préliminaire permet de poser les bases de la simulation du montage expérimental suivant et être utilisé pour une étude numérique d'un équipement industriel.

Cette étude préliminaire a permis de déterminer certains paramètres influençant la séparation magnétique des oxydes de fer dans le résidu de bauxite. Il est primordial de préparer le matériel (broyage et pâte mixée dans l'eau) avant de procéder à la séparation magnétique. L'augmentation du débit de circulation d'eau permet d'améliorer la teneur en fer dans la fraction magnétique mais peut diminuer le taux de récupération. Obtenir une teneur en magnétite optimale dans la fraction magnétique tout en conservant un bon taux de récupération demande une recherche approfondie et un travail sur un équipement traitant de plus grosses quantités de particules solides.

5.2. AUGMENTATION DU TAUX DE RÉCUPÉRATION DES OXYDES DE FER

Les résultats expérimentaux des tests effectués dans le but d'augmenter le taux de récupération des oxydes de fer sont présentés dans cette section. Il s'agit d'augmenter ce taux de récupération tout en conservant une teneur en fer optimale. Les deux modes de fonctionnement (boucle fermée et boucle ouverte) sont présentés. Enfin, les résultats de l'étude numérique accompagnant l'étude expérimentale sont présentés.

5.2.1. Résultats expérimentaux

5.2.1.1. Étude en boucle fermée

Présenté à la section 4.4.1.2, le premier mode de fonctionnement du montage expérimental était la boucle fermée, la suspension est injectée dans le système, et le résidu (fraction non-magnétique) est récupéré dans le réservoir d'alimentation et recircule dans le système une nouvelle fois jusqu'à ce que les aimants ne captent plus de particules magnétiques. Pour ces tests, la concentration solide dans le système est 2,5 g/L. Pour ce faire, une suspension de résidu de masse solide de 25 g est mélangée à un volume de 10 L avant d'alimenter le système. Différents types de suspension ont été testés : résidu solide directement mélangé à l'eau ou pâte préalablement préparée. Mais, c'est toujours une masse solide de 25 g qui alimente le système. Le train d'aimants utilisé dans le montage comporte 13 supports où sont montés 9 aimants. L'espace entre chaque support est de 22 mm. Le matériel est broyé et mis en pâte à 375 g/L. Le débit d'alimentation du système est de 8 L/min. Le Tableau 5.23 montre le taux de récupération et la teneur en fer dans la fraction magnétique pour 3 suspensions testées : matériel broyé, matériel broyé et mis en pâte à 200 g/L, et matériel broyé et mis en pâte à 375 g/L. Le débit d'alimentation du système est de 8 L/min.

Tableau 5.23 - Résultats des tests en boucle fermée

Matériel	Taux de récupération (%)	Teneur en fer (% p/p)
Broyé / sans mise en pâte	56	40
Broyé / pâte à 200 g/L	59	45
Broyé / pâte à 375 g/L	53	47

Le nouveau processus de séparation a permis d'obtenir un gain d'au moins 20 % sur le taux de récupération des oxydes de fer. D'un taux de récupération d'une moyenne de 35 % sur le montage préliminaire du tube (présenté à la section 5.1), le taux de récupération est supérieur à 50 % jusqu'à atteindre 59 % pour un matériel broyé et mis en pâte à 200 g/L. Le tube en rotation permet une évacuation efficace des particules magnétiques hors du système. Les aimants ne sont pas saturés lors du processus et continuent à attirer les particules magnétiques avec la même efficacité. De plus, les résultats observés confirment la nécessité de préparer le matériel avant le processus de séparation. Le broyage mené avec la mise en pâte permet d'obtenir un gain d'au moins 5 % pour la teneur en fer. Les teneurs en fer de la fraction magnétique sont sensiblement identiques pour les deux pâtes (200 et 375 g/L), la différence de 6 % des taux de récupération pourrait être expliquée par la différence de viscosité entre les deux pâtes. Les particules ne s'agglomèrent pas entre elles, les particules non-magnétiques mais contenant du fer ne sont pas en interactions avec les particules magnétiques, elles ne sont pas récupérées sur les aimants. Ce qui diminue le taux de récupération du fer.

5.2.1.2. Étude en boucle ouverte

Le deuxième mode de fonctionnement utilisé sur le montage ressemble plus à un mode opératoire en usine. La suspension, contenue dans un réservoir d'alimentation, est injectée dans le système via une pompe centrifuge. Les particules magnétiques sont captées par le tube et récupérées. Le contenu non-retenu par les aimants est récupéré dans un réservoir externe. Une fois l'alimentation terminée, la fraction magnétique est récupérée pour les analyses. La fraction non-magnétique de la première séparation est réinjectée dans le système pour une seconde séparation. Ce processus est répété quatre fois et constitue un cycle de séparation. Cela représente le passage de la suspension dans plusieurs séparateurs disposés en série comme dans un environnement industriel. Les effets de la variation du débit, de la concentration solide et des cycles de séparation sont évalués.

5.2.1.2.1. Variation du débit d'alimentation

Les effets de la variation du débit d'alimentation dans le système sur le taux de récupération et la teneur en fer dans la fraction magnétique ont été évalués. Trois débits d'alimentation ont été comparés : 8, 10 et 12 L/min; ils correspondent au débit maximal à chaque angle d'inclinaison du tube de 6, 9 et 12 degrés, respectivement. Pour les différents tests, c'est un matériel broyé et mis en pâte à 400 g/L qui est utilisé. Le Tableau 5.24 présente le taux de récupération mesuré et la teneur en fer de la fraction magnétique pour une concentration solide de 2,5 g/L suivant les 3 débits d'alimentation.

Tableau 5.24 - Taux de récupération en fonction des débits d'alimentation à une concentration solide de 2,5 g/L

Débit d'alimentation (L/min)	8	10	12
Taux de récupération (%)	42	43	40
Teneur en fer (% p/p)	48	53	54

Le taux de récupération est plus faible que lors des tests en boucle fermée avec une différence de 11 %. L'augmentation du débit influence peu le taux de récupération, qui demeure relativement stable en fonction de la variation de débit, avec une faible baisse de 3%. En revanche, la teneur en fer de la fraction magnétique a augmenté avec le débit d'alimentation pour atteindre 54 % p/p à 12 L/min. L'augmentation du débit d'alimentation conserve donc le taux de récupération mais augmente la teneur en fer de la fraction magnétique. La force de traînée hydrodynamique s'exerçant sur les particules non-magnétiques est suffisamment grande pour les séparer des particules magnétiques. À contrario, la force magnétique s'exerçant sur les particules magnétiques est suffisamment grande pour contrer la force de traînée hydrodynamique et attirer les particules magnétiques sur les aimants. Cependant, une concentration solide de 2,5 g/L dans le système est beaucoup trop faible et demanderait à l'échelle industrielle un volume colossal d'eau pour traiter le résidu de bauxite. Il est impératif d'augmenter la concentration solide dans le système et d'en évaluer l'impact sur l'efficacité de la séparation magnétique.

5.2.1.2.2. *Variation de la concentration solide*

Les effets de la variation de la concentration solide dans le système sur l'efficacité de la séparation ont été évalués. La suspension est toujours préparée en pâte à 400 g/L est diluée dans l'eau à des concentrations de 2,5 g/L, 20 g/L, 50 g/L et 200 g/L. Cependant, des problèmes de débordement sont survenus lors des expérimentations à 200 g/L. En conséquence, les résultats pour une concentrations de 200 g/L ne sont pas présentés dans cette section, mais les solutions envisagées seront présentées à la section 5.2.1.2.4. La Figure 5.61 montre le taux de récupération en fonction des concentrations solides dans le système à différents débits d'alimentation. Globalement, le taux de récupération augmente avec la concentration solide. Par exemple, pour un débit de 8 L/min (barre bleue), il y a un gain de 20 % entre les concentrations solides 2,5 et 50 g/L. Globalement, le taux de récupération des oxydes de fer augmente avec la concentration solide. L'hypothèse de « magnétisation successive » peut être utilisée ici pour expliquer l'augmentation du taux de récupération avec la concentration solide. Lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique, une particule de magnétite est magnétisée et peut devenir elle-même un aimant (Cribb, 1998; Wasilewski et al., 1999). Augmenter la concentration solide de la suspension augmente le nombre de particules dans celle-ci et elles deviennent plus proches les unes des autres. Ainsi, les particules de la seconde couche de particule, proches des premières particules magnétisées, deviennent aussi des aimants, et ainsi de suite, avec une intensité qui faiblit à mesure que l'on s'éloigne des aimants. L'action conjointe de ces particules magnétiques conduit à un effet d'attraction collectif. En conséquence, à plus haute concentration, plus de

particules magnétiques sont récupérées. Cependant, pour une même concentration, l'augmentation du débit réduit le taux de récupération, la vitesse de circulation étant plus importante, la force de trainée hydrodynamique l'emporte sur la force magnétique.

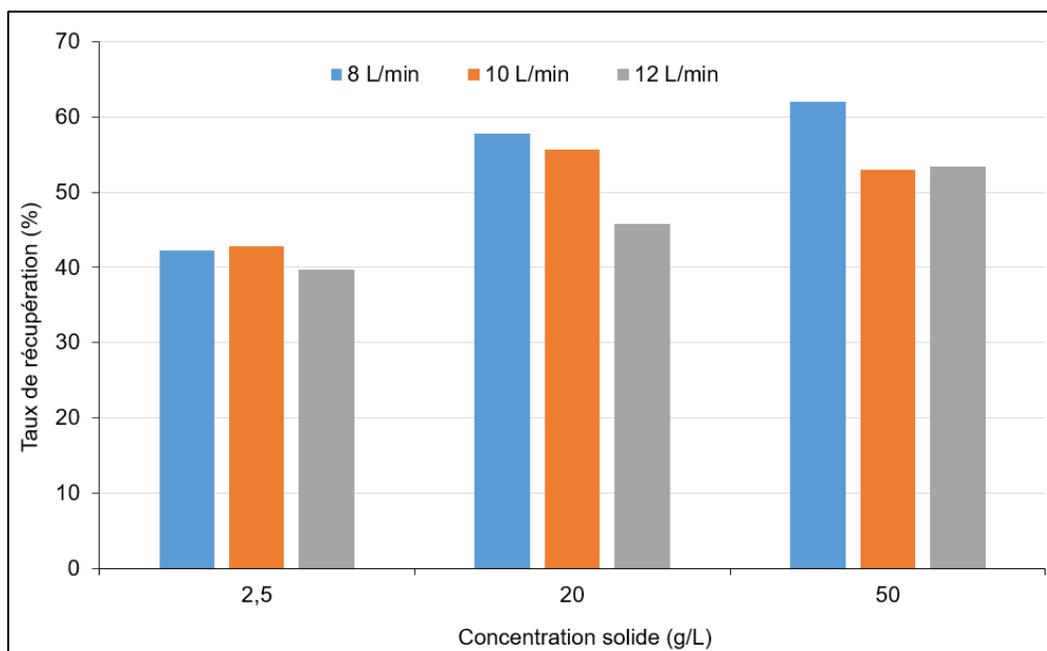


Figure 5.61 - Taux de récupération en fonction des concentrations solides à différents débits ©Yoann Robert

De même, la Figure 5.62 présente la teneur en fer dans la fraction magnétique en fonction des concentrations solides à différents débits d'alimentation. L'augmentation de la concentration solide diminue la teneur en fer dans la fraction magnétique. À une concentration solide de 2,5 g/L, la teneur en fer est aux environs des ± 50 % p/p, puis elle diminue entre 35 et 45 % p/p pour une concentration de 50 g/L.

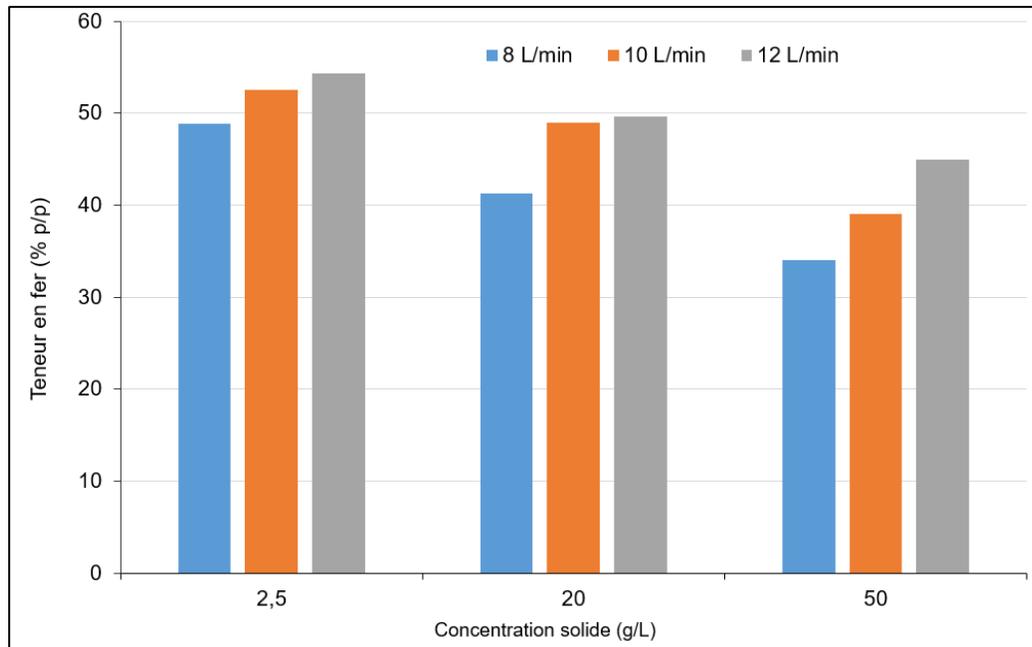


Figure 5.62 - Teneur en fer en fonction des concentrations solides à différents débits ©Yoann Robert

Ici, l'hypothèse de « magnétisation successive » s'applique encore. L'augmentation du nombre de particules renforce ce phénomène d'attraction collective. Toutes les particules possédant une partie magnétique sont attirées. On retrouve dans la fraction magnétique des particules magnétiques avec des inclusions non-magnétiques et des particules non-magnétiques avec des inclusions magnétiques, donc avec des impuretés; ce qui diminue la teneur en fer de la fraction magnétique. Pour une même concentration, l'augmentation du débit permet une augmentation de la teneur en fer, car la force de trainée hydrodynamique permet de décoller les particules les moins magnétiques des aimants.

5.2.1.2.3. Effet des cycles de séparation

Les effets du nombre de cycles de séparation ont aussi été évalués sur ce montage. Il s'agit de maintenir un taux de récupération optimal tout en purifiant la fraction magnétique. Le Tableau 5.25 présente les résultats des expérimentations effectuées. Le taux de récupération de chaque cycle de séparation ainsi que le taux de récupération réel sont calculés. Le taux de récupération réel correspond au ratio de la masse de fer séparée et de la masse de fer initiale. Lors des tests, le matériel a été mis en pâte à une concentration de 400 g/L, puis a été dilué dans l'eau à une concentration solide de 50 g/L. Cela représente 1 kg de particules solides dans un volume d'eau de 20 L. Le matériel a été soumis à 3 cycles de séparation, où à chaque cycle la fraction magnétique est récupérée puis soumise à une nouvelle séparation. Au début des expérimentations, la suspension contient environ 293 g de fer à séparer; la première séparation en sépare 183 g soit 63 % du fer initial à une teneur de 34 % p/p. Après la troisième séparation, la fraction magnétique contient 103 g de fer à une teneur de 52 % p/p, mais c'est seulement 35 % des 293 g initiaux qui sont récupérés. Augmenter le nombre de séparation sur la fraction magnétique permet de la purifier, mais il subsiste des pertes de matériel entre chaque cycle de séparation.

Tableau 5.25 - Résultats des tests sur le nombre de séparation

Cycle de séparation	Masse de fer séparé (g)	Taux de récupération lors de chaque séparation (%)	Taux de récupération réel (%)	Teneur en fer (% p/p)
1 ^{er} cycle	183	63	63	34
2 nd e cycle	128	70	44	46
3 ^{ème} cycle	103	81	35	52

5.2.1.2.4. Configuration des aimants

Tel que mentionné précédemment (section 5.2.1.2.2), la séparation à une concentration solide de 200 g/L n'a pas pu être évaluée dû à des phénomènes de débordement de système (présentés à la section 4.4.2.). Afin de pallier à ce problème, le train d'aimants a subi un changement de configuration dans le but de moduler l'intensité du champ magnétique et d'éviter un engorgement de particules en amont des premiers aimants. Ces configurations sont les suivantes :

- *1^{ère} configuration* : 13 supports de 9 aimants espacés de 22 mm (configuration initiale)
- *2^{ème} configuration* : 14 supports de 6 à 9 aimants espacés de 22mm (Figure 4.45)
- *3^{ème} configuration* : 14 supports de 6 à 9 aimants dont 5 supports collés les uns aux autres et 9 supports espacés de 22 mm (Figure 4.45)

Les configurations ont été testées avec une suspension diluée à une concentration solide de 50 g/L. La suspension a subi un seul cycle de séparation. Le Tableau 5.26 compare les trois configurations d'aimants.

Tableau 5.26 - Comparaison des résultats de séparation entre les trois configurations d'aimants

Configuration des aimants	Taux de récupération (%)	Teneur en fer (% p/p)
1^{ère} configuration	63	34
2^{ème} configuration	46	42
3^{ème} configuration	55	40

On observe que le changement de configuration des aimants permet de « rééquilibrer » le taux de récupération du fer et la teneur en fer dans la fraction magnétique. Même si le taux de récupération diminue entre la 1^{ère} configuration et la 3^{ème} configuration de 8 %, on observe une augmentation de 6 % p/p dans la teneur en fer. Le changement de configuration permet de moduler l'intensité du champ magnétique de manière à ce que les particules les plus magnétiques et de plus grandes tailles soient récupérées en premier lieu (n'importe quel champ magnétique peut les attirer). Les particules moins magnétiques vont être récupérées sur la partie du tube où l'intensité du champ magnétique (et de la force magnétique) est plus importante sans être perturbées par la présence des plus grosses particules. Grâce à cette nouvelle configuration, il s'effectue déjà une différenciation des particules, permettant d'augmenter la teneur en fer dans la fraction magnétique. Cependant, il

subsiste toujours des pertes de matériel diminuant le taux de récupération final. En effet, les particules moins magnétiques ou du moins comportant des inclusions (magnétiques ou non-magnétiques) peuvent continuer de suivre l'écoulement jusqu'à la sortie sans être retenues sur le tube.

5.2.2. Simulation numérique

Pour la simulation numérique de ce montage à tube rotatif, le modèle est basé sur la simulation du précédent montage comportant le même modèle mathématique et un changement de géométrie.

Le calcul du champ magnétique délivré par le système a été calculé séparément de l'écoulement multiphasique. Les forces magnétiques engendrées et s'exerçant sur les différentes phases ont été présentées à la section 4.4.1.3.2.

L'écoulement multiphasique est calculé séparément. Tout d'abord, les vitesses d'écoulement de l'eau sont calculées. Afin de comparer le modèle numérique avec le montage expérimental, les vitesses doivent être semblables. Expérimentalement, la vitesse d'écoulement a été mesurée à différentes sections du dalot dans le sens de l'écoulement. Les mesures sont présentées dans le Tableau 5.27, pour un angle d'inclinaison de 9 degrés et un débit d'alimentation de 4 L/min. Ainsi, l'arc 1 et l'arc 5 correspondent respectivement aux prises de mesure à l'entrée du dalot (position 0 mm) et à la sortie du dalot (position 825 mm).

Tableau 5.27 - Comparaison des vitesses d'écoulement mesurées expérimentalement et simulées

Prise de mesure	Arc 1	Arc 2	Arc 3	Arc 4	Arc 5
Position (mm)	0	206	410	618	825
Vitesse d'écoulement expérimentale (m/s)	0,223	0,258	0,233	0,258	0,258
Vitesse d'écoulement simulée (m/s)	0,268	0,249	0,231	0,249	0,249

Les vitesses d'écoulement dans le dalot sont semblables entre le montage expérimental et sa simulation numérique, permettant ainsi de valider la simulation de l'écoulement de l'eau dans le dalot.

Par la suite, c'est l'écoulement multiphasique qui est modélisé, où les trois phases sont simulées (eau, magnétite et silice), à différentes concentrations solides. Cependant, les simulations ont montré un phénomène de débordement. La Figure 5.63 montre la phase liquide (eau) de l'écoulement multiphasique dans le dalot. La simulation représente un écoulement à un débit de 8 L/min et un angle d'inclinaison de 6° avec une concentration solide de 200 g/L. Dans ces conditions, on observe le phénomène de débordement où la suspension remplit tout le dalot. À la suite de l'observation de ce débordement sur la simulation et lors des expérimentations sur le montage, la simulation numérique du montage n'a pas été poursuivie.

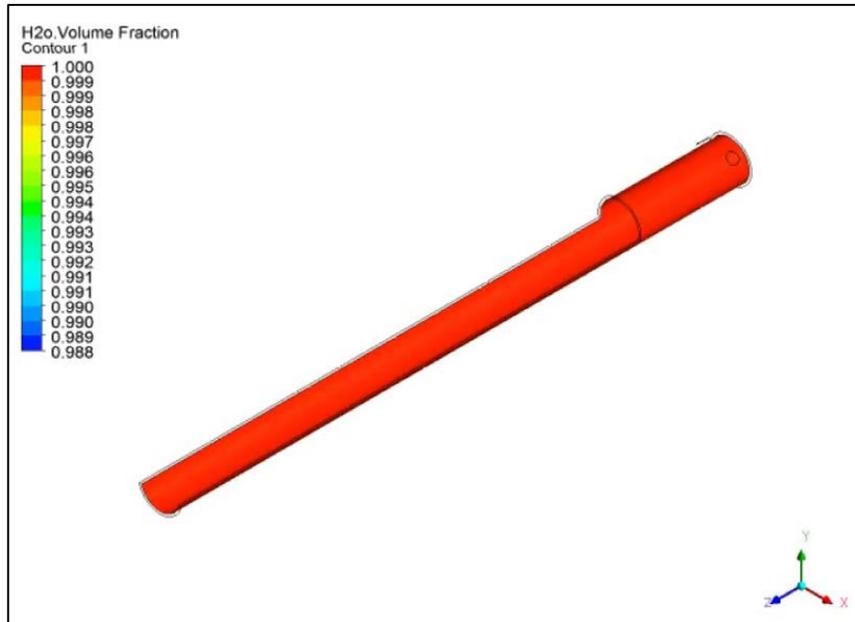


Figure 5.63 - Représentation de l'écoulement dans le dalot simulé sur ANSYS Fluent ©Yoann Robert