

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

Dans l'étude des paramètres qui influencent la séparation des composés de fer dans le résidu de bauxite calciné, la méthodologie se divise en deux volets : volet expérimental et volet numérique. Le volet expérimental se décline en plusieurs parties, il s'agit d'abord de comprendre la répartition du champ magnétique dans l'espace, puis de caractériser le résidu de bauxite calciné. Ensuite, à l'aide de différents montages expérimentaux, il s'agit de déterminer les méthodes permettant d'augmenter le taux de récupération des oxydes de fer lors du processus de séparation et la teneur en fer dans la fraction magnétique (matériel issu de la séparation magnétique). À chaque étape, une simulation numérique est développée simultanément afin de discriminer certaines valeurs de paramètres expérimentaux.

4.1. COMPRÉHENSION DU PROCÉDÉ DE SÉPARATION MAGNÉTIQUE

Avant de débiter le processus de séparation des oxydes de fer contenus dans le résidu de bauxite, il faut d'abord caractériser comment le champ magnétique fonctionne dans l'espace de travail, la répartition des lignes de champ ou encore l'intensité du champ dans l'espace. Une fois que le champ magnétique est caractérisé, il s'agit d'évaluer le comportement des particules solides lorsqu'elles rencontrent un aimant

4.1.1. Caractérisation du champ magnétique dans l'espace

Pour la caractérisation du champ magnétique dans l'espace, l'équipement utilisé est un électroaimant dipôle, il est illustré par la Figure 4.21. L'électroaimant est constitué de deux bobines de cuivre branchées en série à une source de courant. Un entrefer cylindrique et d'un diamètre de 15 cm en acier est disposé au centre de chacune des bobines. La distance entre les deux entrefers peut être ajustée au moyen de deux vis disposées de chaque côté de l'électroaimant. Alimenté par une source de courant distribuant un courant électrique entre 0 et 60 A, l'électroaimant produit un champ magnétique dans l'espace situé entre les deux bobines.

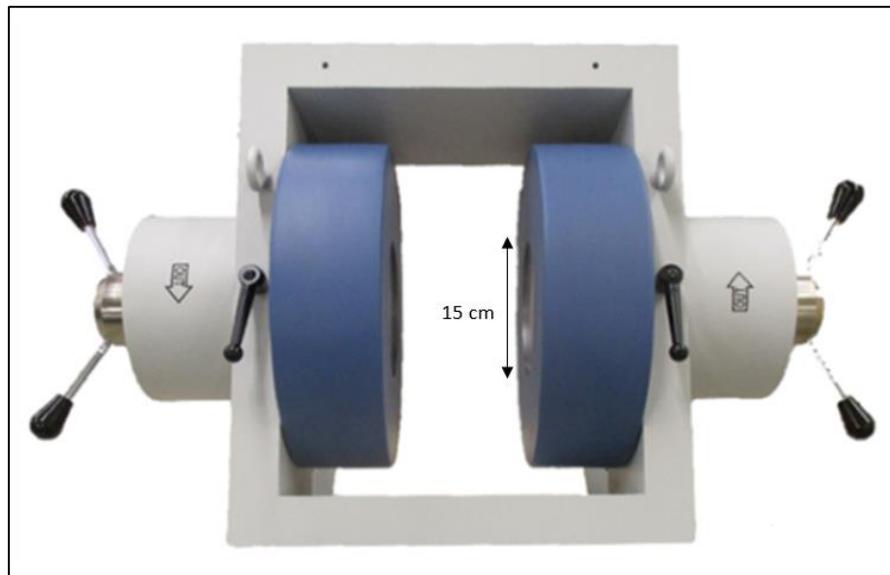


Figure 4.21 - Électroaimant dipôle (Technicoil, 2020)

L'intensité du champ magnétique a été mesurée à l'aide d'un gaussmètre depuis le centre de l'entrefer jusqu'à une distance de 700 mm. La Figure 4.22 illustre la variation verticale du champ magnétique produit par l'électroaimant depuis le centre de l'entrefer jusqu'au bord de l'entrefer. L'intensité électrique du courant délivré par la source de courant varie entre 0 et 55 A. L'intensité du champ magnétique atteint un maximum de 16540 G à une distance de 72,5 mm, c'est-à-dire à l'arête de l'entrefer, pour ensuite diminuer drastiquement jusqu'à s'annuler à une distance de 500 mm du centre de l'entrefer.

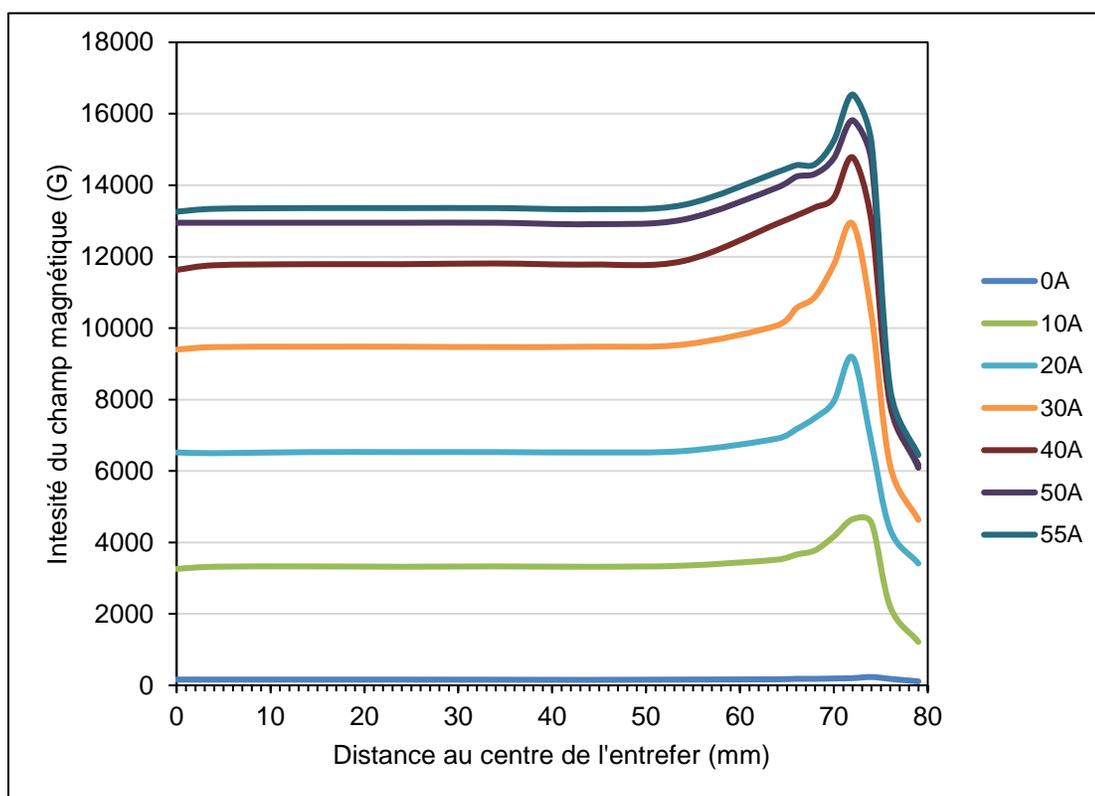


Figure 4.22 - Variation verticale du champ magnétique (10 000 G = 1 T) ©Yoann Robert

L'intensité du champ magnétique est maximale à cet endroit car les lignes de champ sont les plus proches les unes des autres, comme illustré à la Figure 4.23. Ainsi, pour une même particule, la force magnétique de séparation sera plus grande aux arêtes de l'aimant.

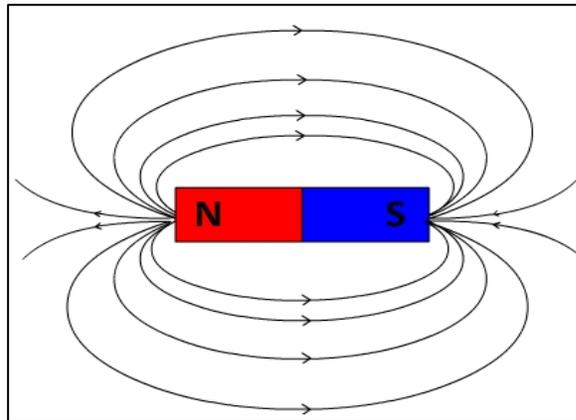


Figure 4.23 - Lignes de champ magnétique d'un aimant droit

4.1.2. Comportement du matériel face au champ magnétique

Lorsqu'il est exposé à un champ magnétique, le résidu de bauxite calciné est totalement attiré vers l'aimant. Il n'y a pas de différenciation des particules. En condition sèche ou humide (mise en suspension dans l'eau), les particules de résidus de bauxite ont un comportement similaire au ferrofluide à proximité d'un champ magnétique, et s'hérissent en pointes dans le champ magnétique d'un aimant placé sous la coupelle. La Figure 4.24 illustre le comportement des particules de résidu de bauxite exposées à un aimant. La caractérisation du matériel pourra apporter des informations supplémentaires quant à ce comportement face au champ magnétique.

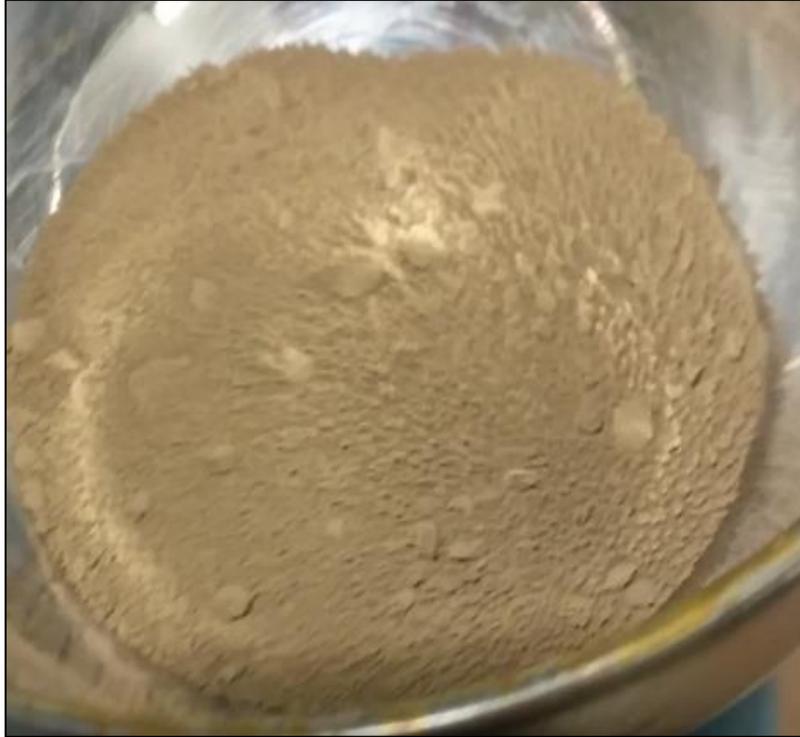


Figure 4.24 - Comportement du résidu de bauxite calciné à proximité d'un aimant ©Yoann Robert

4.2. CARACTÉRISATION DU MATÉRIEL

Après avoir observé le comportement singulier du matériel face à un champ magnétique, une caractérisation du matériel doit être effectuée afin de comprendre les causes de ce comportement singulier. Cette caractérisation se définit par une analyse de la composition chimique, une étude granulométrique puis par des observations macroscopique et microscopique.

4.2.1. Composition chimique

L'analyse de la composition chimique du matériel a été effectuée par spectrométrie de fluorescences des rayons X (XRF). Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de sa composition chimique. On peut ainsi connaître la fraction massique de chaque élément composant l'échantillon analysé. Le matériel étant du résidu de bauxite calciné, les éléments chimiques principaux le constituant sont dans les mêmes proportions que dans le résidu de bauxite usuel (« boue rouge »). Le Tableau 4.11 présente la composition chimique du résidu de bauxite calciné utilisé lors du présent projet.

Tableau 4.11 - Composition chimique du résidu de bauxite calciné

Élément chimique	Formule chimique	Quantité (%p/p)
Fer	Fe	29,6
Titane	Ti	3,5
Aluminium	Al	10,1
Calcium	Ca	2,4
Silicium	Si	4,7

Le matériel a subi une calcination en atmosphère réductrice, afin de convertir l'hématite et la goethite (oxydes de fer non magnétique) en magnétite (oxyde de fer fortement magnétique). Le processus de calcination et de conversion du matériel est effectué par un organisme partenaire selon les travaux résumés dans *Extraction of iron from red mud: low temperature reduction to magnetite and magnetic separation* (Gostu et al., 2018). Des rapports d'analyses complémentaires ont montré que les composés de fer dans le résidu de bauxite calciné étaient présents sous forme de magnétite et de goethite dont les proportions étaient estimées entre 55 et 60% en magnétite et entre 40 et 45% en goethite (COREM, 2017a, 2017b).

4.2.2. Granulométrie

Les analyses granulométriques sont effectuées au moyen d'un granulomètre laser de type Analysette. Les particules sont mises en suspensions, généralement dans l'eau, puis un laser, focalisé à la précision du micron, traverse la suspension dans la zone sensible. Lorsque le faisceau laser éclaire une particule, le rayon est diffracté. L'intensité du rayonnement diffracté et le rayon de diffraction permettent de déterminer la taille de la particule (Michel et al., 2006). La Figure 4.25 présente la courbe de la distribution granulométrique du résidu de bauxite calciné. D'après la courbe, la distribution granulométrique du matériel est très variable, entre 0 et 200 μm , avec une taille moyenne des particules entre 3 et 8 μm avec 90 % des particules d'une taille inférieure à 63 μm .

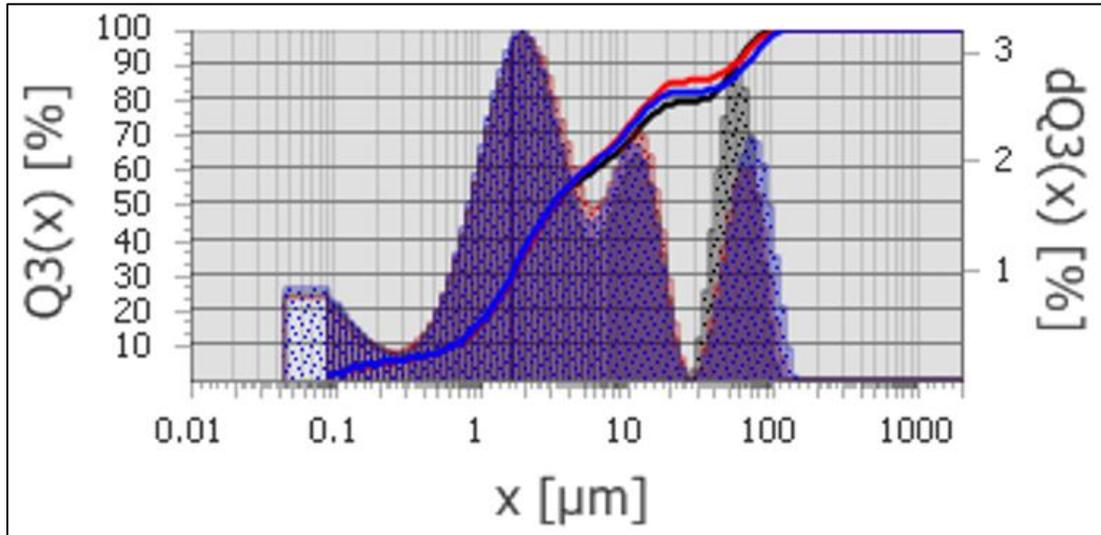


Figure 4.25 - Distribution granulométrique du résidu de bauxite calciné ©Yoann Robert

4.2.3. Observations microscopiques

La dernière étape de caractérisation réside dans l'observation microscopique du matériel. Le matériel a été observé à la loupe binoculaire, puis par microscopie par caméra et microscopie électronique à balayage (MEB). La microscopie électronique à balayage est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon à analyser qui va ensuite rediffuser ces électrons. La rétrodiffusion de ces électrons émet plusieurs signaux énergétiques. Différents détecteurs permettent d'analyser ces signaux et de reconstruire une image de la surface (Faerber, 2004).

Les observations microscopiques montrent que les plus grosses particules du résidu de bauxite sont en réalité des agrégats de particules plus fines. La Figure 4.26 est une observation au microscope optique du matériel où l'on peut remarquer

les agrégats de fines particules. Ces agrégats sont confirmés par les observations effectuées à l'aide du MEB présentées à la Figure 4.27.

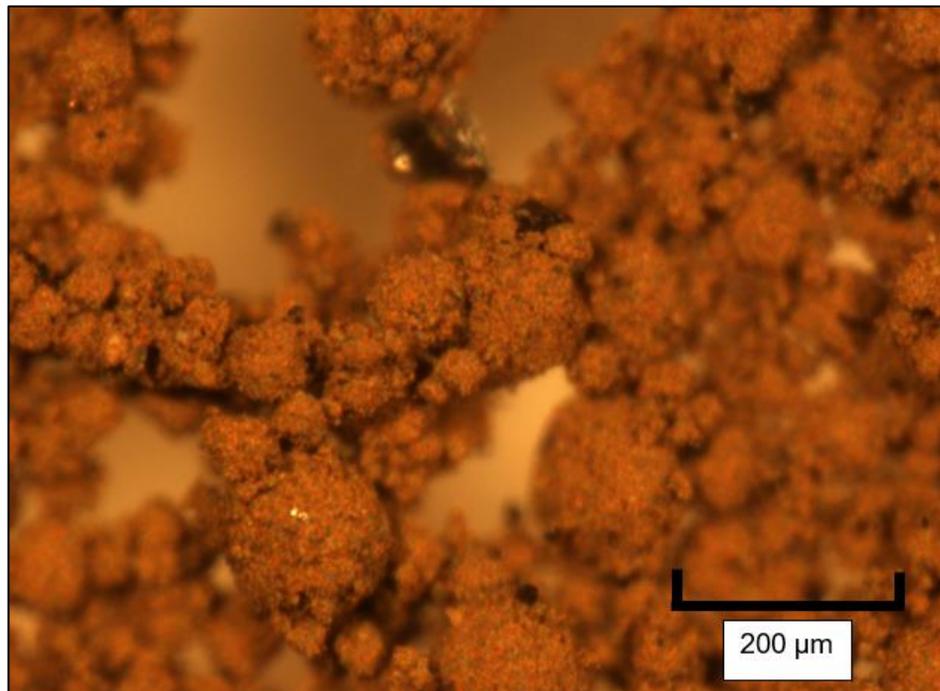


Figure 4.26 - Observation microscopique par microscope optique (x20)
©Yoann Robert

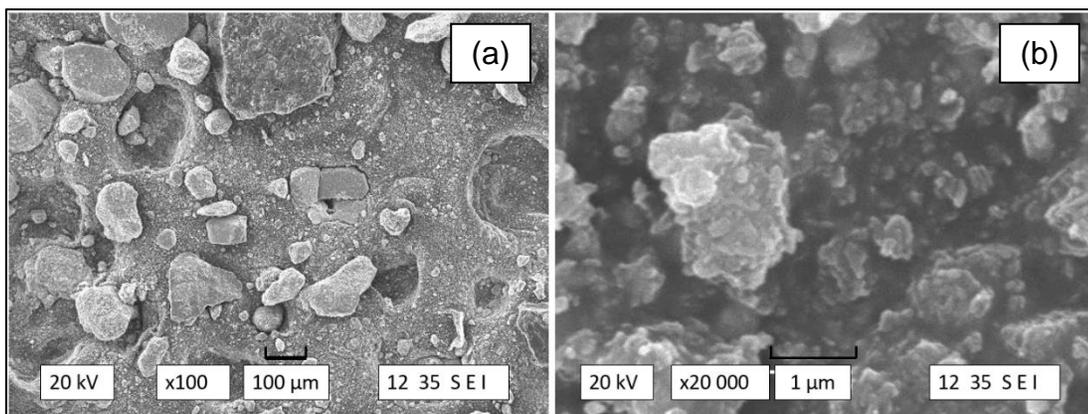


Figure 4.27 - Observation par microscopie électronique à balayage x100 (a) et x20 000 (b) ©Yoann Robert

La présence des agrégats permet en partie d'expliquer le comportement du matériel face au champ magnétique et l'attraction de la totalité des particules vers l'aimant. Des particules non-magnétiques sont collées à des particules magnétiques et sont entraînées dans le mouvement de ces dernières en direction de l'aimant.

Cependant, le MEB a permis d'apporter des informations supplémentaires quant au comportement du matériel face au champ magnétique et à l'absence de différenciation observée. En effet, la microscopie électronique à balayage montre la présence d'inclusions dans les phases minérales : des phases d'éléments magnétiques sont entourées de phases non-magnétiques et vice-versa. Ainsi, lorsqu'un champ magnétique est appliqué dans la zone sensible, les phases minérales magnétiques sont attirées vers lui. Il suffit qu'une particule comporte une inclusion d'une phase magnétique pour être attirée vers l'aimant. La présence d'inclusion de phase magnétique s'explique par le procédé de calcination. Afin de transformer l'hématite et la goethite en magnétite, le résidu de bauxite est réduit avec un mélange gazeux composé de monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂) et de diazote (N₂) à haute température (Gostu et al., 2018). Durant ce processus, des phénomènes de fusion entre les phases minérales peuvent apparaître et provoquer l'apparition d'inclusions au sein de celles-ci. La Figure 4.28 montre la magnétite mélangée avec des hydroxydes de fer non convertis et de l'aluminium dans une même particule.

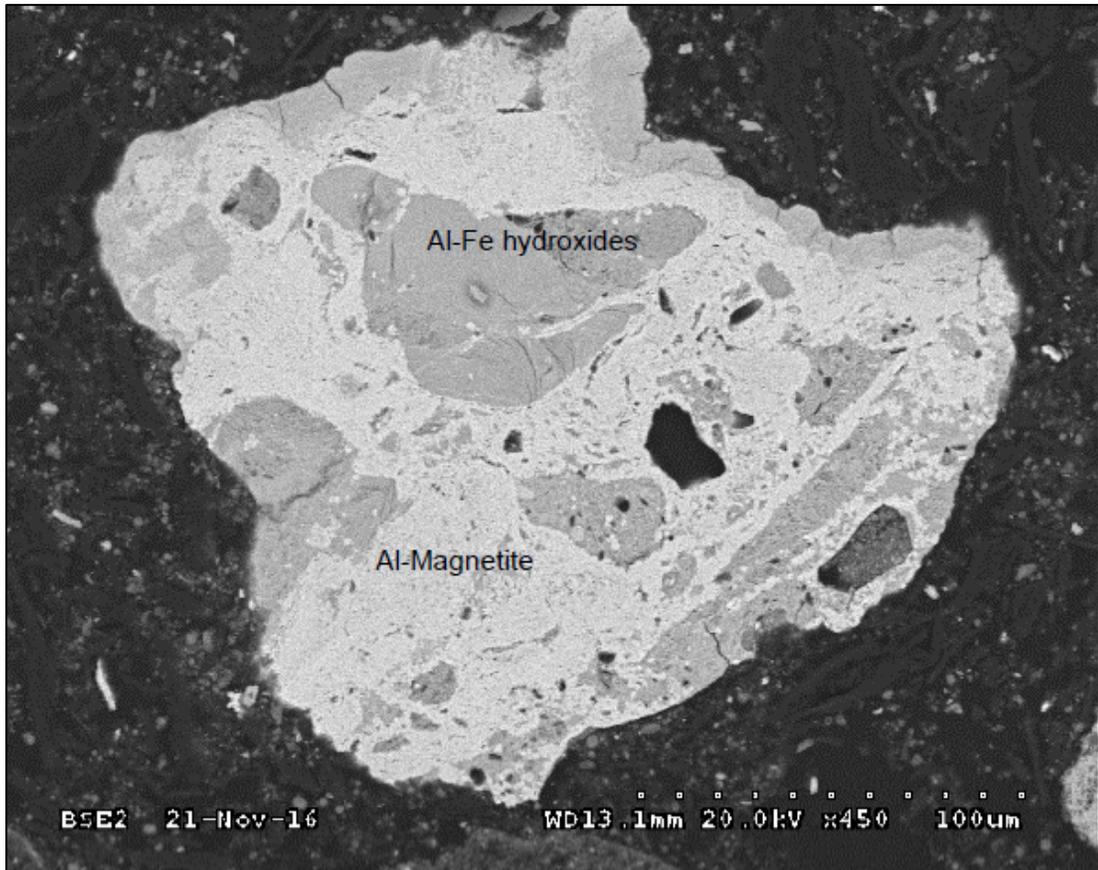


Figure 4.28 - Observation au MEB de magnétite mélangée avec des hydroxydes de fer et de l'aluminium (COREM, 2017a)

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

La caractérisation du matériel a montré la présence d'agrégats de particules et d'inclusions dans les phases minérales des particules. La partie suivante décrit le protocole expérimental engagé afin d'augmenter la teneur en fer magnétique dans la fraction magnétique. Il s'agit d'abord de limiter l'impact des agrégats et des inclusions en préparant le matériel avant de procéder à la séparation magnétique. Un premier montage expérimental a été conçu pour maximiser la pureté en magnétite de la fraction magnétique.

4.3.1. Préparation du matériel

Le matériel a d'abord été broyé afin d'uniformiser la distribution granulométrique, puis mis en suspension dans l'eau sous forme de pâte pour limiter l'agrégation des fines particules entre elles.

4.3.1.1. Broyage

Le matériel a été broyé à l'aide d'un broyeur à barre afin de briser les agrégats de particules et d'uniformiser la distribution granulométrique. D'une taille moyenne initiale comprise entre 3 et 8 μm , la taille moyenne des particules du matériel broyé est de 1,5 μm avec 87 % des particules plus petites que 4 μm . La Figure 4.30 présente la distribution granulométrique du matériel après le broyage. Le principal effet du broyage a été de défaire les agrégats et de resserrer la distribution

granulométrique. La Figure 4.29 présente des observations au MEB du matériel non-broyé (a) et broyé (b) où l'on peut remarquer l'uniformisation de la taille des particules.

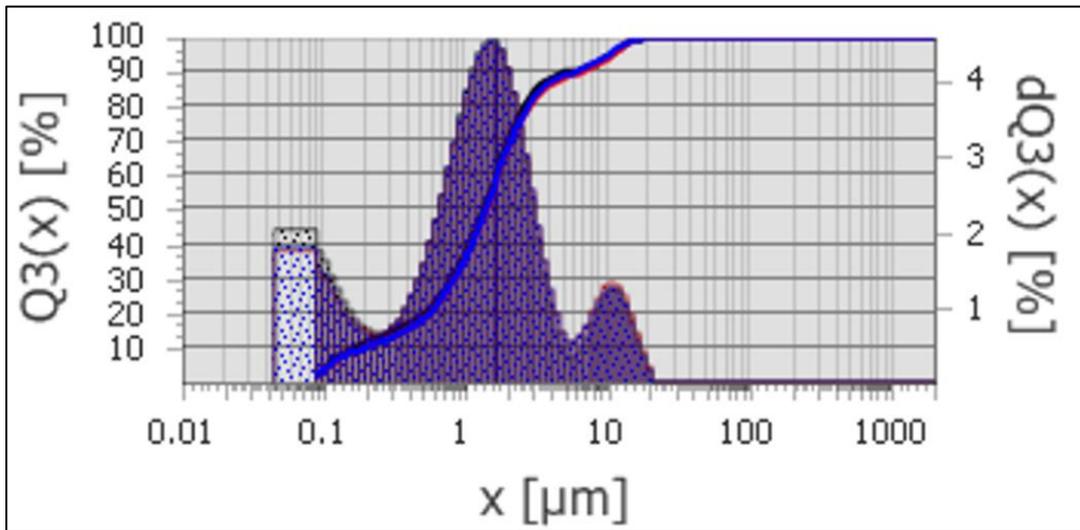


Figure 4.30 - Distribution granulométrique du résidu de bauxite calcinée après broyage
©Yoann Robert

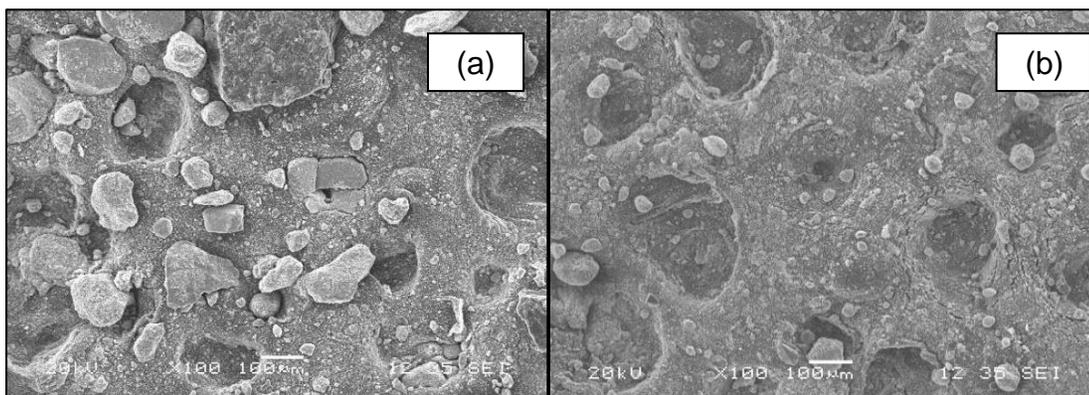


Figure 4.29 - Comparaison du matériel non-broyé (a) et broyé (b) observé au MEB
©Yoann Robert

4.3.1.2. Mise en pâte

Le matériel broyé est ensuite mis en suspension avec de l'eau afin de former une pâte. La mise en suspension se fait dans un mélangeur de cuisine à très grande vitesse. Le déplacement très rapide des particules qui en résulte permet de limiter les effets d'agrégation. De plus, grâce au mouvement de rotation, l'eau s'échauffe à une température supérieure à 50°C, et devient moins visqueuse (Engineering_Toolbox, 2004). Ainsi, elle peut pénétrer profondément entre les particules afin de briser les plus petits agrégats encore restants. La Figure 4.31 présente le matériel mis en pâte après agitation dans le mélangeur. La concentration solide de la pâte se situe entre 200 et 500 g/L. Une fois la mise en pâte effectuée, le mélange est injecté dans le système afin de procéder à la séparation magnétique.



Figure 4.31 - Matériel mis en pâte ©Yoann Robert

4.3.2. Montage expérimental préliminaire

Un premier montage expérimental a été conçu afin d'augmenter la teneur en fer magnétique dans la fraction magnétique. Accompagnant la phase expérimentale, un volet numérique a été développé simultanément. Il propose un couplage de deux simulations numériques pour représenter le phénomène de séparation.

4.3.2.1. Description

Ce montage expérimental est constitué d'une pompe, de tube flexible, d'un tube de section carrée en acrylique (Plexiglas®), et d'un système d'aimants permanents. La Figure 4.32 présente le montage expérimental. Les aimants permanents sont composés d'un alliage de néodyme, de fer et de bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Ils sont les plus puissants disponibles sur le marché. Ces aimants sont de forme circulaire d'un diamètre de 7,26 cm et d'une épaisseur de 1,52 cm. Chaque aimant produit un champ magnétique dont la direction de magnétisation est axiale et d'une intensité est de 0,5 Tesla. Deux configurations d'aimants ont été utilisées :

- Deux aimants permanents disposés de part et d'autre d'un tube d'acrylique de section carrée.
- Quatre aimants permanents disposés en série dans un sarcophage en bois et disposés le long du plexiglas de section carrée.

Dans un premier temps, la première configuration sera utilisée lors de l'évaluation des effets de la préparation du matériel sur le processus de séparation. Par la suite, la seconde configuration sera privilégiée et utilisée pour les expérimentations qui mèneront aux résultats présentés dans le chapitre suivant. Le sarcophage en bois est une plaque de dimensions 61 x 18 x 4 cm dans laquelle 4 trous équidistants de diamètre 7,6 cm et d'une profondeur de 2,5 cm ont été percés le long de son axe. Un tube d'acrylique de section carrée (2,5 x 2,5 cm) et d'une longueur de 60 cm est posé sur le système d'aimants le long de l'axe du sarcophage de bois. C'est dans ce tube de section carrée que circulera la suspension contenant le matériel à séparer magnétiquement.

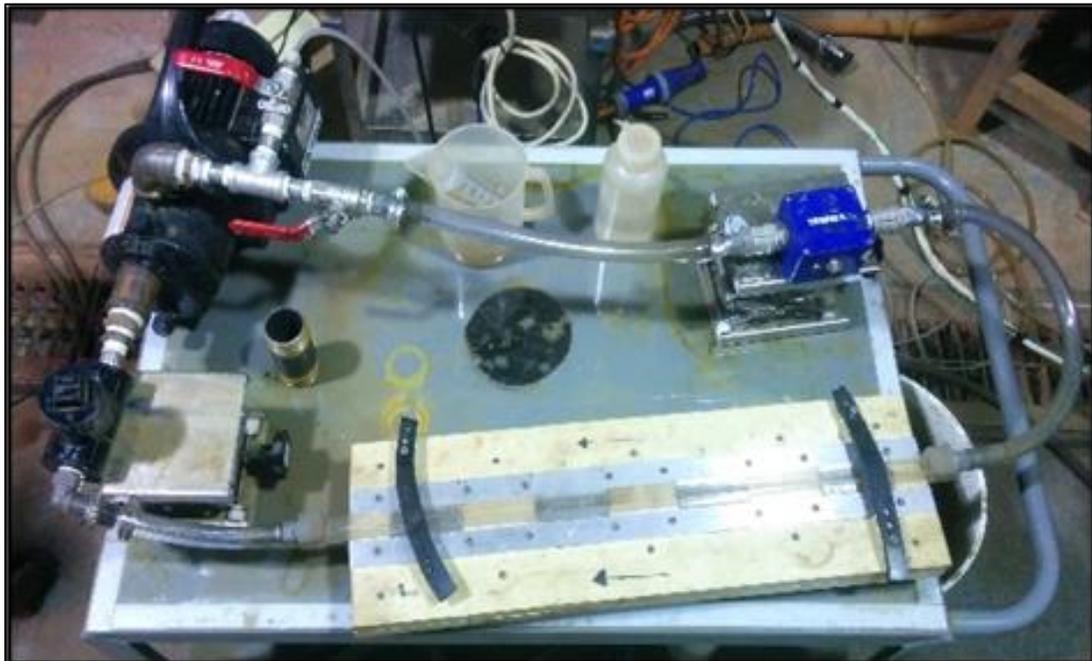


Figure 4.32 - Montage expérimental ©Yoann Robert

Le montage peut contenir un volume de liquide maximum de deux litres; il est alimenté par un circuit d'eau externe. L'eau circule dans le système grâce à une pompe centrifuge fournissant un débit volumique maximum de 23 L/min. Un débitmètre est connecté au circuit afin de contrôler en temps réel le débit de circulation de la suspension.

4.3.2.2. Protocole

Les essais sur ce montage ont pour but de maximiser la teneur en fer magnétique dans la fraction magnétique. La pâte (eau + résidu) est injectée dans le circuit et circule dans le tube d'acrylique. Elle est diluée dans l'eau du circuit selon la concentration solide à tester lors de l'essai. Les particules magnétiques sont retenues par le champ magnétique dans le tube de plexiglas, tandis que le matériel non-magnétique circule librement dans le circuit. Le principe est d'utiliser l'eau et sa vitesse de circulation pour accentuer les interactions entre les différentes forces (présentées à la section 3.3.3) s'exerçant sur les particules magnétiques et non-magnétiques afin de les séparer. La Figure 4.33 schématise le principe de fonctionnement du système.

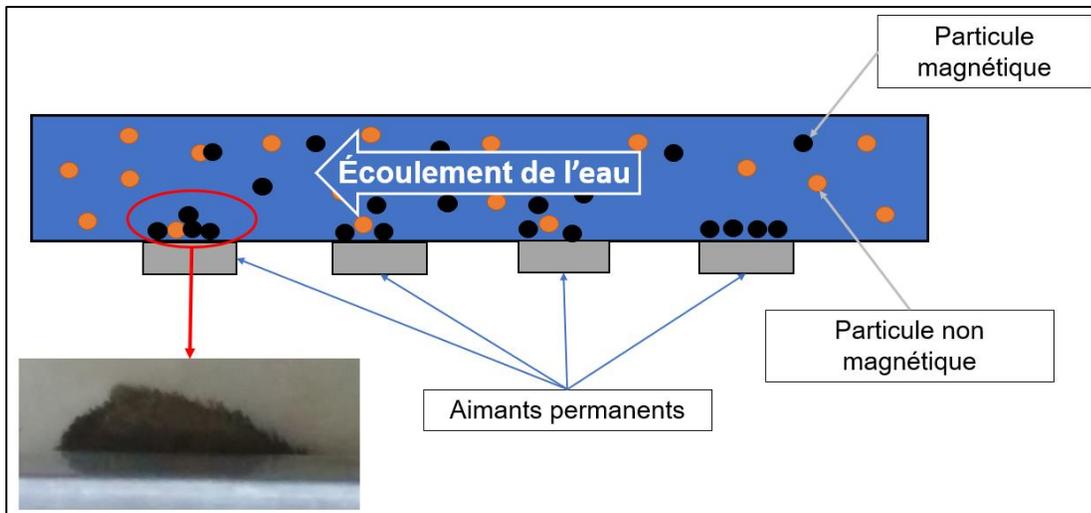


Figure 4.33 - Schéma du processus de séparation dans le tube en plexiglas ©Yoann Robert

Pour les essais expérimentaux, la concentration solide de la suspension se situe dans un intervalle compris entre 2,5 et 20 g/L et le débit volumique de circulation dans un intervalle compris entre 5 et 22 L/min. Le système fonctionne en discontinu pour une durée d'environ 4 minutes. Il est estimé que la suspension circule environ 20 fois dans le système pendant un essai. À la fin de chaque essai, le système est purgé, le tube de plexiglass est enlevé, son contenu est filtré puis analysé par gravimétrie et analyses XRF.

Les paramètres évalués lors des essais sont l'impact de la préparation du matériel (température de la mise en pâte, concentration solide de la pâte), l'influence de la vitesse de l'eau, la concentration solide de la suspension, la distance entre les aimants et le tube et le nombre de cycles de séparation. Un cycle de séparation correspond à un processus de séparation magnétique. Par exemple, si on parle de deux cycles de séparation, cela veut dire que la suspension est injectée une

première fois dans le système pour être séparée. À la fin du processus, la fraction magnétique est récupérée pour être réinjectée dans le circuit lors d'une seconde séparation.

4.3.2.3. Simulation numérique

Une simulation numérique est développée en simultané avec les essais expérimentaux. Elle consiste à créer un modèle numérique du processus de séparation. Ce modèle permet une meilleure compréhension du phénomène à petite échelle en vue de la conception d'un équipement à échelle industrielle. Le développement en simultané permet de comparer les résultats numériques et expérimentaux, et de valider la simulation numérique. Seul le phénomène physique se produisant dans le tube de plexiglas est modélisé.

4.3.2.3.1. Simulation de l'écoulement multiphasique

Le processus de séparation dans le tube de plexiglas est simulé avec le logiciel de simulation ANSYS® Fluent® utilisant un modèle de dynamique des fluides. Le modèle utilisé est le modèle Eulérien multiphasique. Dans cette approche, on introduit le concept de fraction volumique qui assure que le volume d'une phase ne peut être occupé par une autre phase. Ces fractions volumiques sont des fonctions continues du temps et de l'espace. La somme des fractions volumiques de chaque phase est égale à 1. Les équations de conservation de chaque phase sont dérivées afin d'obtenir un système d'équations avec une structure similaire pour chaque phase.

Pour n phases différentes, le modèle Eulérien résout un système de n équations de continuité et de moment pour chaque phase. Le couplage des équations est assuré par les coefficients de pression et des échanges interphasiques. Ce couplage va dépendre du type de phase impliquée :

- Granulaire (fluide & solide)
- Non granulaire (fluide & fluide)

Les écoulements vont être traités de manières différentes. Le cas présent est un écoulement granulaire, les propriétés sont obtenues à partir de l'application de la théorie cinétique. L'échange des quantités de mouvement entre les phases dépend du type de mélange modélisé (ANSYS, 2016).

Les équations utilisées dans le modèle Eulérien sont les équations de Navier-Stokes selon la décomposition de Reynolds. Cette méthode décrit les interactions entre l'écoulement turbulent de la suspension et une force externe. Pour chaque phase q , les équations (selon les directions u , v et w) sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \bar{u}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{u}_q \bar{u}_q) &= -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \bar{F}_q \\
 \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q \bar{v}_q) &= -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \bar{F}_q + \bar{F}_m \\
 \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \bar{w}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{w}_q \bar{w}_q) &= -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \bar{F}_q
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

Où α_q est la fraction volumique, ρ_q est la masse volumique, u_q , v_q et w_q sont les composantes de vitesse de la phase, p est la pression et g est l'accélération de pesanteur. $\bar{\tau}_q$ est le tenseur de contrainte de la phase q . F_q est le terme source référant aux forces d'interactions entre les différentes phases. F_m est la force magnétique appliquée sur les particules magnétiques et non-magnétiques. Les forces présentes dans le système d'équations sont des forces volumiques, elles s'expriment en N/m^3 .

Pour la simulation numérique, représentée en Figure 4.34, les composantes du calcul sont :

- Un écoulement turbulent
- 3 phases : fluide, particules magnétiques (magnétite) et particules non-magnétiques (silice)
- Une force externe : la force magnétique

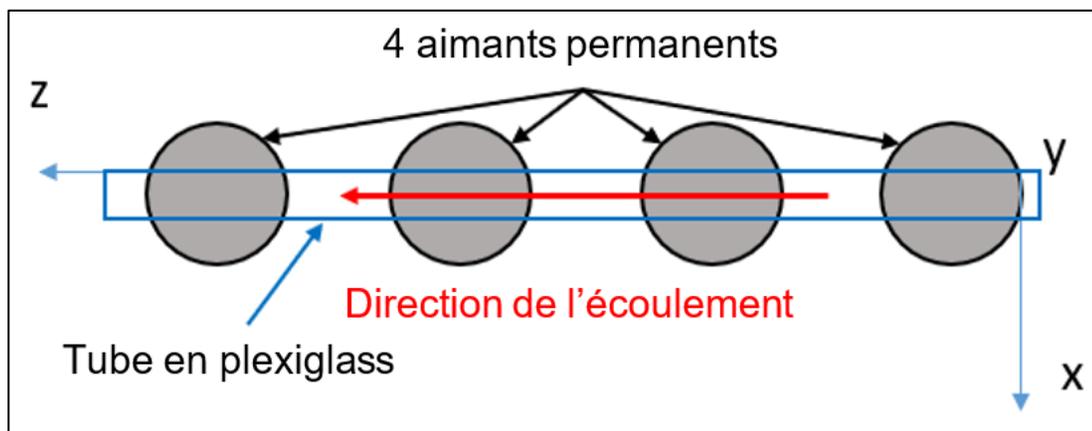


Figure 4.34 - Schéma de la simulation numérique ©Yoann Robert

Les données d'entrée du modèle d'écoulement sont répertoriées dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.12 - Données d'entrée du modèle d'écoulement multiphasique

Paramètre	Unité	Valeur
Concentration solide	g/L	2,5 - 20
Débit volumique	L/min	2 - 20

4.3.2.3.2. Calcul de la force magnétique

Le champ magnétique produit par les aimants a été calculé sur le logiciel COMSOL Multiphysics®. Seuls les 4 aimants ont été simulés, il n'y a pas besoin de simuler l'écoulement en même temps car la concentration en particules magnétiques est trop faible pour perturber le champ magnétique délivré par les aimants. La géométrie du système d'aimants, représentée en Figure 4.35, est reproduite sur le logiciel, et les conditions de calculs, citées dans le Tableau 4.13, telles que la perméabilité magnétique des matériaux et l'induction résiduelle des aimants sont appliquées au modèle numérique. L'induction résiduelle correspond au point d'intersection entre la boucle d'hystérésis et l'axe B lorsque la force de magnétisation est nulle et elle représente le flux de sortie maximal du matériau magnétique donné (KJ_Magnetics, 2020).

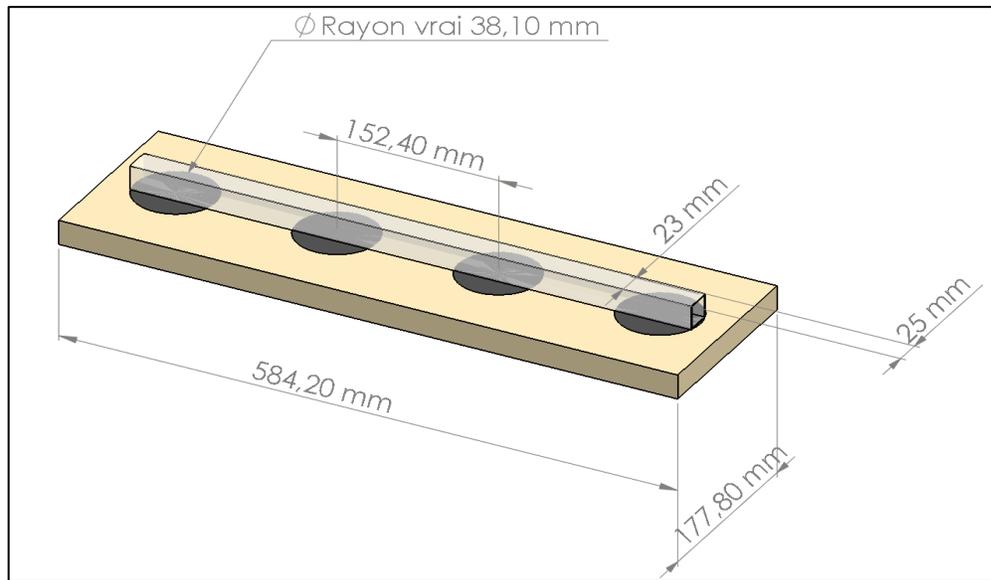


Figure 4.35 - Géométrie du système d'aimants ©Yoann Robert

Tableau 4.13 - Constantes magnétiques utilisées pour la simulation du champ magnétique

Constante	Matériau	Valeur	Unité
Perméabilité magnétique	Air	1,00000037	Sans unité
Perméabilité magnétique	Bois	1,00000043	Sans unité
Perméabilité magnétique	Plexiglas	0,99999094	Sans unité
Perméabilité magnétique	Néodyme	1,05000000	Sans unité
Induction résiduelle	Aimant néodyme	14 800	Gauss

Une fois le calcul achevé, l'intensité du champ magnétique est mesurée à la surface des aimants et à l'intérieur du tube de plexiglas. La différence des deux valeurs permet d'évaluer le gradient du champ magnétique qui sera ensuite introduit dans l'expression de la force magnétique donnée à l'équation 3.23 dans le système d'équation 4.31.

Les valeurs utilisées pour l'évaluation de la force magnétique s'exerçant sur une particule de magnétite sont regroupées dans le Tableau 4.14. Les valeurs B1 et B2 correspondent aux mesures de la densité de flux magnétique, exprimée en Tesla, à la surface de l'aimant (B1) et à l'intérieur du tube de plexiglas (B2), respectivement. Les valeurs H1 et H2 sont les conversions en champ magnétique exprimées en Ampère/mètre.

Tableau 4.14 - Valeurs utilisées pour le calcul de la force magnétique sur une particule de magnétite

Constante	Unité	Valeur	
Densité de flux magnétique B	Tesla (T)	B1=0,49966	B2=0,30023
Champ magnétique H	Ampère par mètre (A/m)	H1=397569	H2=238915
Perméabilité du vide	Henry par mètre (H/m)	$4.\pi.10^{-7}$	
Susceptibilité magnétique de la magnétite	Sans unité	9,25	
Susceptibilité magnétique de la silice	Sans unité	1	
Susceptibilité magnétique de l'eau	Sans unité	$-1,10^{-3}$	

En utilisant les valeurs du Tableau 4.14 dans l'équation 3.23, la force magnétique s'exerçant sur une particule d'une taille de 5 μm de magnétite et une particule de silice est de $3,84 \times 10^{-8}$ N et de $4,15 \times 10^{-9}$ N, respectivement.

Dans le système d'équation 4.31, la force F_m est exprimée en N/m^3 . Donc, pour une particule d'un diamètre de $5 \mu m$, la force magnétique F_m a une intensité de $5,87 \times 10^8 N/m^3$ sur une particule de magnétite et $6,34 \times 10^7 N/m^3$ pour une particule de silice. Ces valeurs sont utilisées pour la simulation numérique de l'écoulement multiphasique sur ANSYS® Fluent®.

4.4. AUGMENTATION DU TAUX DE RÉCUPÉRATION

Le premier montage a permis d'obtenir une teneur en fer optimale en magnétite dans la fraction magnétique mais avec un taux de récupération faible. De plus, le montage fonctionne en discontinu et avec une faible quantité de particules solides injectées. Un second montage fonctionnant en continu et pouvant être alimenté par un plus grand volume de suspension a été conçu. Comme pour le montage précédent, une simulation numérique accompagne le volet expérimental.

4.4.1. Montage expérimental d'un tube rotatif

4.4.1.1. Description

Le montage expérimental est un tube rotatif dans un dalot. Ce montage permet de pratiquer une séparation des particules en continu et avec une plus grande concentration solide. Reprenant le concept des séparateurs à basses intensités à tambour rotatif, le montage comprend un dalot et un système d'aimants installés dans un tube en rotation, l'ensemble est présenté en Figure 4.36.

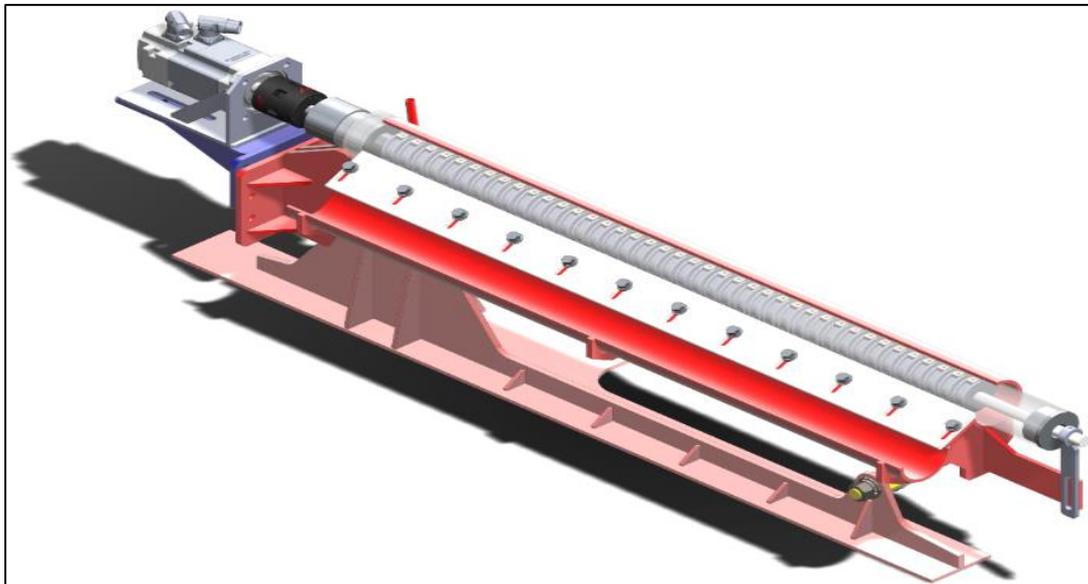


Figure 4.36 - Montage à tube rotatif ©Yoann Robert

Le système d'aimants, représenté à la Figure 4.37, est un « train d'aimants » fixe placé dans un cylindre en plexiglas en rotation dans un dalot. Ce système d'aimants est constitué de 13 supports d'aimants de forme cylindrique montés sur un axe. Chaque support peut contenir jusqu'à 9 aimants placés sur sa circonférence. Les aimants sont des aimants permanents au néodyme de forme carrée d'une dimension de 1 x 1 x 0,5 cm. Chaque aimant produit à sa surface un champ magnétique de 0,13 T.

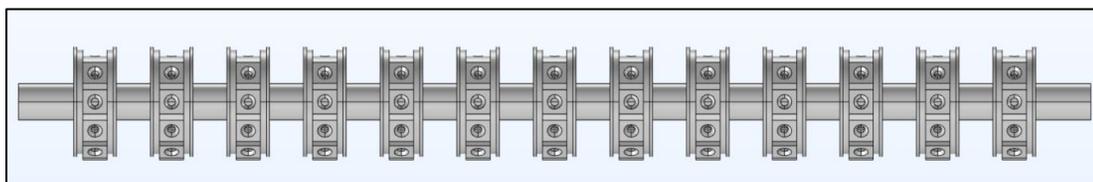


Figure 4.37 - Représentation du "train d'aimants" ©Yoann Robert

Le « train d'aimants » est glissé à l'intérieur d'un tube de plexiglass d'une longueur de 1 m, d'un diamètre de 10 cm et d'une épaisseur de 2 mm. Ce tube est entraîné en rotation par un système moto-réducteur électrique. Le dispositif peut être incliné suivant différentes pentes dont l'angle se situe entre 0 et 12°. L'ensemble tube et train d'aimants est posé dans le dalot. Il subsiste un espace entre le tube et le dalot afin de laisser s'écouler la suspension dans le dalot comme le montre la Figure 4.38. La structure du dalot et de l'ensemble du montage est construite en aluminium afin de ne pas créer d'interférences magnétiques avec les aimants. Le montage est muni d'une entrée et de deux sorties. Les sorties correspondent d'un côté à la récupération de la fraction magnétique et de l'autre, à la récupération de la fraction non-magnétique. Le système de récupération de la fraction magnétique est une gouttière disposée parallèlement au dalot.

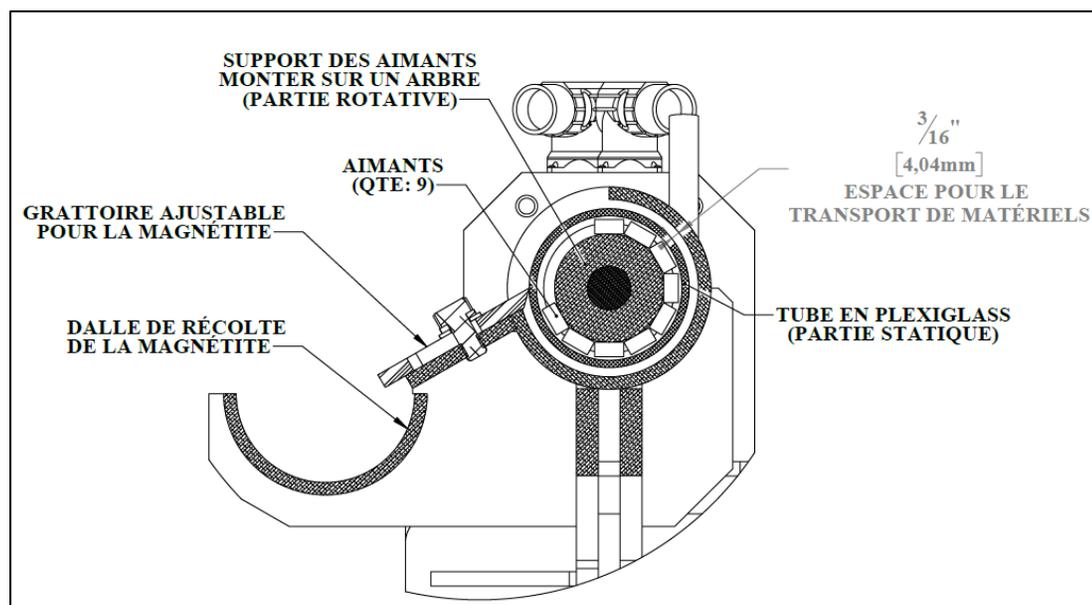


Figure 4.38 - Schéma détaillé du montage ©Yoann Robert

4.4.1.2. Protocole

Les essais sur ce montage ont pour but principal d'augmenter le taux de récupération de la magnétite dans la fraction magnétique tout en conservant une teneur en fer optimale. La Figure 4.39 illustre le processus de séparation. Le matériel, initialement broyé, est mis en pâte à une concentration solide de 400 g/L, puis la pâte est diluée dans un volume d'eau selon la concentration solide étudiée pour l'essai. Ensuite, la suspension est injectée dans le système grâce à une pompe centrifuge à l'entrée du dalot. Elle coule le long du dalot jusqu'à la sortie, dans l'espace entre le tube et le dalot. Les particules magnétiques vont se coller au tube grâce au champ magnétique produit par les aimants. Elles vont alors suivre la rotation du tube puis être décollées de celui-ci par un grattoir et se déposer dans la dalle de récolte. Le reste de la suspension continue de s'écouler le long du dalot.

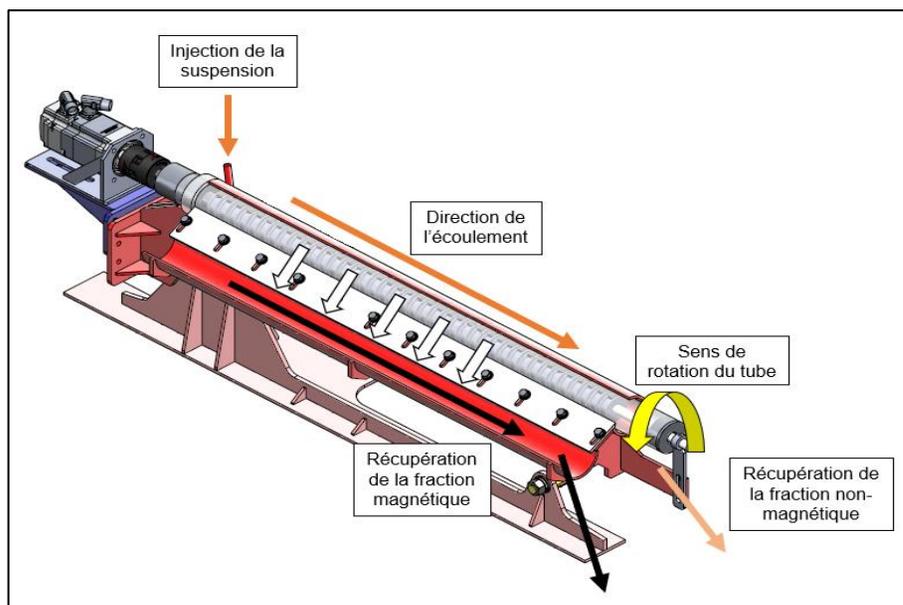


Figure 4.39 - Illustration du processus de séparation ©Yoann Robert

Le principe d'accentuation des forces d'interactions s'appliquant sur les particules, utilisé sur le premier montage (décrit en 4.3.2.2), est réutilisé ici. L'écoulement de la suspension dans le dalot sert aussi séparer les particules non-magnétiques des particules magnétiques pendant que ces dernières suivent la rotation du tube. Par la suite, le concentré séparé et le résidu non-magnétique sont analysés par gravimétrie et analyses par fluorescence des rayons X afin de déterminer les fractions massiques en oxydes de fer dans chaque échantillon.

Deux configurations du montage sont étudiées :

- Montage en boucle fermée : la fraction non-magnétique est réinjectée dans le système d'alimentation en continu jusqu'à que les aimants ne captent plus de particules.
- Montage en boucle ouverte : la suspension est alimentée dans le système puis passe au travers des aimants. Les fractions magnétiques et non-magnétiques sont récupérées séparément. La fraction non-magnétique sert d'alimentation pour une seconde séparation afin de récupérer les oxydes magnétiques et ainsi de suite. La Figure 4.40 montre le principe de la boucle ouverte utilisée lors des essais.

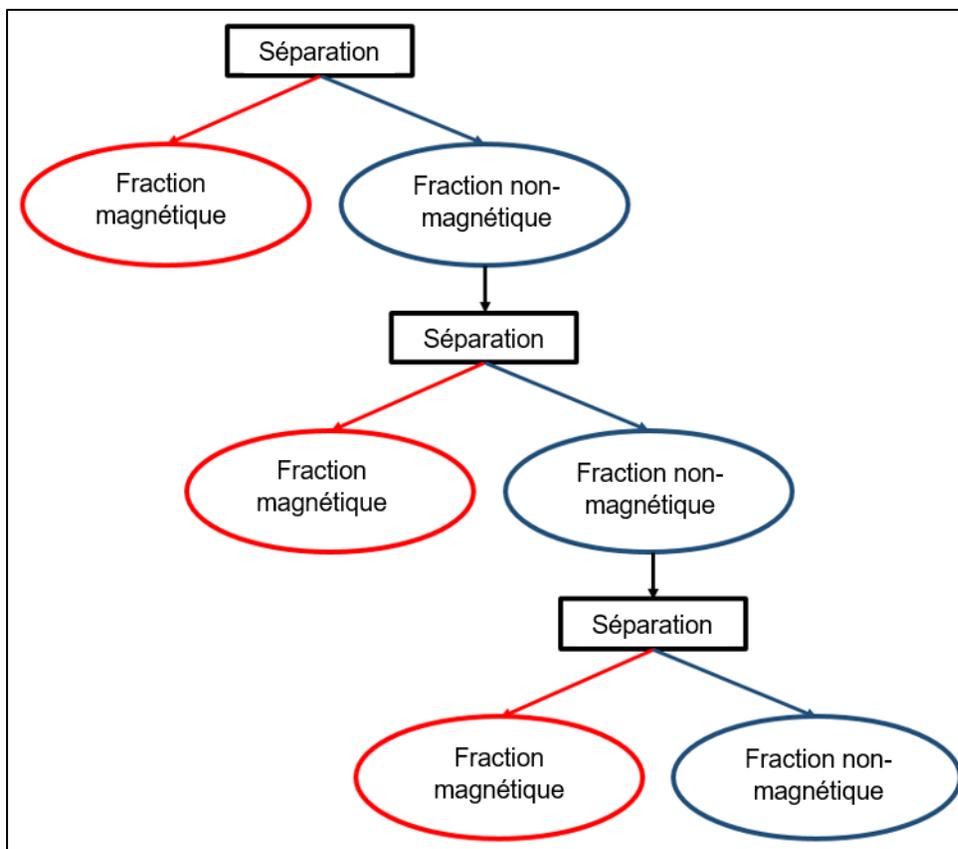


Figure 4.40 - Schéma de principe de la séparation en boucle ouverte
©Yoann Robert

Les paramètres étudiés avec ce montage sont les effets de la préparation du matériel (broyage et mise en pâte), le débit d'alimentation du système, la concentration solide de la suspension et la vitesse de rotation du tube. Le débit d'alimentation du système varie entre 2 et 12 L/min, 12 L/min étant le débit maximum au-delà duquel le système déborderait. La concentration solide de la suspension et la vitesse de rotation du tube varient entre 2,5 et 50 g/L et entre 3 et 9 tr/min, respectivement.

4.4.1.3. Simulation numérique

Le volet numérique associé à ce montage reprend le même principe que pour le précédent montage (décrit à la section 4.3.2.3). Il s'agit toujours de l'écoulement multiphasique calculé sur le logiciel ANSYS® Fluent® dont la géométrie a été adaptée au montage actuel, couplé à la simulation du train d'aimants.

4.4.1.3.1. Simulation de l'écoulement

Le modèle multiphasique développé pour le précédent montage est réutilisé et adapté pour simuler l'écoulement dans le dalot. La géométrie utilisée dans le modèle, présentée en Figure 4.41, représente l'espace occupé par la suspension.

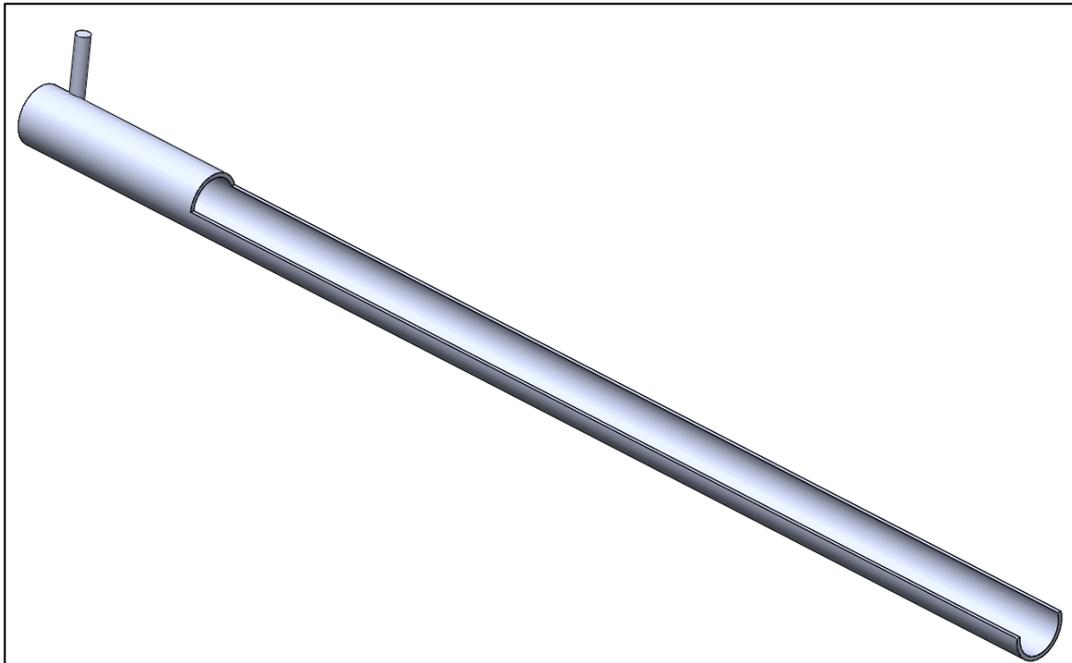


Figure 4.41 - Géométrie utilisée pour la simulation de l'écoulement multiphasique du second montage ©Yoann Robert

Le système d'équations à résoudre est identique au système 4.31. Les composantes du calcul sont les suivantes :

- Un écoulement turbulent le long du dalot
- 3 phases : fluide, particules magnétiques (magnétite) et particules non-magnétiques (silice)
- Une force externe : la force magnétique

Les données d'entrées de la simulation sont répertoriées dans le Tableau 4.15.

Tableau 4.15 - Données d'entrée de la simulation de l'écoulement multiphasique

Paramètre	Unité	Valeur
Concentration solide	g/L	2,5 - 50
Débit volumique	L/min	2 - 12
Angle d'inclinaison	Degré	0 - 12

4.4.1.3.2. Calcul de la force magnétique

Le train d'aimant est modélisé sur COMSOL Multiphysics® afin de récupérer les valeurs du champ magnétique et évaluer la force magnétique s'exerçant sur les deux phases solides. De même, seul le train d'aimants et le tube sont modélisés car les particules ne perturbent pas le champ magnétique produit par les aimants. La géométrie utilisée pour la simulation est présentée en Figure 4.42.

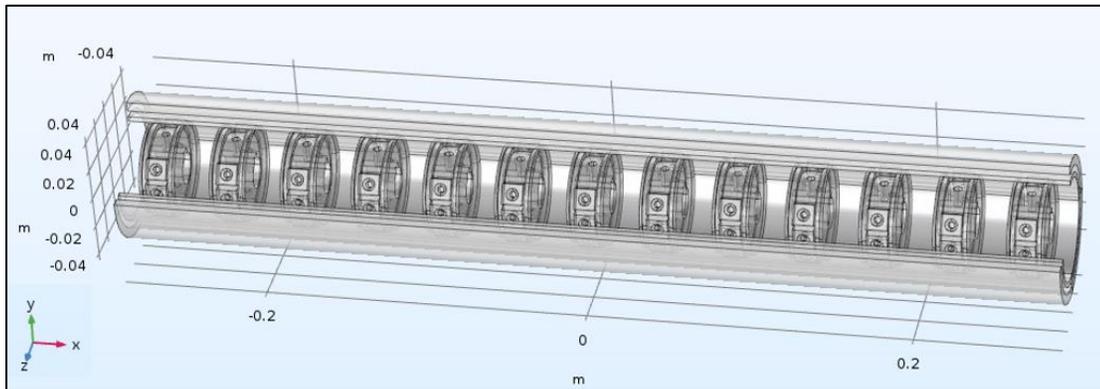


Figure 4.42 - Géométrie de la simulation du train d'aimant sur COMSOL Multiphysics®
©Yoann Robert

Pour déterminer la force magnétique, la densité de flux magnétique est mesurée au niveau de chaque support d'aimants tel que présenté à la Figure 4.43 : à la surface extérieure du tube (a), à la surface intérieure du dalot (b) et à la surface des aimants (c).

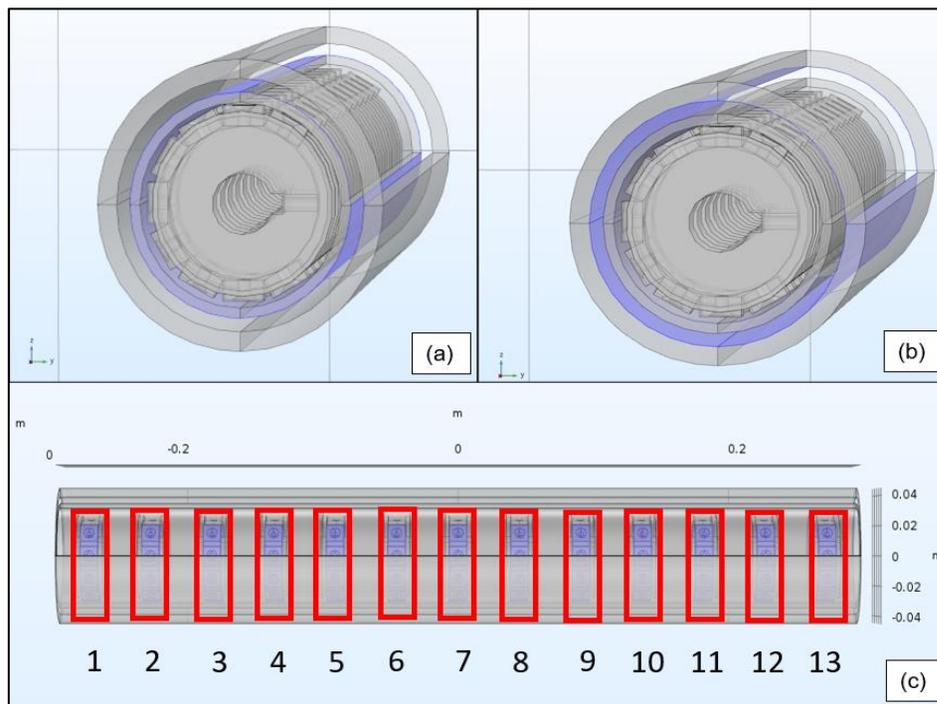


Figure 4.43 - Représentation des points de mesure de la densité de flux magnétique ©Yoann Robert

Les valeurs de densité de flux magnétique mesurées à la surface extérieure du tube (A), à la surface intérieure du dalot (B) et à la surface des aimants (C) au niveau du support d'aimant n°1 et leurs conversions en champ magnétique sont répertoriées dans le Tableau 4.16. Les supports d'aimants étant identiques, les mesures de densité de flux magnétique sont aussi identiques à chaque support.

Tableau 4.16 - Densités de flux magnétique mesurées aux 3 frontières et conversion en champ magnétique

Frontières	A	B	C
Densité de flux magnétique (T)	0,05	0,02	0,80
Champ magnétique (A/m)	39789	15915	636619

Ainsi, en reprenant les valeurs des constantes magnétiques des différentes phases dans le Tableau 4.14 et les valeurs des champs magnétiques du Tableau 4.16 dans l'équation 3.23, les forces magnétiques à la surface extérieure du tube et à la surface intérieure du dalot peuvent être évaluées pour la magnétite et la silice. Le Tableau 4.17 répertorie les valeurs des forces magnétiques exercées sur chaque phase en fonction de la surface sur laquelle elle se trouve et leur moyenne dans le dalot au niveau du premier support d'aimant (n°1 sur la Figure 4.43).

Tableau 4.17 - Forces magnétiques exercées sur les deux phases solides évaluées à l'intérieur du dalot

Phase solide	Magnétite	Silice
Force magnétique à la surface extérieure du tube (N/m³)	5,87.10 ⁸	6,34.10 ⁷
Force magnétique à la surface intérieure du dalot (N/m³)	2,94.10 ⁸	3,18.10 ⁷
Force magnétique moyenne dans le dalot (N/m³)	4,40.10 ⁸	4,76.10 ⁷

C'est la valeur de la force magnétique moyenne qui est injectée dans le système d'équations du modèle d'écoulement multiphasique 4.314. pour chaque phase solide sur ANSYS® Fluent®.

4.4.2. Limitations du montage

L'un des paramètres clés mais limitant du montage est la concentration solide. Au-delà d'une concentration solide de 50 g/L, le système rencontre des problèmes d'engorgement en amont du train d'aimants. Les particules s'agglutinent sur le tube au niveau du premier support d'aimants. En effet, lorsque la concentration solide augmente, le nombre de particules entrant dans le système augmente. Le tube ne tourne pas assez vite pour évacuer les particules aimantées et le dalot se bouche provoquant un débordement du système. Cependant l'augmentation de la vitesse de rotation a un impact négatif sur la teneur en fer de la fraction magnétique. S'il tourne trop vite, l'eau ne fait pas séparer les particules non-magnétiques et la fraction magnétique contient plus d'impuretés. La Figure 4.44 montre le phénomène de débordement observé.



Figure 4.44 - Débordement du dalot ©Yoann Robert

Afin de limiter le phénomène de débordement, une modification du train d'aimants a été apportée pour que l'intensité de la force magnétique augmente graduellement le long du train d'aimants. Deux nouvelles configurations, présentée à la Figure 4.45, composées de supports avec 6, 7, 8 puis 9 aimants au lieu de supports contenant seulement 9 aimants, ont été créées à l'entrée de manière à « laisser passer » les particules magnétiques qui seront piégées plus loin lorsque le champ magnétique sera plus fort, de manière à réduire l'engorgement à l'entrée.

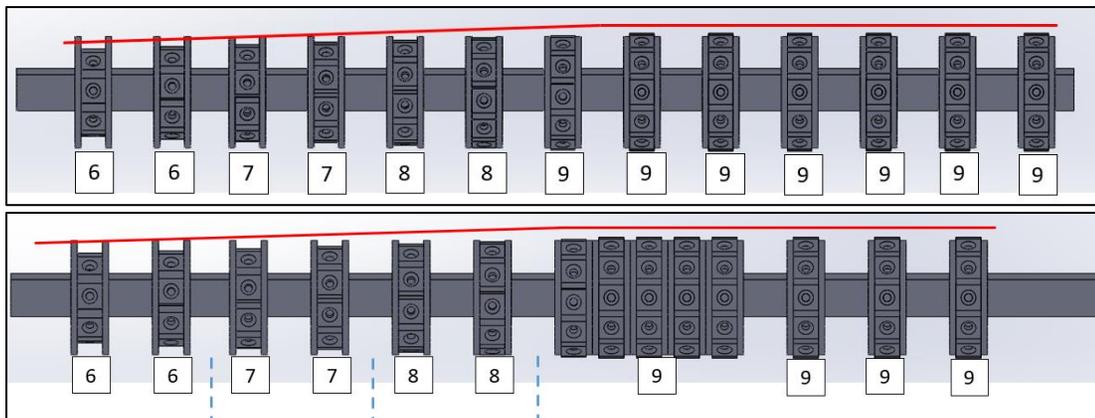


Figure 4.45 - Nouvelles configurations du train d'aimants ©Yoann Robert

Malgré le changement de configuration, la concentration solide n'a pu être augmentée au-delà de 100 g/L, concentration à laquelle le phénomène de débordement réapparaissait, le débit d'alimentation était très lent (environ 6 L/min) et le taux de récupération des particules magnétiques n'était pas optimisé.

Ce phénomène de débordement soulève le point de l'optimisation de la probabilité de contact et de capture entre les particules magnétiques et la surface aimantée. Afin d'améliorer le procédé, un nouveau montage expérimental a été conçu, permettant de travailler à une plus grande concentration solide et d'améliorer les probabilités de capture des particules magnétiques.