

## **5.3. AUGMENTATION DE LA SURFACE DE CONTACT ENTRE LES PARTICULES ET LES AIMANTS**

Dans cette section, sont présentés les résultats des expérimentations effectuées sur le séparateur à disque magnétique. Le but de ce séparateur est de pouvoir travailler à plus forte concentration solide sans diminuer les performances de la séparation. Les paramètres d'opération et leurs influences sur la séparation sont évalués. Tel que mentionné à la section 4.5.1.2, c'est un mélange idéal composé de magnétite et de résidu de bauxite non traité. Un modèle numérique de prédiction sera utilisé afin de prédire et simuler les résultats de séparation pour une combinaison de paramètres donnée.

### **5.3.1. Résultats expérimentaux**

#### ***5.3.1.1. Effet de la concentration solide***

Durant les premières étapes de l'étude, dont les résultats sont présentés aux sections 5.1.1 et 5.2.1, la concentration solide de la suspension se situait entre 2,5 et 50 g/L, ce qui demanderait des équipements de très grandes tailles et d'énormes volumes de liquide à gérer pour un processus à l'échelle industrielle. Le séparateur à disque a été utilisé avec une suspension de concentration solide supérieure entre 200 et 700 g/L convenant davantage à un processus industriel. Le volume de la suspension est de 1 L, la masse solide est ajustée pour correspondre à la concentration désirée. La Figure 5.64 présente le taux de récupération et la teneur dans la fraction magnétique selon les différentes concentrations solides. Les

résultats présentés ont été obtenus pour un débit d'alimentation de 500 mL/min et une vitesse de rotation du disque de 20 tr/min. Le débit d'alimentation est moins élevé que sur le précédent montage, car le montage à disque est plus petit et est alimenté par une pompe de plus petit format.

L'augmentation de la concentration solide n'a pas d'impact significatif sur le taux de récupération qui, dans tous les cas, est très proche de 100 %. En revanche, l'augmentation de la concentration solide impacte la teneur en fer dans la fraction magnétique où l'on observe une variation de la teneur en fer de 45 à 57 % p/p. L'augmentation de la teneur en fer à une plus haute concentration solide est un aspect intéressant pour un processus industriel. Ici encore, on peut avancer l'hypothèse de la magnétisation successive abordée à la section 5.2.1.2.2. L'augmentation de la concentration solide, c'est plus de particules magnétiques soumises à un champ magnétique. L'effet de magnétisation est intensifié et permet de récupérer davantage de particules magnétiques sur le disque, tandis que les particules non-magnétiques restent dans le réservoir.

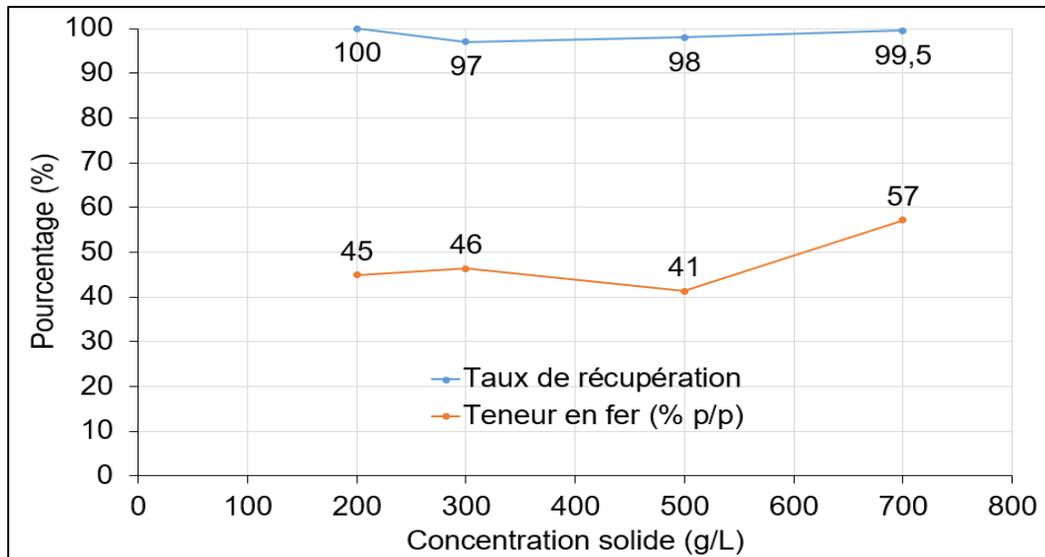
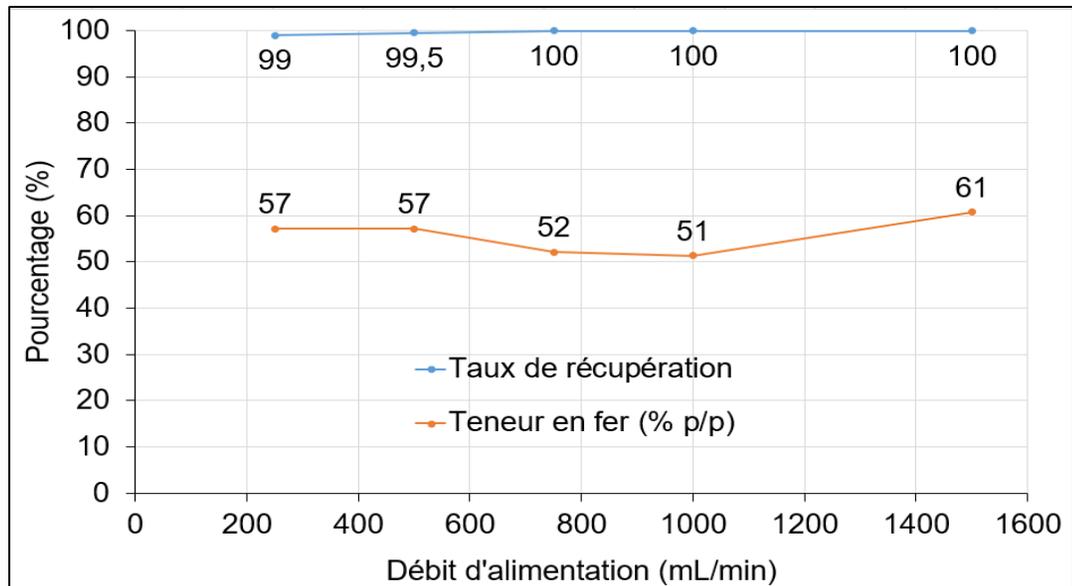


Figure 5.64 - Taux de récupération et teneur en fer dans la fraction magnétique en fonction des concentrations solides ©Yoann Robert

### 5.3.1.2. Effet du débit

L'impact du débit d'alimentation a été évalué pour valider l'efficacité du disque durant le processus de séparation. L'augmentation du débit d'alimentation se traduit par un plus grand nombre de particules injectées dans le réservoir pour un même intervalle de temps. Ainsi, il faut déterminer si l'augmentation du nombre de particules dans le réservoir, pour un intervalle de temps donné, n'a pas un impact négatif sur les performances du disque. La Figure 5.65 présente le taux de récupération et la teneur en fer dans la fraction magnétique en fonction du débit d'alimentation. Les tests ont été effectués avec une suspension à une concentration de 700 g/L, une vitesse de rotation du disque de 20 tr/min et un débit d'alimentation entre 250 et 1500 mL/min. L'intervalle choisit pour le débit d'alimentation est dû aux limites du design de l'équipement et aux capacités de la pompe d'alimentation.

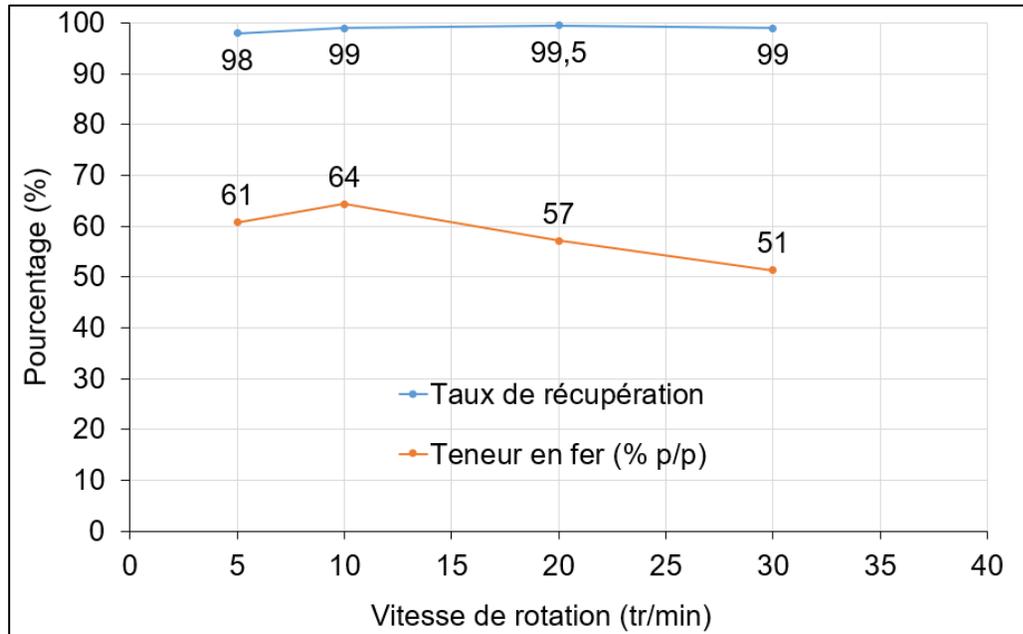


**Figure 5.65 - Taux de récupération et teneur en fer dans la fraction magnétique en fonction des débits d'alimentation ©Yoann Robert**

L'augmentation du débit d'alimentation n'affecte pas le taux de récupération qui vaut 100 % dans la majorité des cas. Cependant, on peut observer une variation de la teneur en fer dans la fraction magnétique entre 51 et 61 % p/p. L'augmentation du débit d'alimentation a un effet positif sur le taux de récupération et sur la teneur en fer de la fraction magnétique. Comme énoncé précédemment, un plus grand débit d'alimentation signifie un plus grand nombre de particules dans le réservoir dans un intervalle de temps donné. Pendant cet intervalle, la concentration solide augmente dans le réservoir, ainsi le comportement collectif des particules magnétiques opère aussi dans cette situation expliquant une teneur en fer élevée malgré un débit plus fort.

### **5.3.1.3. Effet de la vitesse de rotation**

En plus de la concentration en solides et du débit d'alimentation, l'impact de la vitesse de rotation du disque sur le processus de séparation a également été étudié. En raison des limites du système d'air, il était prévu que l'augmentation de la vitesse de rotation pourrait avoir un impact néfaste sur la teneur en fer dans la fraction magnétique. Ces tests ont été effectués en utilisant une suspension à une concentration solide de 700 g/L, un débit d'alimentation de 500 mL/min et des vitesses de rotation du disque allant de 5 à 30 tr/min, et les résultats sont présentés à la Figure 5.66. L'augmentation de la vitesse de rotation du disque n'a également aucun effet sur la récupération de magnétite, qui reste proche de 100%. D'un autre côté, la teneur en magnétite diminue à une vitesse de rotation plus élevée, variant de 64 à 51 % p/p, ce qui suggère que, dans la configuration actuelle, le système d'air n'est pas en mesure d'empêcher les impuretés d'être entraînées par le disque lorsque la vitesse de rotation est trop élevée.



**Figure 5.66 - Taux de récupération et teneur en fer dans la fraction magnétique en fonction de la vitesse de rotation du disque ©Yoann Robert**

### 5.3.2. Résultats de l'étude heuristique

Un volet numérique accompagne aussi cette phase expérimentale, mais il ne s'agit pas d'une simulation basée sur un modèle mathématique mais sur une étude heuristique utilisant des modèles de statistiques et de prédictions. Dans un premier temps, les données expérimentales, présentées à la section 5.3.1., sont utilisées pour l'apprentissage. La Figure 5.67 présente la base de données utilisée pour l'apprentissage des algorithmes. Cette base de données sera utilisée en deux temps. En effet, les algorithmes ne peuvent pas prédire deux résultats différents en même temps. L'apprentissage se fait sur le taux de récupération (% récupération Fe mag), puis sur la teneur en fer (% pureté Fe mag).

Mat_no	Débit alimentation (ml/min)	Concentration (g/L)	Vit rotation disque (RPM)	% Récupération Fe mag	% Pureté Fe mag
1	500	200	20	64	52
1	500	200	20	68	51
1	500	200	20	73	47
2	500	200	20	81	32
3	500	200	20	84	32
4	500	300	20	83	64
4	500	300	20	91	67
5	500	200	20	99	46
5	500	200	20	100	46
5	500	200	30	100	43
5	500	300	20	97	48
5	500	300	20	97	44
5	500	500	20	98	42
5	500	500	20	98	40
5	500	700	20	100	56
5	500	700	10	99	66
5	500	700	10	99	63
5	500	700	5	98	61
5	500	700	30	99	51
5	250	700	20	99	57
5	1000	700	20	100	51
5	1500	700	20	100	61
5	1500	700	20	100	59
6	500	500	20	100	62
1	1500	500	5	60	44
1	1500	500	10	76	37
1	1500	700	10	69	39
1	1500	700	10	67	41
5	700	700	10	100	61
5	700	700	20	100	58

Figure 5.67 - Base de données utilisée pour l'apprentissage ©Yoann Robert

Les valeurs numériques de la colonne « Mat\_no » de la base de données référencient les différents mélanges de matériel utilisés lors des expérimentations :

- N°1 : résidu de bauxite calciné + eau
- N°2 : résidu de bauxite calciné + eau
- N°3 : résidu de bauxite calciné + eau
- N°4 : Magnétite pure + Aluminium pure
- N°5 : Magnétite pure + Résidu de bauxite non calciné (« boue rouge »)

### **5.3.2.1. Phase d'apprentissage des algorithmes**

#### *5.3.2.1.1. Taux de récupération*

Le taux de récupération est d'abord étudié pendant l'apprentissage, toutes les colonnes (données présentées précédemment en Figure 5.67) sont utilisées sauf la colonne « % Pureté Fe mag ». La base de données, composée de 30 lignes de données, telle que 90 % des données (27 lignes de données) sont utilisées pour l'apprentissage des algorithmes. Les 10 % restant sont utilisés dans les prédicteurs pour évaluer la précision des algorithmes. La précision des algorithmes est évaluée par la comparaison du coefficient de détermination  $R^2$ . Le coefficient de détermination évalue la capacité d'un modèle à prédire ou à expliquer un résultat dans le cadre d'une régression. Il indique la proportion de la variance dans la variable dépendante qui est prédite par la régression et la variable prédictive.  $R^2$

prends ses valeurs entre 0 et 1. Une valeur de  $R^2$  élevée proche de 1 indique que le modèle est bien adapté aux données (Boyd Ender, 2020). Le Tableau 5.28 présente la précision de chaque algorithme lors de la phase d'apprentissage pour la prédiction du taux de récupération du fer dans la fraction magnétique. Avec un coefficient de 0,998, l'algorithme d'amplification du gradient est l'algorithme le plus précis. Le Tableau 5.29 présente la prédiction du taux de récupération où les valeurs prédites sont très proches du taux de récupération réel. L'amplification du gradient sera utilisée pour la prédiction du taux de récupération avec les nouvelles combinaisons de paramètres lors de l'exploration des données.

**Tableau 5.28 - Comparaison de la précision des algorithmes pour l'apprentissage des données du taux de récupération**

<b>Algorithme</b>	<b>Coefficient de détermination <math>R^2</math></b>
<b>Amplification du gradient</b>	0,998
<b>Réseau de neurones MLP</b>	0,997
<b>Régression linéaire</b>	0,995
<b>Régression polynomiale</b>	0,991
<b>Ensemble d'arbres</b>	-25,382
<b>Forêts aléatoires</b>	-26,555

**Tableau 5.29 - Résultats de la prédiction par l'algorithme d'amplification du gradient du taux de récupération après apprentissage**

Type de mélange	Débit (L/min)	Concentration (g/L)	Vitesse (tr/min)	Taux réel (%)	Taux prédit (%)
1	500	200	20	68	68,5
5	500	700	10	99	99
5	250	700	20	99	100

### 5.3.2.1.2. Teneur en fer dans la fraction magnétique

De même, la teneur en fer dans la fraction magnétique est étudiée pour l'apprentissage des algorithmes. Toutes les colonnes (données présentées précédemment en Figure 5.67) sont utilisées sauf la colonne « % récupération Fe mag ». Comme pour l'apprentissage sur le taux de récupération, la base de données est partitionnée telle que 90 % des données sont utilisées pour l'apprentissage des algorithmes. Les 10 % restant sont utilisés dans les prédicteurs pour évaluer la précision des algorithmes. Le Tableau 5.30 présente la précision de chaque algorithme lors de la phase d'apprentissage de la teneur en fer dans la fraction magnétique. Avec un coefficient de détermination de 0,931, l'algorithme d'amplification du gradient est l'algorithme le plus précis pour l'apprentissage des données. Le

Tableau 5.31 présente les résultats de la prédiction de la teneur en fer par l'algorithme d'amplification du gradient. Ici aussi, cet algorithme sera utilisé pour la prédiction de la teneur en fer dans la fraction magnétique lors de la phase d'exploration des données.

**Tableau 5.30 - Comparaison de la précision des algorithmes pour l'apprentissage des données de la teneur en fer**

<b>Algorithme</b>	<b>Coefficient de détermination R<sup>2</sup></b>
<b>Amplification du gradient</b>	0,931
<b>Réseau de neurones MLP</b>	0,816
<b>Ensemble d'arbres</b>	0,548
<b>Forêts aléatoires</b>	0,506
<b>Régression linéaire</b>	0,13
<b>Régression polynomiale</b>	-1,611

**Tableau 5.31 - Résultats de la prédiction par l'algorithme d'amplification du gradient de la teneur en fer après apprentissage**

<b>Matériel</b>	<b>Débit (L/min)</b>	<b>Concentration (g/L)</b>	<b>Vitesse (tr/min)</b>	<b>Taux réel (%)</b>	<b>Taux prédit (%)</b>
4	500	300	20	67	64
1	1500	500	5	44	40
1	1500	500	10	37	40

### **5.3.2.2. Exploration des données**

#### *5.3.2.2.1. Validation du modèle de prédiction*

Lorsque l'apprentissage sur la base de données expérimentales est effectué et le meilleur algorithme sélectionné, la phase d'exploration des données peut être démarrée. Dans cette phase, la précision du modèle de prédiction va être évaluée avec de nouvelles données qui n'ont jamais été vues par l'algorithme. Les paramètres expérimentaux vont être combinés sous différentes combinaisons et être envoyés dans le prédicteur qui prédira le taux de récupération et la teneur en fer correspondants. L'exploration des données est effectuée sur 468 combinaisons différentes dont les paramètres sont présentés dans le Tableau 5.32.

**Tableau 5.32 - Paramètres expérimentaux utilisés pour l'exploration des données**

<b>Débit d'alimentation (mL/min)</b>	300-400-500-600-700-750-800-900-1100-1200-1300-1400-1500
<b>Concentration solide (g/L)</b>	200-250-300-500-600-700
<b>Vitesse de rotation du disque (tr/min)</b>	5-10-15-20-25-30

La validation de l'exploration des données s'effectue par comparaison des prédictions avec les résultats expérimentaux pour les mêmes combinaisons de paramètres, bien qu'elles n'aient pas pu être toutes testées expérimentalement. Trois combinaisons de paramètres ont été sélectionnées pour effectuer une

validation préliminaire du modèle de prédiction présenté dans cette étude et les résultats sont présentés au Tableau 5.33.

**Tableau 5.33 - Comparaison des résultats expérimentaux et des prédictions pour la validation de l'exploration des données**

Matériel	Débit (L/min)	Concentration (g/L)	Vitesse (tr/min)	Taux de récupération (%)		Teneur en fer (%p/p)	
				Réel	Prédiction	Réel	Prédiction
5	500	300	20	97	97	46	46
5	500	700	20	99	100	58	56
5	750	700	20	100	100	52	58

Les résultats présentés au Tableau 5.33 montrent que les valeurs prédites sont très proches des résultats expérimentaux. Il en est de même pour la prédiction de la teneur en fer dans la fraction magnétique. Ces résultats suggèrent une bonne conservation de la précision du modèle de prédiction entre l'apprentissage et l'exploration des données, ainsi que la robustesse du modèle de prédiction. Ce modèle de prédiction peut être utilisé pour renseigner la combinaison optimale de paramètres pour la séparation magnétique sur le disque.

### 5.3.2.2.2. Prédiction des combinaisons optimales

Après avoir testé toutes les combinaisons possibles, à partir des paramètres présentés au Tableau 5.32, pour prédire le taux de récupération et la teneur en fer dans la fraction magnétique, les résultats du modèle de prédiction ont été collectés. Concernant le taux de récupération, toutes les combinaisons présentent des taux supérieurs ou égaux à 97 %. Le choix de la combinaison optimale repose sur la prédiction de la teneur en fer dont les résultats sont présentés à la Figure 5.68.

I Débit alimentation (mL/min)	I Concentration (g/L)	I Vit rotation disque (tr/min)	D ▼ Prédiction (% Pureté Fe mag)
300	700	10	64.5
300	700	15	64.5
400	700	10	64.5
400	700	15	64.5
500	700	10	64.5
500	700	15	64.5
600	700	10	64.5
600	700	15	64.5
300	700	5	61
700	700	5	61
700	700	10	61
700	700	15	61
750	700	5	61
750	700	10	61
750	700	15	61
800	700	5	61
800	700	10	61
800	700	15	61
400	700	5	61
500	700	5	61
600	700	5	61
1300	700	5	61
1300	700	10	61
1300	700	15	61
1400	700	5	61
1400	700	10	61
1400	700	15	61
1500	700	5	61
1500	700	10	61
1500	700	15	61

**Figure 5.68 - Combinaisons de paramètres optimales prédites par le modèle de prédiction**  
©Yoann Robert

La teneur en fer maximale prédite par le modèle est 64,5 %p/p soit presque 90 %p/p de magnétite. Cette teneur est obtenue à la plus haute concentration solide (700 g/L), mais les débits d'alimentation sont plutôt faibles entre 300 et 600 mL/min. Afin de répondre à des exigences industrielles et notamment utiliser un débit d'alimentation maximum, il serait préférable de sélectionner une combinaison avec le débit d'alimentation et la concentration maximale. Ainsi, un débit de 1500 mL/min, une concentration de 700 g/L et une vitesse de rotation entre 5 et 15 tr/min permettent d'obtenir une teneur en fer de 61 %p/p soit 84 %p/p de magnétite dans la fraction magnétique. Cette combinaison de paramètres semble être la combinaison optimale pour obtenir une séparation magnétique efficace.

Cependant, la faible taille de la base de données (données expérimentales) porte préjudice au modèle de prédiction. Un plus grand nombre de données permettrait d'étoffer la précision de l'apprentissage des algorithmes, et d'améliorer la validation du modèle de prédiction lors de la phase d'exploration des données.