

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA FILTRATION SOUS HAUTE PRESSION DE
RÉSIDUS MINIERS EN SUSPENSION**

PAR
SIMON GRAVEL
B. SC. (GÉNIE CHIMIQUE)

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

OCTOBRE 2015

À ma mère Nicole Boucher

Sommaire

La filtration sous haute pression des résidus miniers en suspension s'avère être une technique hautement efficace pour augmenter la siccité de ces résidus jusqu'à de très hautes fractions solides. Cette augmentation de siccité offre une opportunité aux industries de diminuer significativement la quantité de résidus devant être disposés. Dans cette optique, le présent travail est une étude expérimentale de la filtration sous haute pression de divers résidus miniers pour l'obtention de haute fraction solide.

Le comportement rhéologique de la boue rouge pendant la filtration est aussi étudié. Les propriétés, telles que la limite d'élasticité en compression, la résistance spécifique massique et le taux de déposition des particules solides sous forme de gâteau, sont étudiées. En utilisant différentes procédures expérimentales, il a été démontré que la limite d'élasticité en compression de la boue rouge augmente exponentiellement et son comportement devient semblable à celui d'un solide au-delà d'une fraction solide massique d'environ 70%. La résistance spécifique massique du gâteau augmente linéairement selon sa fraction massique et le taux de déposition des particules solides atteint un plateau lorsque la pression de filtration dépasse 6000 kPa.

Différents montages expérimentaux ont été fabriqués afin d'étudier la filtration sous haute pression des résidus miniers. Il est démontré qu'une filtration radiale au travers une enveloppe filtrante composée d'un empilement de disques métalliques compressés permet d'atteindre de hautes fractions solides puisque l'enveloppe peut résister à de très hautes

pressions tout en assurant une bonne séparation solide-liquide. Différents paramètres sont étudiés, tels que la rugosité de surface, la mouillabilité du medium, l'épaisseur filtrante, la densité de plaques et la force de compression appliquée sur celles-ci. La rugosité de surface s'avère être la propriété qui influence le plus la perméabilité du filtre. L'acier inoxydable pulvérisé au jet de billes de verre et un acier recouvert de peinture cuite sont les principaux choix de médium filtrant pour la filtration des résidus miniers étudiés.

Des modèles de filtration axiale et radiale de boue compressible et non-compressible sont présentés tout au long du présent travail. Ces modèles permettent d'étudier de la filtration des résidus de la production d'alumine, du bore, du fer, et de la digestion du charbon. Des procédures expérimentales de filtration sur presse hydraulique et avec pompe à déplacement positif permettent de filtrer sous haute pression ces divers résidus. Tous les résidus démontrent une bonne capacité de séparation solide-liquide à l'aide des méthodes employés, à l'exception du résidu de la production du bore. Dans le cas du bore, la taille des particules et la viscosité de la suspension offre une trop grande résistance pour obtenir une haute fraction solide.

Remerciements

Merci tout d'abord à mon directeur et co-directeur de recherche, Professeur André Leclerc et M. Guy Simard pour m'avoir guidé et supporté tout au long du projet.

Merci à M. Sébastien Fortin du Centre de Recherche et Développement d'Arvida (CRDA), directeur de recherche en milieu pratique pour son intérêt et sa présence tout au long du projet.

Merci à M. Alain Boivin, également du CRDA, pour ses conseils, ses idées et son implication tout au long du projet.

Un merci particulier à l'équipe du laboratoire de recherche semi-industriel du CURAL pour leur aide et leur implication durant tout le projet. Cette équipe composée de M. Pascal Vandal, auteur de la majorité des dessins présentés dans ce travail et concepteur des différents montages expérimentaux, de M. Eric Lemay et de M. Charles Gagnon.

Merci à mes collègues aux cycles supérieurs, soit Mme Véronique Savard pour son aide et ses précieux conseils et de Mme Myriam Auclair-Gilbert.

Mes remerciements vont également à Rio Tinto Alcan, au CRSNG et au FQRNT pour leur support financier tout au long de mes études de 2^{ième} cycle.

Un dernier merci particulier à ma conjointe et ma famille pour leur support moral sans qui ce projet n'aurait pu être une réussite.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	III
REMERCIEMENTS	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XVI
NOMENCLATURE ET UNITÉS	XVII
1. INTRODUCTION	1
1.1. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	3
1.2. REVUE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS	6
2. TECHNIQUES DE SÉPARATION SOLIDE-LIQUIDE	9
2.1. INTRODUCTION	9
2.2. CARACTÉRISATION DES PARTICULES SOLIDES	9
2.2.1. Forme et distribution de la taille des particules	10
2.2.2. Densité des particules	11
2.2.3. Propriétés de surface des particules	11

2.2.4. Caractérisation de la boue rouge	12
2.3. DÉCANTATION	13
2.3.1. La nature des particules	14
2.3.2. Les effets de concentration	16
2.3.3. Les prétraitements	17
2.3.3.1. La coagulation	17
2.3.3.2. La floculation	18
2.3.4. La forme des décanteurs	18
2.4. CENTRIFUGATION	19
2.4.1.1. Les hydrocyclones	19
2.4.1.2. Les centrifugeuses	20
2.5. FILTRATION	21
2.5.1. Méthode de filtration	21
2.5.1.1. Filtration gravitationnelle	21
2.5.1.2. Filtration sous vide	21
2.5.1.3. Filtration sous pression	22
2.5.1.4. Filtration centrifuge	23
2.5.2. Types de filtration	23
2.5.2.1. Filtration sur gâteau	24
2.5.2.2. Filtration à lit profond	24
3. RHÉOLOGIE ET PROPRIÉTÉS DES FLUIDES PARTICULAIRES	26

3.1.	INTRODUCTION	26
3.2.	IMPORTANTS CONCEPTS RHÉOLOGIQUES	26
3.2.1.	Contrainte de cisaillement et vitesse de déformation	26
3.2.2.	Viscosité dynamique	28
3.2.3.	Technique de caractérisation	28
3.3.	COMPORTEMENTS ET MODÈLES D'ÉCOULEMENT	29
3.3.1.	Comportement indépendant du temps	29
3.3.2.	Comportement dépendant du temps	33
3.3.2.1.	Thixotropie	33
3.3.2.2.	Rhéopexie	34
3.4.	CLASSIFICATION DE L'ÉPAISSISSEMENT DES SUSPENSIONS	35
3.5.	COMPRESSIBILITÉ	37
3.5.1.	Point de gel	38
3.5.2.	Limite d'élasticité en compression	40
4.	FILTRATION SOUS PRESSION	41
4.1.	INTRODUCTION	41
4.2.	RELATION DÉBIT-PERTE DE CHARGE	41
4.2.1.	Loi de Darcy	41
4.2.2.	Loi de Darcy modifiée	42
4.3.	ÉQUATIONS DE BASE – GÂTEAU INCOMPRESSIBLE	43
4.3.1.	Filtration à pression constante	46

4.3.2. Filtration à débit constant	47
4.4. ÉQUATIONS DE BASE – GÂTEAU COMPRESSIBLE	48
4.4.1. Filtration à pression constante	50
4.4.2. Filtration à débit constant	50
4.5. MODÈLE DE FILTRATION RADIALE	50
4.5.1. Filtration à pression constante	52
5. MONTAGES ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX	54
5.1. MONTAGES EXPÉRIMENTAUX	54
5.1.1. Filtre à membrane	54
5.1.2. Filtres à plaques	54
5.1.2.1. Filtration linéaire	55
5.1.2.2. Filtration radiale	56
5.2. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX DE FILTRATION	58
5.2.1. Filtration sur presse hydraulique	58
5.2.1.1. Filtration à pression constante	59
5.2.1.2. Filtration à pression constante étagée	60
5.2.1.3. Filtration à débit constant	61
5.2.2. Filtration avec pompe à déplacement positif	62
5.3. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION	63
5.3.1. Gravimétrie	63
5.3.2. Rugosité des plaques de filtration	65

5.3.3. Mouillabilité de la surface des plaques	69
5.3.4. Force de compression entre les plaques	71
6. RÉSULTATS ET DISCUSSION	72
6.1. FILTRATION DE LA BOUE ROUGE SUR MEMBRANE	72
6.1.1. Préparation des échantillons de boue rouge	72
6.1.2. Limite d'élasticité en compression	73
6.1.3. Classification de l'état de la boue rouge	75
6.1.4. Résistance spécifique massique	76
6.1.5. Taux de déposition des particules solides	79
6.1.6. Calculs d'erreurs	81
6.2. CARACTÉRISATION DES PLAQUES DE FILTRATION	82
6.2.1. Rugosité des plaques de filtration	82
6.2.1.1. Résultats du profilomètre	82
6.2.1.2. Résultats du rugosimètre	85
6.2.2. Mouillabilité des plaques de filtration	89
6.3. FILTRATION LINÉAIRE AVEC FILTRE À PLAQUES	91
6.3.1. Filtration sur gâteau de boue rouge à débit constant	91
6.3.2. Encrassement des filtres à plaques	95
6.4. FILTRATION RADIALE AVEC FILTRE À PLAQUES	97
6.4.1. Filtration continue avec pompe à déplacement positif	97
6.4.2. Filtration sur presse hydraulique à débit constant	101

6.4.2.1. Densité de fentes	101
6.4.2.2. Type de disques	103
6.4.3. Filtration du résidu de la digestion du charbon	105
6.4.3.1. Composition	105
6.4.3.2. Filtration avec de l'huile de canola pure	108
6.4.3.3. Filtration de la suspension à pression constante	110
6.4.4. Filtration de divers résidus miniers	112
6.4.4.1. Paramètres expérimentaux	112
6.4.4.2. Résultats de la filtration	113
7. CONCLUSION	115
BIBLIOGRAPHIE	120
ANNEXES	123

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma du procédé Bayer de RTA	2
Figure 2.1 : Guide de sélection de la technologie de séparation solide-liquide selon la taille des particules	10
Figure 2.2 : Schéma de l'interaction entre deux particules sphériques chargées électriquement	12
Figure 2.3 : Évolution de la hauteur de décantation en fonction du temps dans un test du cylindre	17
Figure 2.4 : Floculation des particules par l'ajout de polymères	18
Figure 2.5 : Schéma simplifié d'un décanteur typique	19
Figure 2.6 : Schéma simplifié d'un hydrocyclone	20
Figure 2.7 : Représentation des types de filtration : a) filtration sur gâteau et b) filtration à lit profond	23
Figure 3.1 : Écoulement d'un fluide entre deux plaques parallèles	27
Figure 3.2 : Rotateur à palettes	29
Figure 3.3 : Rhéogramme des fluides pseudoplastiques, Newtoniens et dilatants	30
Figure 3.4 : Rhéogramme des fluides pseudoplastiques avec retard, Bingham et dilatant avec retard	31
Figure 3.5 : Représentation de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les fluides rhéopectique et thixotropique	33
Figure 3.6 : Rhéogramme d'un rhéofluidifiant avec un comportement thixotropique présentant une hystérèse	34
Figure 3.7 : Classification de la consistance des résidus de boue [28]	36
Figure 3.8 : Percolation du fluide au travers des particules solides [3]	38
Figure 3.9 : Essai de sédimentation en cylindre gradué pour déterminer la fraction solide du point de gel	39

Figure 4.1 : Représentation des pertes de charge lors de la filtration sur gâteau sous pression	42
Figure 5.1 : Montage expérimental de filtration linéaire; vue explosée	55
Figure 5.2 : Joint d'étanchéité « Quadring »	56
Figure 5.3 : Montage expérimental de filtration radiale; vue explosée	57
Figure 5.4 : Disque métallique composant le filtre du montage expérimental de filtration radiale	57
Figure 5.5 : Presse hydraulique MTS-810	59
Figure 5.6 : Montage expérimental de filtration avec pompe à déplacement positif	62
Figure 5.7 : Représentation de deux plaques rugueuses en contact	66
Figure 5.8 : a) Rugosimètre et b) schéma du balayage de la surface par la fine pointe de contact	68
Figure 5.9 : Profilomètre optique	69
Figure 5.10 : Représentation de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur un support selon son degré de mouillabilité	69
Figure 5.11 : Technique de caractérisation de la mouillabilité d'une surface	70
Figure 5.12 : Cellule de charge	71
Figure 6.1 : Schéma du principe de filtration à pression constante pour déterminer la limite d'élasticité en compression d'une suspension	73
Figure 6.2 : Limite d'élasticité en compression en fonction de la fraction solide massique de la boue rouge	75
Figure 6.3 : Courbes de filtration t/V vs V pour les essais sur la boue rouge avec la méthode à pression unique	77
Figure 6.4 : Résistance spécifique massique de la boue rouge en fonction de la fraction solide massique	78
Figure 6.5 : Pourcentage de la masse de solide initiale déposée sur le gâteau en fonction du temps	80

Figure 6.6 : Taux de déposition des particules solides sur le gâteau pour chaque pression de filtration étudiée avec la méthode à pression unique	81
Figure 6.7 : Analyse de la rugosité de surface des plaques au profilomètre optique	83
Figure 6.8 : Profil de rugosité de a) l'acier et de b) l'acier inoxydable	84
Figure 6.9 : Profil de rugosité de a) l'acier pulvérisé au jet de billes de verre et de b) l'acier inoxydable pulvérisé au jet de billes de verre	84
Figure 6.10 : Profil de rugosité de l'acier pulvérisé au jet de sable naturel	85
Figure 6.11 : Analyse de la rugosité de surface des plaques au rugosimètre	86
Figure 6.12 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier recouverte de peinture cuite bleue	87
Figure 6.13 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier recouverte de peinture cuite noire	87
Figure 6.14 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier rouillé	88
Figure 6.15 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier inoxydable pulvérisé au jet de billes de verre	88
Figure 6.16 : a) Goutte d'eau en surface d'une plaque d'acier (sbsn) et b) représentation d'une goutte d'eau sur une surface rugueuse possédant des pics et des creux étroits	90
Figure 6.17 : Pression finale pour faire circuler un débit d'eau constant de 1 ml/min/cm ² au travers de différentes épaisseurs de gâteau et d'un filtre d'acier recouvert de peinture cuite.	93
Figure 6.18 : Encrassement par les particules de boue rouge du filtre à plaque d'acier recouvert de peinture cuite	95
Figure 6.19 : Courbes de filtration t/V vs V de la boue rouge à pression constante de 3447 kPa sur filtre à plaques	96
Figure 6.20 : Montage de filtration pour déterminer la perméabilité du a) filtre d'acier et b) filtre d'acier inoxydable	98
Figure 6.21 : Données expérimentales de pression en fonction du temps pour la filtration d'un débit constant de 75 ml/min	100
Figure 6.22 : Représentation de la filtration de la boue rouge au travers de deux filtres avec une densité de fente différente	102

Figure 6.23 : Pression interne en fonction du temps pour la filtration à débit constant de la boue rouge au travers différents types de filtre	104
Figure 6.24 : Image au MEB des solides du résidu de la digestion du charbon	106
Figure 6.25 : Distribution volumique de la taille des particules des solides présents dans le résidu [33]	107
Figure 6.26 : Distribution volumique de la taille des particules de l'oxyde de fer catalyseur [33]	107
Figure 6.27 : Viscosité des huiles du résidu de la digestion du charbon et de l'huile de canola[33]	108
Figure 6.28 : Pression à l'intérieur du montage de filtration pour un débit constant d'huile de canola de 23 mL/min	109
Figure 6.29 : Épaisseur du gâteau (89 % (p/p)) du mélange d'essai en fonction du temps pour une filtration à pression constante	111
Figure 6.30 : Représentation du gâteau formé lors de l'essai de filtration à pression constante	112
Figure 6.31 : Volume de filtrat en fonction du temps pour divers résidus miniers lors d'une filtration à pression constante	114
Figure 6.32 : Échantillon d'un gâteau de a) boue noire, b) boue grise et c) boue rouge	114
Figure 7.1: Évolution de la fraction massique moyenne de la boue rouge en fonction du temps lors du premier essai de filtration avec la méthode à pression étagée	123
Figure 7.2: Évolution de la fraction massique moyenne de la boue rouge en fonction du temps lors du second essai de filtration avec la méthode à pression étagée	124
Figure 7.3: Évolution de la fraction massique moyenne de la boue rouge en fonction du temps lors du troisième essai de filtration avec la méthode à pression étagée	125

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Liste de la définition des diamètres équivalents à une sphère	11
Tableau 2.2 : Effet de la taille des particules sur le temps de décantation en sédimentation libre[23]	14
Tableau 5.1: Degré de mouillabilité d'une surface selon les forces d'adhésion et de cohésion	70
Tableau 6.1 : Angle de contact d'une goutte d'eau en surface des plaques de filtration de différents matériaux	89
Tableau 6.2 : Données pour déterminer l'épaisseur du gâteau selon le volume de boue initiale filtrée	92
Tableau 6.3 : Résultats expérimentaux pour déterminer la résistance induite par le gâteau de boue rouge	94
Tableau 6.4 : Résistance des filtres d'acier et d'acier inoxydable	98
Tableau 6.5 : Paramètres expérimentaux des essais de filtration à débit constant avec différents matériaux de plaques filtrantes	103
Tableau 6.6 : Composition des résidus de la digestion du charbon et du mélange d'essai	105
Tableau 6.7 : Paramètres expérimentaux de la filtration de divers résidus miniers	113

Nomenclature et unités

Romain

A	Aire d'une surface	m^2
c	Concentration solide du gâteau	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
d	Diamètre de la particule	m
d_{eq}	Diamètre équivalent de la particule	m
e_c	Épaisseur du gâteau	m
e_f	Épaisseur du filtre	m
C_d	Coefficient de traînée	-
F	Force	N
F_d	Force de traînée d'une particule	N
F_g	Force de gravité	N
g	Constante de la gravité	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
h	Hauteur du lit de boue	m
h_0	Hauteur initiale du lit de boue	m
h_f	Hauteur du filtre cylindrique	m
k	Perméabilité traditionnelle de Darcy	m^2
K	Constante empirique déterminée expérimentalement	-
L	Longueur du milieu perméable	m
m_l	Masse du liquide	kg
m_s	Masse de solide sec du gâteau	kg

m_{sel}	masse du sel	kg
m_{susp}	masse de la suspension	kg
n	constante empirique déterminée expérimentalement, indice de compressibilité, nombre	-
P	Pression, perte de charge	Pa
ΔP_c	perte de charge au travers du gâteau	Pa
ΔP_m	perte de charge au travers du médium filtrant	Pa
$P_y(\varphi)$	limite d'élasticité en compression	Pa
Q	Débit volumique	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
r	Rayon	m
r_0	Rayon interne du filtre cylindrique	m
R_c	Résistance spécifique volumique du gâteau	m^{-2}
R_f	Résistance spécifique volumique du filtre	m^{-2}
Re	Nombre de Reynolds	-
Sa	Rugosité : Moyenne arithmétique des valeurs absolues	m
Sp	Hauteur positive d'un pic	m
Sq	Rugosité : Racine quadratique moyenne	m
St	Espacement maximal du profil de rugosité	m
Sv	Profondeur négative d'une vallée	m
t	Temps	s
t_0	Temps initial	s
v	Vitesse, vélocité d'approche	$\text{m} \cdot \text{s}$
v_t	Vitesse terminale d'une particule en décantation	$\text{m} \cdot \text{s}$

V	Volume spécifique de filtrat (volume de filtrat par unité de surface)	m
V_c	Volume de gâteau	m^3
V_f	Volume de filtrat	m^3
V_p	Volume de la particule	m^3
V_0	Volume spécifique de filtrat initial	m
w	Masse de solide sec déposé par unité de surface	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$
x	Fraction solide massique	-
x_c	Fraction solide massique du gâteau	-
x_0	Fraction solide massique initiale	-
z	Hauteur d'un pic, profondeur d'une vallée	m

Grecque

α_m	Résistance spécifique massique du gâteau	$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$
α_{moy}	Résistance spécifique moyenne	$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$
α_0	Résistance spécifique à pression unitaire	$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$
β	Compressibilité	Pa^{-1}
$\dot{\gamma}$	Vitesse de déformation	s^{-1}
μ	Viscosité dynamique du liquide	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_∞	Viscosité plastique	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ_l	Masse volumique du liquide	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_s	Masse volumique du solide	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
τ	Contrainte de cisaillement	Pa

τ_y	Seuil de cisaillement	Pa
φ	Fraction solide volumique	-
φ_c	Fraction solide volumique du gâteau	-
φ_g	Fraction solide volumique au point de gel	-
φ_0	Fraction solide volumique initiale	-
φ_∞	Fraction solide volumique finale	-
ω	Vitesse angulaire	rad·s ⁻¹

1

Introduction

L'extraction des minéraux, des terres rares et des métaux est un secteur industriel qui produit une quantité importante de résidus sous forme de boue de procédé. Tout dépendamment du procédé, la boue produite possède une fraction solide plus ou moins élevée, ce qui a un impact sur le volume total de résidus envoyés au site de disposition. Une boue plus épaisse est moins volumineuse et une plus grande quantité peut en être disposée avant que la capacité maximale du site de disposition soit atteinte. Les résidus de la production du fer, du bore et de l'alumine sont tous des exemples de boue de procédé qui est entreposée dans des sites de disposition. Dans le cas de la production d'alumine, la boue de procédé, communément appelée boue rouge, est produite par l'extraction de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) du minerai de bauxite par le procédé Bayer.

Ce procédé a été mis au point par Karl Josef Bayer en 1887 et demeure le procédé le plus utilisé dans l'industrie de production d'alumine. Le procédé est basé sur la dissolution de l'alumine provenant de la bauxite par une solution de soude caustique. Les quatre principales étapes du procédé sont la digestion, la clarification, la précipitation et la calcination (Figure 1.1). Dans l'étape de digestion, la bauxite est d'abord broyée et ensuite mélangée sous haute température et pression avec de la soude caustique, ce qui solubilise

l'alumine du minerai. Par la suite, à l'étape de clarification, la solution de soude caustique et d'alumine est acheminée vers une série de décanteurs afin de séparer l'alumine en solution des impuretés solides. Ensuite, à l'étape de précipitation, des cristaux de trihydrate d'alumine sont formés en refroidissant la solution dans des décomposeurs. Finalement, à l'étape de la calcination, les cristaux sont lavés, filtrés et chauffés dans des fours. Cette dernière étape permet ainsi de retirer les molécules d'eau pour obtenir l'alumine anhydre sous forme d'une fine poudre blanche.

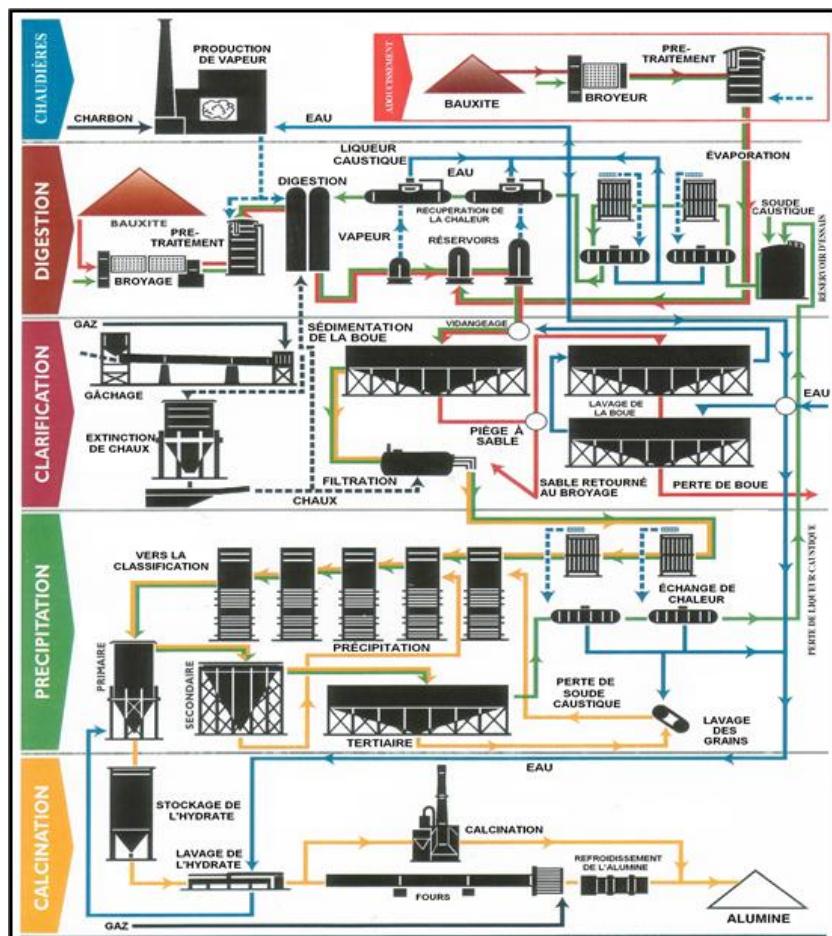


Figure 1.1 : Schéma du procédé Bayer de RTA

Tel que mentionné précédemment, pendant l'étape de clarification, l'alumine en solution est séparée du résidu solide. Cette boue rouge est principalement composée des oxydes et hydroxydes de silice, d'aluminium, de fer, de calcium et de titane [1]. Sa couleur rouge brique provient des impuretés du fer. La série de décanteurs permet d'épaissir et de nettoyer la boue rouge. Le lavage s'effectue à contre-courant, ce qui signifie que la liqueur recueillie à la surverse d'un décanteur est dirigée vers l'alimentation du décanteur en amont, tandis que la boue recueillie à la sousverse du dit décanteur est dirigée vers l'alimentation du décanteur en aval. Cette configuration permet d'enrichir la liqueur de la surverse en aluminate et en caustique et de laver la boue qui, au terme de son passage dans les décanteurs, est acheminée au site de disposition.

Le volume de boue envoyée au site de disposition est directement relié à la fraction solide de celle-ci. Normalement, le procédé permet l'épaississement de la boue à une fraction solide massique entre 45 et 50% (p/p). En termes de fraction solide volumique, la boue épaissie se situe entre 0,21 et 0,24% (v/v). Plus des trois quarts du volume de résidu acheminée au site de disposition est du liquide, soit de la liqueur Bayer diluée.

1.1. Problématique et objectifs

La disposition de résidus de procédé représente un coût important pour les usines œuvrant dans le domaine minier. Cette disposition a un impact environnemental puisque les surfaces de terres utilisées sont très vastes et des produits chimiques sont fréquemment présents dans les résidus. De plus, la longévité des sites de disposition est directement

reliée au volume de résidu entreposé. Pour les usines de production d'alumine et pour toutes les usines dont le procédé produit une quantité importante de résidu sous forme de boue de procédé, diminuer le volume de résidu par son épaississement permet d'augmenter la durée de vie du site de disposition.

Il existe plusieurs techniques pour épaisser une suspension de solide dans un liquide, telles que la décantation, la centrifugation et la filtration. La décantation est largement employée dans l'industrie minière puisqu'elle permet l'épaississement d'importants volumes de boue en continue. Cette technique est d'ailleurs utilisée dans le procédé Bayer. Par contre elle ne permet pas d'obtenir une fraction solide très élevée. La centrifugation permet pour sa part d'obtenir une fraction solide plus élevée. Cette technique est cependant limitée par les installations nécessaires. Ces installations sont dispendieuses, nécessitent un entretien fréquent et sont normalement peu adaptées pour traiter de grands volumes. La filtration est la technique de séparation solide-liquide qui permet d'extraire un maximum de liquide d'une suspension. Elle est majoritairement utilisée en fournée, ce qui implique beaucoup de manutention pour traiter d'importants volumes. Cependant, lorsqu'utilisée à haute pression, cette technique représente un choix judicieux pour épaisser des boues de procédé jusqu'à de très hautes fractions solides, éliminant ainsi la problématique de disposition d'importants volumes de résidus.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise est d'étudier la filtration sous haute pression de divers résidus miniers. Cette étude permettra de caractériser le comportement des résidus miniers lors de la filtration à haute pression, notamment leur comportement

rhéologique. Pour mieux comprendre la filtration sous haute pression de la boue rouge, ses propriétés rhéologiques, telles que le point de gel, la limite d'élasticité en compression, le taux de déposition des particules solides et la résistance spécifique du gâteau seront étudiées. D'autres propriétés, telles que la grosseur des particules formant la suspension et la viscosité du liquide, feront également partie de l'étude. De plus, le filtre permettant de filtrer à haute pression sera caractérisé afin de maximiser son efficacité. Les filtres étudiés sont constitués d'un empilement de plaques métalliques compressées. Cette configuration donne aux filtres de bonnes propriétés mécaniques en filtration à pression élevée. L'étude paramétrique du filtre métallique comprendra l'épaisseur du filtre, la quantité de plaques métalliques par unité de longueur, la force de compression entre les disques, la mouillabilité et la rugosité des disques. Chaque propriété influence la perméabilité du filtre et son impact sur celle-ci sera étudié.

La boue rouge est le matériel de référence de cet ouvrage. Elle sera caractérisée et les paramètres du filtre seront optimisés pour maximiser la perméabilité du filtre lors de la filtration de cette suspension. Cette étude permettra de comparer diverses suspensions à la boue rouge afin de déterminer l'efficacité de leur séparation solide-liquide. La taille des particules, la viscosité du fluide porteur ainsi que le comportement rhéologique sont des propriétés intrinsèques à la suspension. Cette comparaison permettra de classer les divers résidus miniers selon leur potentiel de séparation solide-liquide par la filtration sous haute pression au travers d'un filtre métallique.

1.2.Revue des travaux antérieurs

L’Australie est un des pays les plus importants pour la production d’alumine, étant donné la grande disponibilité de bauxite sur ce territoire. Plusieurs chercheurs s’intéressent à ce secteur d’activité important, notamment les chercheurs Australiens Hind, Bhargava et Grocott [1] qui ont étudié la chimie de surface des solides du procédé Bayer. Ils ont synthétisé l’information sur la boue rouge issue du procédé Bayer en décrivant en détail la chimie de ce résidu solide, son comportement dans le procédé, les méthodes de disposition utilisées et les applications de la boue rouge qui suscitent beaucoup d’intérêt de la part de la communauté industrielle et scientifique.

La production d’alumine mondiale est en forte croissance, ce qui augmente de façon considérable la production de résidu et l’inventaire entreposé de cette boue rouge. Les travaux de Power [2] font le point sur l’histoire et l’avenir des résidus de bauxite, sur les pratiques d’entreposages et sur la gestion mondiale de ce résidu.

Les propriétés rhéologiques de la boue rouge sont décrites en détails dans les travaux de Boivin [3]. Les propriétés à l’étude, telles que la viscosité, la contrainte de cisaillement, la vitesse de déformation et la thixotropie sont des propriétés contrôlant la décantation de la boue rouge.

Les travaux de Usher [4] présentent en premier lieu la théorie de la rhéologie des suspensions et de l’assèchement et en second lieu les techniques de caractérisation des suspensions et les outils de modélisation. Ses travaux portent principalement sur la boue

rouge et sur l'industrie de la production d'alumine avec des partenaires industriels tels que Alcoa, les raffineries Pinjarra Alumina, Worsley Alumina et Queensland Alumina (QAL).

La filtration peut être décrite par la loi de Darcy, qui est en fait une description de l'écoulement en milieu poreux. Les aspects théoriques de la filtration et les mécanismes de transfert sont mis de l'avant par les travaux de Aimar (2010) [5].

Il existe deux types de filtration : soit la filtration linéaire, où l'écoulement du filtrat est parallèle à la force appliquée, soit la filtration tangentielle, où l'écoulement du filtrat est perpendiculaire à la force appliquée. Lorsque la filtration a lieu dans un filtre cylindrique, la filtration tangentielle s'appelle également filtration radiale. Plusieurs modèles utilisent la loi de Darcy pour décrire la filtration linéaire et radiale. Shirato [6-12] a développé des modèles pertinents pour représenter la filtration sur gâteau. Ils sont à la base de la majorité des recherches dans le domaine, dont le travail exhaustif de Lee [13] traitant de la filtration sur gâteau et de la consolidation des boues.

Les travaux effectués par plusieurs chercheurs dans le but de modéliser le plus précisément possible la filtration indiquent que celle-ci est largement dépendante de la suspension à l'étude. Dans certain cas, l'étude d'un gâteau incompressible [14] permet de simplifier les modèles, mais restreint son application contrairement à ceux avec un gâteau compressible [15]. La concentration en solide initiale [16], la grosseur des particules [15, 17, 18] et leurs propriétés [19] sont tous des paramètres importants pour la modélisation de la filtration.

La plupart des travaux s'intéressent à la filtration linéaire. La modélisation est plus simple puisque la surface de filtration demeure constante. La complexité de la modélisation de la filtration radiale provient de la modification de la surface de filtration provoquée par l'épaisseissement du gâteau en surface du filtre. En tenant compte de cette particularité, les travaux de Civan [14, 15] ont permis de représenter efficacement la filtration radiale. Il mentionne par contre que, lorsque l'épaisseur du gâteau est faible relativement au rayon de la surface du filtre exposée à la suspension, les modèles de filtration linéaire s'appliquent.

La littérature portant sur la filtration au travers d'un filtre métallique de disques compressés est très rare. Par contre, le type d'écoulement est étudié dans les travaux de Plouraboué [20] et Varnik [21]. Le passage d'un liquide entre deux surfaces solides en contact est représenté à l'aide de la méthode du réseau géodésique selon Plouraboué. Cette méthode permet ainsi, selon ces auteurs, d'attaquer le problème complexe du transport de fluide entre deux surfaces rugueuses en contact et de détailler l'implémentation numérique de ce modèle ainsi que ses performances. Dans le cas de Varnik, ses travaux portent sur la modélisation de cet écoulement complexe en partant des équations de Navier-Stokes.

2

Techniques de séparation solide-liquide

2.1.Introduction

Plusieurs procédés produisent une grande quantité de suspension particulaire comme matériel intermédiaire, comme produit final ou même comme résidu. Les industries minières, des pâtes et papiers et du traitement des eaux usées sont toutes des exemples où un résidu est généré sous forme de boue de procédé. La technique de séparation solide-liquide à adopter dépend essentiellement des propriétés du fluide porteur et des propriétés des particules solides. Dans l'industrie minière, les principales techniques de séparation utilisées sont la décantation, la centrifugation et la filtration.

2.2.Caractérisation des particules solides

La caractérisation des propriétés primaires des particules d'un fluide particulaire est une étape primordiale pour le choix de la technologie de séparation solide-liquide à adopter. Les propriétés primaires sont : la distribution de la taille des particules, leur forme, leur densité et leurs propriétés de surface.

2.2.1. Forme et distribution de la taille des particules

Svarovsky [22] fournit un diagramme qui permet de déterminer la technologie de séparation solide-liquide à adopter selon la taille des particules (Figure 2.1).

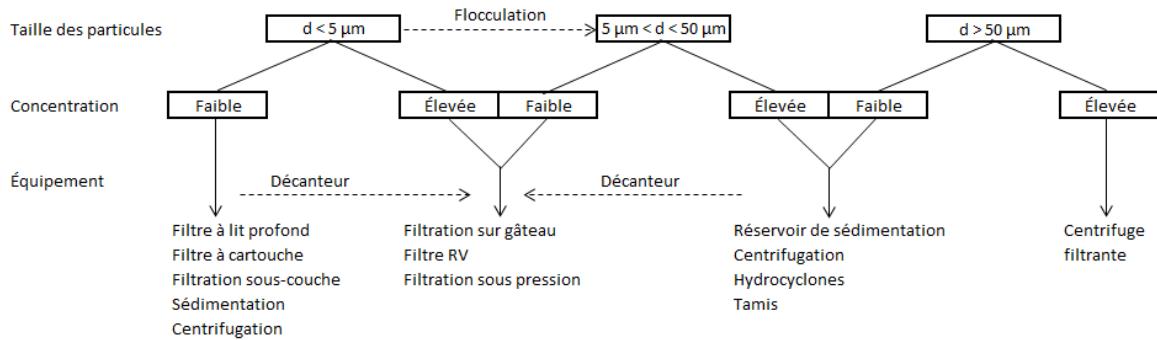


Figure 2.1 : Guide de sélection de la technologie de séparation solide-liquide selon la taille des particules

La forme des particules solides d'un fluide particulaire est rarement sphérique. Il faut donc appliquer un facteur de sphéricité (Ψ) à la particule. Le Tableau 2.1 présente les façons usuelles d'associer un diamètre à une particule. Ces diamètres sont égaux pour une particule sphérique mais diffèrent dans les autres cas. Le choix du diamètre à utiliser dépend de la technique de séparation solide-liquide envisagée. Par exemple, pour la décantation, le diamètre de Stokes est le plus approprié et peut être déterminé par sédimentation libre. Dans le cas d'une filtration, le diamètre surface volume est le plus utile et peut être déterminé par perméamétrie.

La distribution de la taille des particules solides peut se faire par nombre, par surface, par masse ou par volume. Pour les techniques de séparation solide-liquide de décantation et

de filtration, la distribution par quantité est la plus appropriée. Elle permet de connaître le nombre de particules comprises au voisinage d'une dimension donnée.

Tableau 2.1 : Liste de la définition des diamètres équivalents à une sphère

Symbol	Nom	Propriété équivalente à une sphère
d_v	Diamètre volumique	Volume $\rightarrow d = (6V/\pi)^{1/3}$
d_s	Diamètre surfacique	Surface $\rightarrow d = (V/\pi)^{1/2}$
d_{sv}	Diamètre surface volume	Ratio surface volume $\rightarrow d = 6V/S$
d_d	Diamètre de traîné	Résistance au mouvement dans le même fluide à la même vitesse
d_f	Diamètre de sédimentation libre	Vitesse de sédimentation libre dans le même fluide, même densité de particules
d_{st}	Diamètre de Stokes	Vitesse de sédimentation libre, loi de Stokes ($Re < 0,2$)
d_A	Diamètre de tamis	Passage au travers de la même ouverture de tamis

2.2.2. Densité des particules

La densité intrinsèque des particules en kg/m^3 est déterminée par densimétrie. Contrairement à la densité en vrac, qui inclut le vide présent entre les particules, la densité intrinsèque fait référence seulement à la densité réelle des particules.

2.2.3. Propriétés de surface des particules

Les propriétés de surface des particules influencent la séparation solide-liquide en fonction des interactions qu'elles ont les unes avec les autres et de leur affinité avec le liquide environnant. Certaines particules chargées électriquement peuvent s'attirer, formant ainsi de plus gros agglomérats. Les forces d'attractions, telles que les forces de London et

de van der Waals, peuvent permettre à deux petites particules de s'agglomérer pour en former une plus grosse, ce qui favorisera la séparation solide-liquide dans le cas de la décantation (Figure 2.2). L'affinité des particules peut même être augmentée en diminuant les forces de répulsion entre les particules par l'ajout d'un produit chimique. Ce mécanisme se nomme la coagulation et est discuté plus en détail dans la section 2.3.3.1.

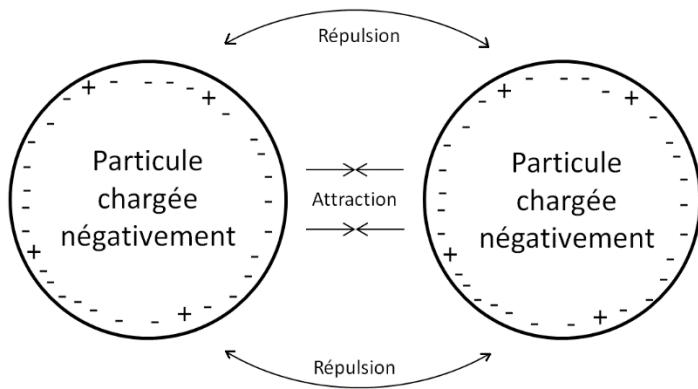


Figure 2.2 : Schéma de l'interaction entre deux particules sphériques chargées électriquement

L'affinité des particules pour le liquide hôte permet de classer la dispersion comme étant lyophilique ou lyophobique. Les colloïdes lyophobiques démontrent une faible affinité envers le liquide hôte, tandis que les colloïdes lyophiliques démontrent le contraire [22]. Cette caractéristique influence grandement la séparation solide-liquide.

2.2.4. Caractérisation de la boue rouge

Les particules solides de la boue rouge sont principalement composées des oxydes et hydroxydes de silice, d'aluminium, de fer, de calcium et de titane. Les impuretés de fer lui donnent une couleur rouge brique [1]. La composition chimique de la boue rouge est plutôt

complexe et dépend toujours de la source de bauxite. La taille moyenne des particules qui composent la boue rouge varie entre 1 et 10 microns et leur densité intrinsèque est de 3200 kg/m³ [3].

En se référant à la Figure 2.1, le choix de la technique pour épaissir une suspension telle que la boue rouge dépend de sa fraction solide initiale. Pour une boue rouge à faible concentration en particules solides, la technique de décantation est efficace. C'est d'ailleurs la technologie qui est utilisée pour épaissir la boue rouge floculée dans le procédé Bayer. Cependant, pour atteindre de très hautes fractions solides, la technique de filtration sous pression doit être envisagée.

2.3.Décantation

La décantation est le procédé de séparation solide-liquide qui effectue la séparation des particules présentent en suspension en utilisant la force de gravité. Ce procédé est le plus fréquemment utilisé pour séparer les matières en suspension (sous forme de floc après une étape de coagulation/flocculation). Cependant, cette technique ne permet généralement pas d'obtenir un sédiment très concentré.

Selon Svarovsky [22], les facteurs les plus importants pour la sédimentation des particules solides dans un liquide de viscosité relativement faible sont :

1. La nature des particules : granulométrie, forme, gravité spécifique, les propriétés minéralogiques et chimiques, etc.
2. La concentration du solide par rapport au liquide (fraction solide)
3. Le type de prétraitement : conditionnement chimique, floculation, chauffage-refroidissement, température, etc.
4. Le type de récipient de sédimentation : dimensions, forme, effets de parois, etc.

2.3.1. La nature des particules

Le Tableau 2.2 démontre que la taille des particules influence grandement le temps de sédimentation. Pour les très petites particules (<1 micron), le temps de sédimentation est si lent que la séparation solide-liquide de ce type de fluide particulaire par la sédimentation n'est pas envisageable.

Tableau 2.2 : Effet de la taille des particules sur le temps de décantation en sédimentation libre[23]

Diamètre des particules, mm	Ordre de grandeur	Aire surfacique totale ¹	Temps nécessaire pour décanter ²
10	Gravier	3,14 cm ²	0,3 s
1	Sable grossier	31,4 cm ²	3 s
0,1	Sable fin	314 cm ²	38 s
0,01	Limon	0,314 m ²	33 min
0,001	Bactérie	3,14 m ²	55 h
0,0001	Particules colloïdales	31,4 m ²	230 j
0,00001	Particules colloïdales	2832,8 m ²	6,3 ans
0,000001	Particules colloïdales	28328 m ²	63 ans minimum

¹ Surface produite à partir d'une particule de 10 mm de diamètre avec une gravité spécifique de 2,65

² Calculs basés sur une sphère avec une gravité spécifique de 2,65 à sédimenter sur 1 pied

La densité des particules joue également un rôle important dans l'efficacité de la sédimentation. La force gravitationnelle nette permettant de faire sédimenter les particules (F_g) est donné3 par la différence de densité entre le solide (ρ_s) et le liquide hôte (ρ_l) (Équation 2.1).

$$F_g = (\rho_s - \rho_l)gV_p \quad (2.1)$$

où g est l'accélération gravitationnelle et V_p le volume de la particule.

La forme de la particule intervient pour sa part dans le calcul de force de traînée de la particule (F_d) (équation 2.2). Elle influence la valeur du coefficient de trainé (C_d), qui fait intervenir le nombre adimensionnel de Reynolds (Re) selon l'équation 2.3 applicable dans les régimes d'écoulement turbulent (l'équation peut être tronquée à $C_d = 24/Re$ dans les régimes d'écoulement laminaire).

$$F_d = \frac{C_d A \rho_l v^2}{2} \quad (2.2)$$

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad (2.3)$$

$$Re = \frac{\rho_s v d_{eq}}{\mu} \quad (2.4)$$

où A est la surface de référence, v est la vitesse de la particule par rapport au fluide, d_{eq} est le diamètre équivalent de la particule, soit le diamètre de la sphère de volume équivalent à la particule de forme irrégulière, et μ est la viscosité dynamique du liquide.

En égalant l'équation 2.1 et 2.2, il est possible d'isoler la vitesse terminale de la particule (v_t) en sédimentation libre. Les propriétés des particules interviennent directement dans ces équations, dictant ainsi la performance de la méthode de séparation solide-liquide par décantation.

$$v_t = \left[\frac{4}{3} \frac{(\rho_s - \rho_l)gd}{C_d \rho_l} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

2.3.2. Les effets de concentration

L'effet de la concentration sur la vitesse de sédimentation peut être représenté à l'aide de la courbe de Kynch (Figure 2.3). Dans la partie B – C, la vitesse est constante. La deuxième partie, C – D, correspond à la densification du lit de boue et D – E représente la zone de compression. Le point A ne survient que dans le cas où la solution est très diluée. Selon l'hypothèse de Kynch, la vitesse de sédimentation d'une particule dans le test du cylindre ne dépend que de la concentration locale en particules. Plus la concentration augmente, c'est-à-dire plus la hauteur de décantation diminue, plus la vitesse de sédimentation diminue.

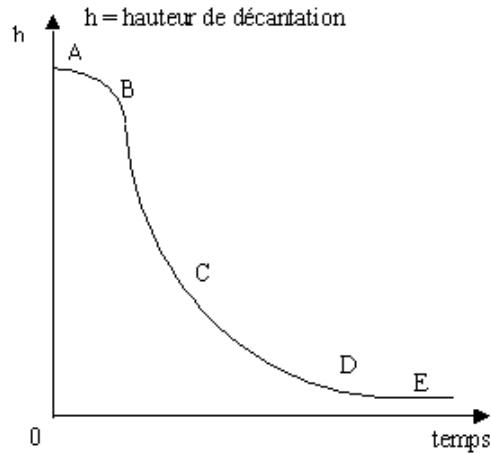


Figure 2.3 : Évolution de la hauteur de décantation en fonction du temps dans un test du cylindre

2.3.3. Les prétraitements

Il a été démontré que la température a un effet sur la sédimentation [24]. Cependant, la coagulation et la flocculation sont les deux principaux prétraitements utilisés pour la décantation.

2.3.3.1. La coagulation

La coagulation consiste à neutraliser les charges électriques des particules par l'addition d'un produit chimique pour réduire les forces de répulsion qui les séparent. Ainsi, lors de collisions entre les particules, elles auront tendance à rester liées les unes aux autres.

2.3.3.2. La floculation

La floculation permet d'agglomérer les particules en unités plus grandes pour leurs permettre de sédimenter plus rapidement. L'agglomération entre les particules provient de l'ajout de polymères qui permet de créer des ponts entre les particules (Figure 2.4).

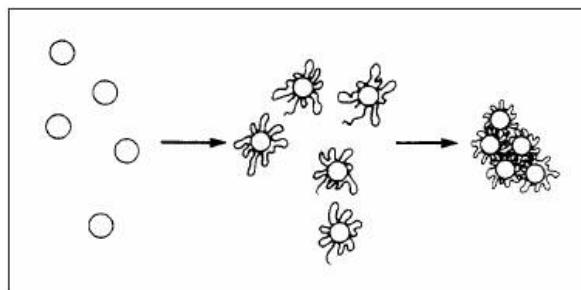


Figure 2.4 : Floculation des particules par l'ajout de polymères

2.3.4. La forme des décanteurs

Le design des décanteurs est particulièrement important pour optimiser la séparation solide-liquide par décantation. En règle générale, le ratio entre le diamètre du décanteur et celui des particules doit être supérieur à 100, pour que les effets de paroi soient considérés comme négligeables [25]. La hauteur du décanteur doit être suffisante pour permettre d'atteindre la concentration maximale du lit de boue au fond du décanteur. La Figure 2.5 montre le schéma d'un décanteur typique.

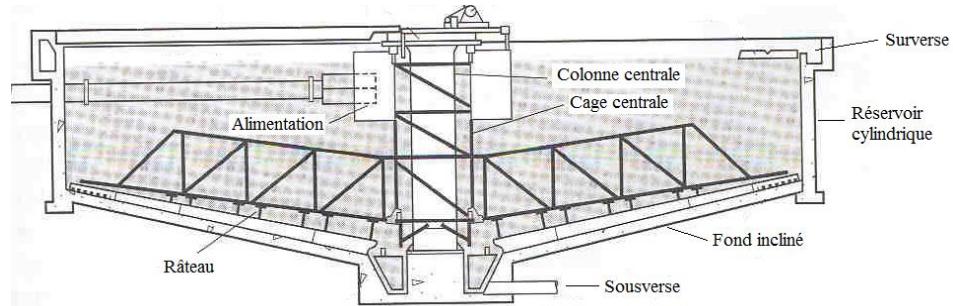


Figure 2.5 : Schéma simplifié d'un décanteur typique

2.4.Centrifugation

La centrifugation est le procédé de séparation solide-liquide qui permet d'augmenter les forces de masse des particules pour ainsi étendre la sédimentation aux particules plus petites qui ne sédimentent pas rapidement avec la seule force de gravité. La force centrifuge peut être appliquée par deux types d'équipements : soit les dispositifs à paroi fixe (hydrocyclones), soit les dispositifs à paroi-mobile (centrifuges).

2.4.1.1. Les hydrocyclones

Les hydrocyclones (Figure 2.6) ne possèdent aucune pièce rotative. La rotation est induite par l'alimentation du fluide particulaire tangentiellement à la paroi du cylindre. Ainsi, les particules ayant une densité supérieure au fluide se retrouveront concentrées près de la paroi pour être extraites en sousverse. Le fluide clarifié suit une trajectoire ascendante pour être extrait en surverse. Cette technique est utilisée pour sa fiabilité et son faible coût.

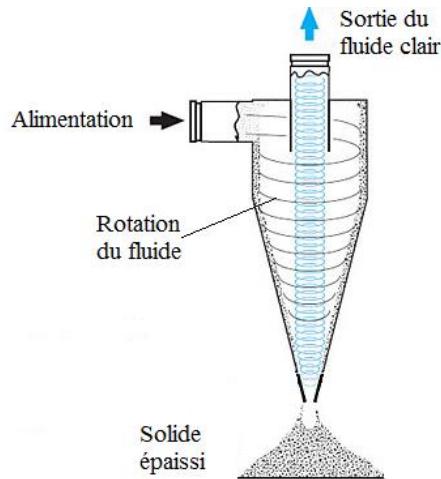


Figure 2.6 : Schéma simplifié d'un hydrocyclone

2.4.1.2. Les centrifugeuses

Les centrifugeuses sont des dispositifs rotatifs qui, grâce à l'accélération centrifuge, augmentent le poids apparent des particules pour améliorer la séparation solide-liquide. La force relative centrifuge (FRC) appliquée sur la particule dépend de la vitesse angulaire (ω) et du rayon de rotation (r), tel que décrit par l'équation 2.6. Cette méthode est plutôt utilisée en fournée et à petite échelle. Cette technique appliquée à grande échelle nécessite des équipements complexes et très onéreux.

$$FRC = \frac{r\omega^2}{g} \quad (2.6)$$

2.5.Filtration

La filtration effectue la séparation solide-liquide en faisant passer le liquide hôte au travers d'un milieu poreux. Le milieu retient les particules tandis que le liquide passe au travers. Ce liquide, une fois extrait, porte le nom de filtrat.

2.5.1. Méthode de filtration

Pour établir un écoulement au travers du milieu filtrant, une différence de charge doit être appliquée. La filtration porte différents noms selon la source de pression : gravitationnelle, sous vide, sous pression et centrifuge.

2.5.1.1. Filtration gravitationnelle

La filtration gravitationnelle utilise la force de gravité pour pousser le liquide à travers le milieu filtrant. Cette technique appliquée aux fluides particulaires contenant une grande charge en particules nécessite un temps de traitement très long. Pour cette raison, la filtration sous vide est généralement plus utilisée puisqu'elle permet une filtration plus rapide.

2.5.1.2. Filtration sous vide

La filtration sous vide utilise une pression négative pour aspirer le liquide au travers du filtre. La filtration sous vide est très utilisée dans l'industrie, autant en fournée qu'en continue. Des exemples de filtration sous vide sont les filtres Nutsche, qui sont une

extension de la filtration sur Buchner, les filtres à feuilles sous vide, les filtres à basculement sous vide, les filtres rotatifs à panneaux sous vide, les filtres horizontaux à courroie sous vide, les filtres à disques rotatifs sous vide et les plus utilisés dans l'industrie, les filtres à tambour rotatif sous vide. La faiblesse de cette technique provient de la limitation de la force motrice (limitée à <85 kPa [26]) qui conduit à de faibles taux de filtration et une grande humidité résiduelle dans le solide séparé.

2.5.1.3. Filtration sous pression

La filtration sous pression, contrairement à la filtration sous vide, utilise une pression positive pour forcer le passage du liquide au travers du medium filtrant. Cette technique de filtration peut être pratiquée en fournée ou en continue. Quelques exemples d'équipements de filtration sous pression incluent les filtres-presses à plaques et cadres, les filtres à cartouche et les filtres-presses par compression mécanique. Les équipements de filtration en continu sont beaucoup plus pratiques dans l'industrie puisqu'ils limitent les manipulations et augmentent la capacité de traitement. La liste de ces équipements inclue les filtres à disques, les filtres à tambour, les filtres-presses à courroie horizontale, les filtres à compression continue et les filtres-presses à vis. Les deux principaux avantages de la filtration sous pression sont : le taux de filtration élevé et la faible humidité résiduelle dans le solide séparé.

2.5.1.4. Filtration centrifuge

La filtration centrifuge utilise la force centrifuge pour pousser le liquide au travers du milieu filtrant. Contrairement à la centrifugation, qui fait intervenir la différence de densité entre le liquide et le solide, la filtration centrifuge utilise une enceinte circulaire filtrante en rotation à de très hautes vitesses. Cette rotation permet d'augmenter le poids apparent de la suspension et ainsi de faire passer le fluide au travers du filtre. Cette technique est plutôt utilisée à très petite échelle en biotechnologie.

2.5.2. Types de filtration

En pratique, il existe deux types de filtration : la filtration sur gâteau (Figure 2.7 a)), où les particules solides sont déposées sur la surface du filtre pour former un gâteau et la filtration à lit profond (Figure 2.7 b)), où la déposition des particules s'effectue à l'intérieur du milieu poreux.

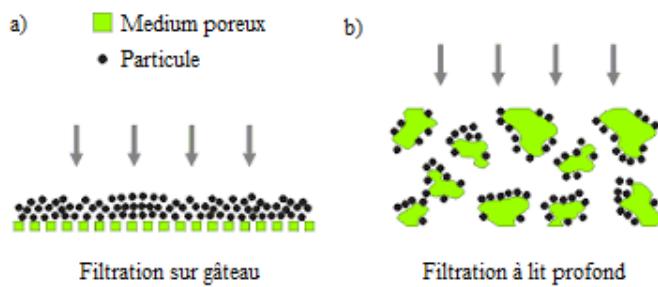


Figure 2.7 : Représentation des types de filtration : a) filtration sur gâteau et b) filtration à lit profond

2.5.2.1. Filtration sur gâteau

La filtration sur gâteau est largement utilisée dans l'industrie minière. La filtration sur gâteau utilise un milieu filtrant qui possède des pores plus petits que les particules solides. Ainsi, les particules s'accumulent en surface du filtre pour former un gâteau à haute concentration en particules solides. Initialement, les pertes de charge dans le filtre sont plutôt faibles. Par contre, une fois que le gâteau est formé en surface du filtre, celui-ci possède une perte de charge supérieure au milieu filtrant. À ce stade, le filtre ne sert que de support.

Le gâteau créé en surface peut être soit compressible ou incompressible. Dans le cas des gâteaux incompressibles, l'arrangement des particules en surface sera toujours sensiblement le même, peu importe la pression appliquée. Pour les gâteaux compressibles, l'arrangement des particules sur le gâteau dépend de la pression appliquée (voir section 3.5.2). Selon la pression appliquée pendant la filtration, le gâteau sera plus ou moins dense et possèdera une perméabilité variable.

2.5.2.2. Filtration à lit profond

Dans la filtration à lit profond, les particules solides sont captées à l'intérieur du milieu poreux. Les pores du filtre sont donc supérieurs aux particules solides et le milieu filtrant est généralement plus épais. Ce type de filtration permet de traiter seulement les fluides avec de très faibles concentrations en particules solides. Les pertes de charge varient

avec la durée de filtration puisque les pores du filtre se remplissent de particules solides. Le filtre s'obstrue avec le temps et doit être nettoyé ou remplacé.

3

Rhéologie et propriétés des fluides particulaires

3.1. Introduction

La rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement d'un milieu sous l'effet d'une contrainte. Les concepts importants de la rhéologie, tels que la contrainte de cisaillement, la vitesse de déformation et la viscosité, permettent de caractériser l'écoulement du milieu à l'étude. Cet écoulement peut être Newtonien ou non-Newtonien. Dans le cas des fluides particulaires, tels que les résidus miniers, leur écoulement est majoritairement non-Newtonien. Puisque les propriétés des fluides particulaires dépendent directement de leur concentration en particules solides, un système de classification a été proposé. De plus, le concept de compressibilité est utilisé pour introduire les propriétés de point de gel et de limite d'élasticité en compression.

3.2. Importants concepts rhéologiques

3.2.1. Contrainte de cisaillement et vitesse de déformation

Pour définir la contrainte de cisaillement, considérons l'expérimentation hypothétique d'un fluide entre deux plaques parallèles (Figure 3.1). La plaque inférieure est fixe tandis que la plaque supérieure est mobile.

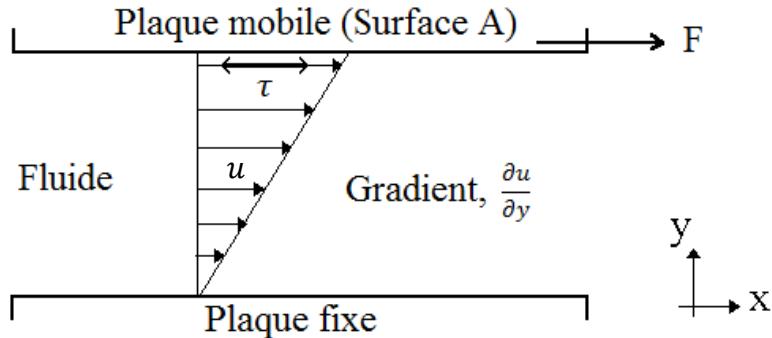


Figure 3.1 : Écoulement d'un fluide entre deux plaques parallèles

La contrainte de cisaillement (τ) est donc définie comme étant le rapport entre la force appliquée (F) à la plaque mobile de surface (A) par unité de surface :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

La plaque supérieure en mouvement à la vitesse u cause l'écoulement du fluide avec un gradient de vitesse ($\partial u / \partial y$) relié à la vitesse de déformation ($\dot{\gamma}$) du fluide, qui se définit comme étant la vitesse à laquelle le fluide se déforme, de telle sorte que:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.2)$$

Ainsi, l'écoulement d'un fluide entre deux plaques parallèles implique que la contrainte de cisaillement cause la vitesse de déformation de sorte que dans le cas le plus simple :

$$\tau \propto \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

3.2.2. Viscosité dynamique

La constante de proportionnalité qui relie la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation est la viscosité dynamique (μ).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.4)$$

La viscosité est une propriété intrinsèque du fluide. Les fluides dont la viscosité est constante sont appelés fluides Newtoniens. Ceux dont la viscosité varie sont appelés fluides non-Newtoniens.

3.2.3. Technique de caractérisation

Le viscosimètre est l'outil de base permettant de caractériser les propriétés d'écoulement d'un fluide. La méthode traditionnelle consiste à faire tourner un cylindre plein à l'intérieur d'un cylindre creux rempli du fluide à caractériser. Cependant, lorsque des fluides non-Newtoniens sont caractérisés, cette méthode induit trop de glissement en surface des cylindres. Pour résoudre ce problème, la méthode à palettes de cisaillement est très utilisée [27]. Cette méthode utilise quatre palettes rectangulaires attachées à angle droit sur une mince tige cylindrique centrale rotative (Figure 3.2) au lieu du cylindre plein. En plus d'éliminer le glissement, elle permet de réduire au minimum la perturbation de l'échantillon à l'étude.

Lors d'une mesure, le moment de couple et la vitesse de rotation sont enregistrés pour tracer la courbe de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation, qui se nomme rhéogramme. Ainsi, la viscosité du matériel à l'étude peut être déterminée.

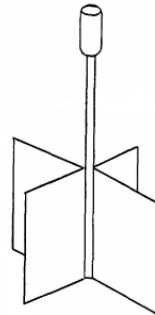


Figure 3.2 : Rotateur à palettes

3.3. Comportements et modèles d'écoulement

3.3.1. Comportement indépendant du temps

Le comportement rhéologique des suspensions particulières est considéré indépendant du temps lorsque ses propriétés de cisaillement sont reproductibles et ne dépendent pas de l'historique des contraintes [4]. Lorsque le fluide ne présente pas de seuil de cisaillement, il peut être caractérisé comme étant Newtonien, pseudoplastique (rhéofluidifiant) ou dilatant (rhéoépaississant) en observant l'allure de son rhéogramme (Figure 3.3). Les fluides Newtoniens offrent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation puisque la viscosité est constante. Dans le cas des fluides pseudoplastiques, la viscosité diminue avec l'augmentation de la vitesse de déformation et pour les fluides dilatants, la viscosité augmente avec l'augmentation de la vitesse de déformation.

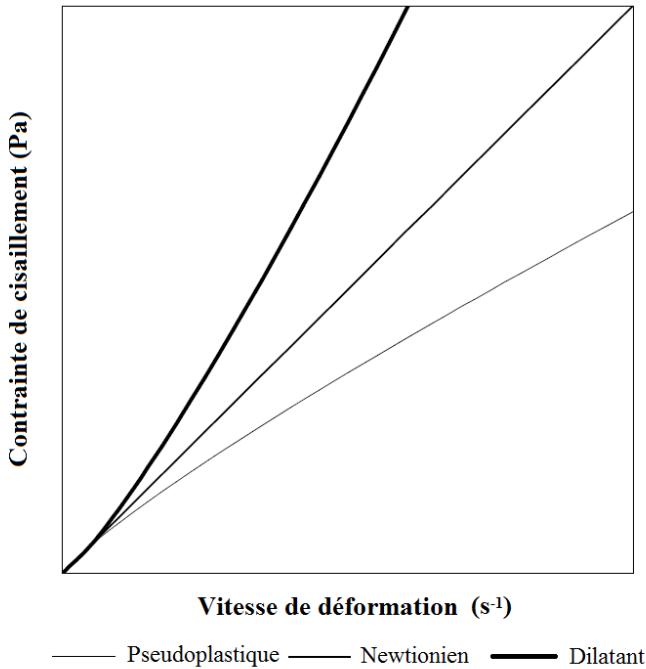


Figure 3.3 : Rhéogramme des fluides pseudoplastiques, Newtoniens et dilatants

En règle générale, les boues minérales concentrées possèdent un certain seuil de cisaillement (τ_y). Pour une contrainte inférieure au seuil de cisaillement, le réseau de particule se déforme élastiquement et revient à son état initial une fois la contrainte retirée. Ce seuil de cisaillement modifie les courbes d'un rhéogramme en leur ajoutant une ordonnée à l'origine non nulle (Figure 3.4). L'ampleur du seuil de cisaillement dépend de la force d'interaction entre les particules d'un fluide particulaire. Les trois types de fluides comportant un seuil de cisaillement sont les fluides de Bingham, où la contrainte de cisaillement versus la vitesse de déformation présente un comportement linéaire, les fluides pseudoplastiques avec retard, où la viscosité diminue avec l'augmentation de la vitesse de déformation et les fluides dilatants avec retard, où la viscosité augmente avec l'augmentation de la vitesse de déformation.

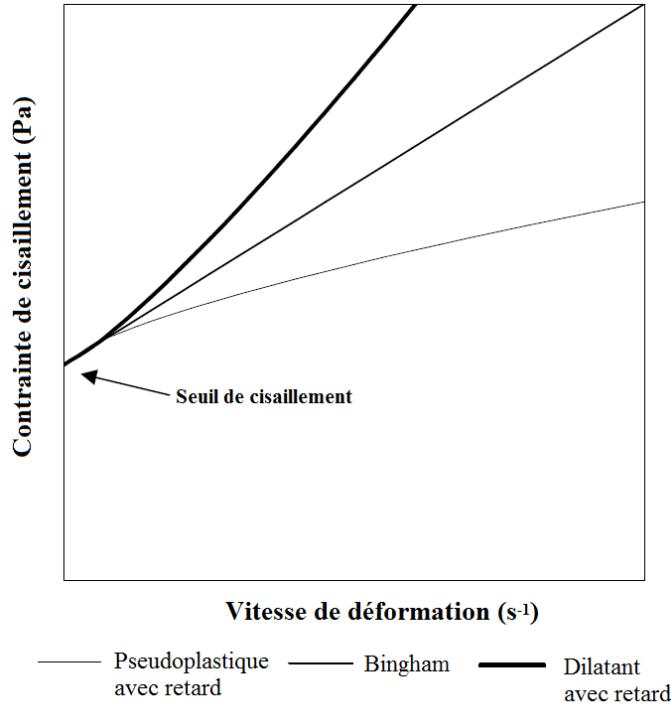


Figure 3.4 : Rhéogramme des fluides pseudoplastiques avec retard, Bingham et dilatant avec retard

Pour ces différentes catégories de fluide, différents modèles d'écoulements empiriques existent pour décrire leur comportement. Outre l'équation de base (Équation 3.4) qui permet de décrire le comportement des fluides Newtoniens, le modèle d'Ostwald-De Waele est utilisé pour les fluides pseudoplastiques et dilatants, le modèle de Bingham pour les fluides de Bingham et le modèle Herschel-Bulkley pour les fluides pseudoplastiques avec retard et dilatants avec retard.

Modèle d'Ostwald-De Waele

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (3.5)$$

Modèle de Bingham

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad (3.6)$$

Modèle d'Herschel Bulkley

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n \quad (3.7)$$

Dans ces équations, les constantes K et n sont déterminées expérimentalement.

La boue rouge concentrée possède un comportement de type pseudoplastique avec retard [3]. Ce comportement est attribué à l'alignement des particules et/ou flocs dans la direction de la contrainte, résultant en une diminution de la résistance à l'écoulement [28]. La viscosité de la boue rouge diminue donc avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. Dans certain cas, tel que celui de la boue rouge, le modèle d'Herschel-Bulkley ne décrit pas correctement son comportement. Un modèle communément adopté pour ces exceptions est celui de Casson [29]. Cette équation relie la contrainte de cisaillement à la vitesse de déformation en faisant intervenir un paramètre empirique de viscosité, notamment appelé viscosité plastique (μ_∞).

$$\tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + (\mu_\infty \dot{\gamma})^{1/2} \quad (3.8)$$

3.3.2. Comportement dépendant du temps

Les fluides non-Newtoniens les plus complexes présentent un comportement dépendant du temps. Ce comportement est associé à un changement structural qui survient durant et après l'application d'une contrainte. La contrainte de cisaillement de ces fluides est une fonction de la vitesse de déformation mais aussi du temps. Les deux extrêmes de ce comportement sont la rhéopexie et la thixotropie.

3.3.2.1. Thixotropie

La thixotropie est associée aux fluides rhéofluidifiants. Ce comportement indique que la contrainte de cisaillement diminue avec le temps jusqu'à atteindre une certaine valeur d'équilibre (Figure 3.5). Ainsi, la viscosité de ces fluides a tendance à décroître dans le temps lorsqu'une vitesse de cisaillement constante lui est appliquée.

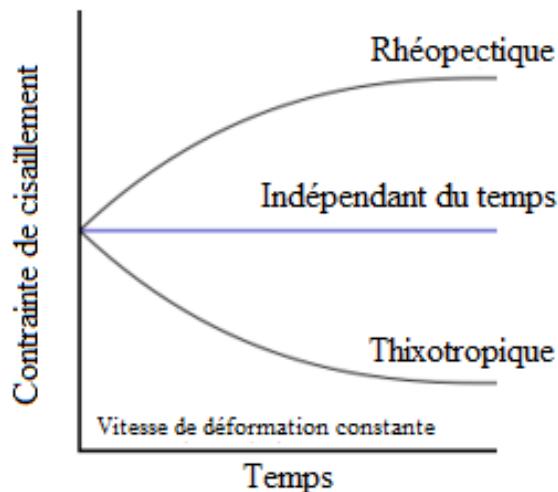


Figure 3.5 : Représentation de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les fluides rhéoplectique et thixotropique

Puisque la contrainte de cisaillement dépend du temps, le rhéogramme présente une hystérèse, telle que présentée à la Figure 3.6. En augmentant la vitesse de déformation, les flocs de la suspension sont brisés ce qui diminue la contrainte de cisaillement pour une même vitesse de déformation lors d'un passage subséquent.

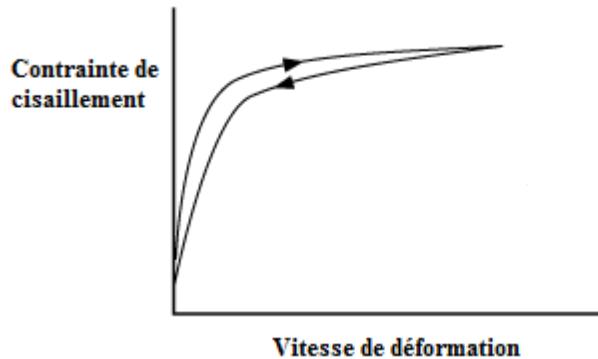


Figure 3.6 : Rhéogramme d'un rhéofluidifiant avec un comportement thixotropique présentant une hystérèse

La boue rouge possède un comportement thixotropique [30]. Il est donc très difficile de mesurer précisément sa viscosité à tout moment dans un procédé. Le meilleur moyen de déterminer la viscosité de la boue rouge et de tous les fluides pseudoplastiques avec retard thixotrope reste de la mesurer au moment voulu.

3.3.2.2. Rhéopexie

La rhéopexie est le comportement inverse de la thixotropie, fréquemment référencé comme comportement anti-thixotrope. Les fluides rhéopectiques se caractérisent par l'augmentation de la contrainte de cisaillement avec le temps (Figure 3.5). Dans la plupart des cas, les fluides rhéopectiques retournent à leur valeur initiale de viscosité au repos,

après l'application de la contrainte [31]. Ce comportement est beaucoup plus rare que celui de la thixotropie et affecte plus particulièrement les fluides dilatants. Le rhéogramme des fluides rhéopectiques présente également une hystérèse, mais contrairement à la thixotropie, elle est dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

3.4. Classification de l'épaisseissement des suspensions

Le comportement d'un fluide particulaire dépend directement de sa concentration. Un système de classification permet de classer les résidus miniers en suspension selon leur concentration en particules solides [28]. La Figure 3.7 permet de représenter l'évolution de la force du réseau avec l'augmentation de la concentration. Les zones de transition d'état sont clairement indiquées sur cette figure. Le fluide particulaire étudié est classé comme une suspension (slurry) tant que la force n'augmente pas sensiblement avec l'augmentation de la concentration. À partir d'une concentration donnée propre au fluide particulaire à l'étude, la force augmente exponentiellement. Dans cette gamme de concentration, le fluide est classé comme une pâte (paste). Par la suite, en augmentant la concentration, la courbe tend vers une asymptote. Dans cette zone, le fluide est classé comme un gâteau (cake).

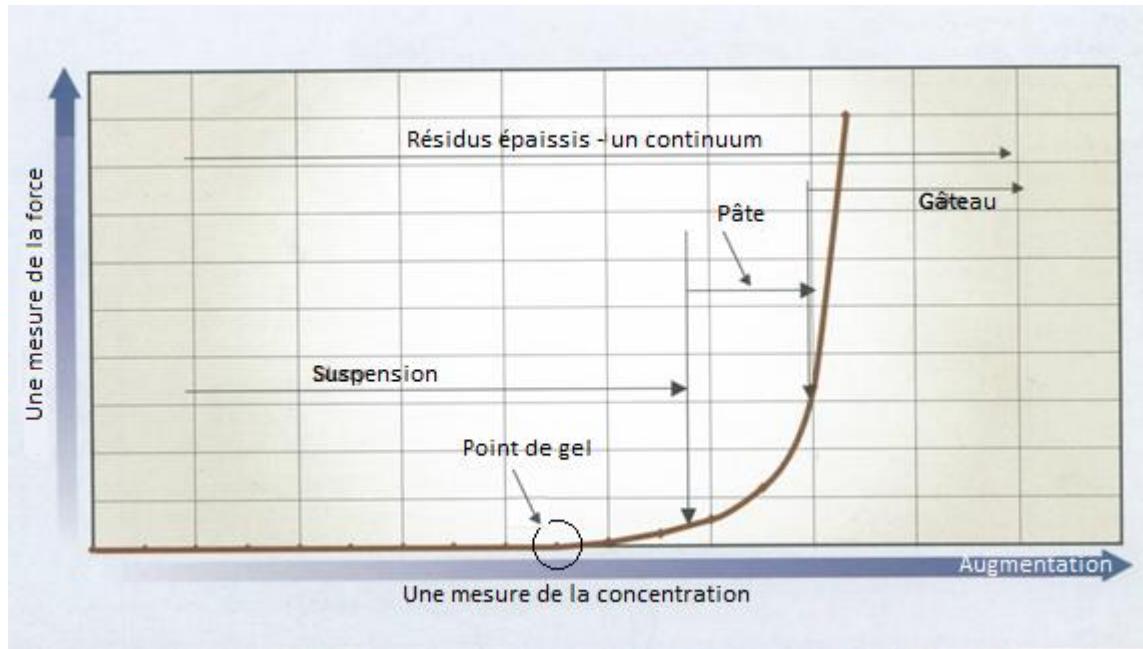


Figure 3.7 : Classification de la consistance des résidus de boue [28]

Plusieurs facteurs peuvent influencer le comportement des boues, tels que la granulométrie, la minéralogie et la chimie de surface. Les limites entre une suspension, une pâte et un gâteau sont définies par la force du réseau. Lorsque la boue est à l'état d'une suspension, son comportement est similaire à celui d'un liquide (fluide Newtonien) et prendra la forme du contenant dans lequel il est contenu. L'interaction entre les particules est faible puisque la présence dominante du liquide dictera le comportement du fluide particulaire. Cependant, lorsque la boue est à l'état d'une pâte, l'interaction entre les particules augmente et le matériel conservera sa forme jusqu'à ce qu'une contrainte vienne la perturber. Cette propriété est typique des fluides non-Newtonien avec un seuil de cisaillement tel que décrit dans la section 3.3.1. La gamme de concentration pour une boue à l'état d'une suspension est très grande comparée à celle d'une pâte et d'un gâteau. C'est

pourquoi les suspensions sont subdivisées en plusieurs catégories de densité : faible, moyenne, haute et parfois même très haute. Le terme pâte peut parfois être appliqué pour les suspensions à très haute densité en fonction de ses caractéristiques d'écoulement et de sa viscosité. Lorsque la concentration est suffisamment élevée pour que la boue soit classée comme un gâteau, son comportement devient similaire à celui d'un solide. Cette transition entre une pâte et un gâteau délimite environ la concentration maximale pour laquelle une boue peut être transportée par une pompe à déplacement positif. D'autres techniques de transport doivent donc être utilisées lorsque la boue est un gâteau.

3.5.Compressibilité

La compressibilité est la mesure de la variation du volume d'un corps (solide, liquide ou gaz) sous l'influence de la pression. En mécanique des fluides, la compressibilité (β) se calcule par la relation suivante :

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \quad (9)$$

où V est le volume et P la pression.

Une suspension est constituée de particules solides qui emprisonnent à l'intérieur du réseau qu'elles forment une certaine quantité de fluide (Figure 3.8). Pour comprimer le réseau, une force (force de gravité et pression) qui entraîne la percolation du fluide doit être appliquée. Malgré que la plupart des suspensions soient incompressibles, le réseau de

particules solides est lui-même compressible et peut être comprimé par la séparation solide-liquide.

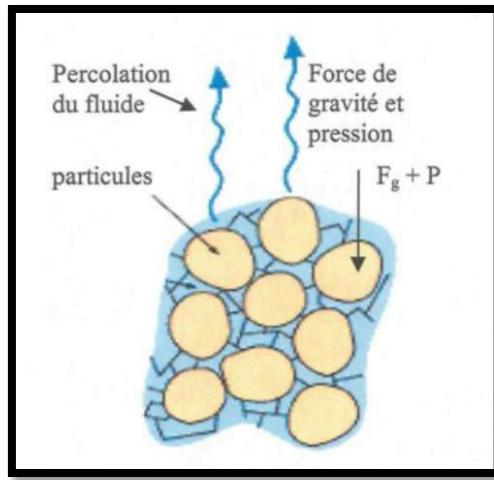


Figure 3.8 : Percolation du fluide au travers des particules solides [3]

3.5.1. Point de gel

Le point de gel (φ_g) d'une suspension correspond à la plus petite fraction solide où le réseau se supporte par lui-même [4]. En dessous du point de gel, les particules solides sédimentent librement faisant percoler le fluide vers le haut. Pour augmenter la fraction solide au-dessus du point de gel, une force de compaction doit être appliquée sur le réseau. Le point de gel se trouve donc à être la fraction solide maximale dont la limite d'élasticité en compression est nulle. Elle délimite la zone de transition entre les phénomènes de sédimentation et de compaction.

L'estimation du point de gel s'effectue expérimentalement par un test de décantation en cylindre. Le fluide particulaire est placé dans un cylindre gradué et laissé au repos

pendant une longue période pour permettre la décantation libre des particules solides. Ainsi, le point de gel peut être approximé par l'équation suivante :

$$\varphi_g = \frac{\varphi_0 h_0}{h} \quad (3.10)$$

où φ_0 est la fraction solide volumique initiale de l'échantillon, h_0 la hauteur initiale du lit de boue et h la hauteur finale du lit de boue.

Il est cependant difficile d'avoir des valeurs précises du point de gel par cette méthode puisque la lecture de la hauteur exacte finale du lit de boue est parfois difficile. La fraction solide correspondant au point de gel dans un essai de sédimentation en cylindre est située à l'interface entre le lit de boue et le surnageant puisque les particules et/ou flocs qui se trouvent sous l'interface subissent une force de compression due au poids du matériel au-dessus. La fraction solide augmente avec la profondeur du lit de boue (Figure 3.9).

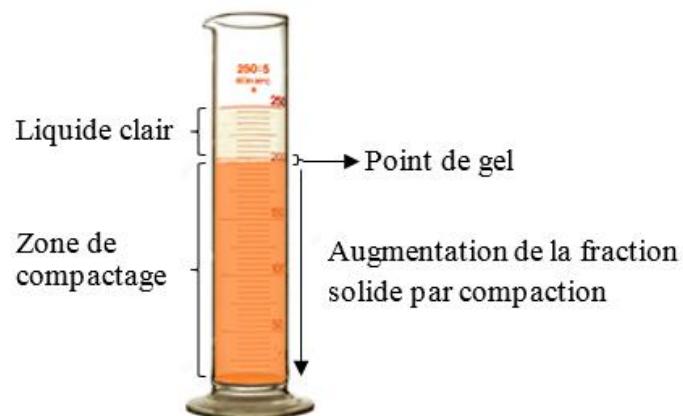


Figure 3.9 : Essai de sédimentation en cylindre gradué pour déterminer la fraction solide du point de gel

3.5.2. Limite d'élasticité en compression

Lorsque la fraction solide est au-dessus du point de gel ($\varphi > \varphi_g$), le réseau de particules solides possède une force de cohésion mesurable qui dépend de la fraction solide locale. Cette force du réseau correspond à la limite d'élasticité en compression ($P_y(\varphi)$) : soit la plus faible pression qui permet au réseau de céder et de se comprimer irréversiblement à une fraction solide supérieure. Donc pour toutes les fractions solides au-delà du point de gel, le réseau de particules solides demeure dans sa forme originale jusqu'à ce qu'une force externe, (ΔP), excède la limite d'élasticité en compression de cette fraction solide. Cette force brise ainsi la structure du réseau, forçant la compaction et augmentant la fraction solide.

Selon Howells [32], la limite d'élasticité en compression d'une boue rouge floculée peut être déterminée par l'équation empirique suivante :

$$P_y(\varphi) = K \left[\left(\frac{\varphi}{\varphi_g} \right)^n - 1 \right] \quad (3.11)$$

où les constantes K et n sont des paramètres déterminés expérimentalement.

Les valeurs de limite d'élasticité en compression obtenues par l'équation 3.11 sont généralement applicables pour de faibles fractions solides. Pour déterminer la limite d'élasticité en compression de fractions solides élevées, la méthode de filtration à pression étagée est utilisée. La méthodologie de cette méthode est expliquée dans la section 5.2.1.2.

4**Filtration sous pression****4.1.Introduction**

La filtration sous pression est très utilisée dans l'industrie pour effectuer la séparation solide-liquide dans le but de former un gâteau à haute concentration. Les travaux de Shirato [6-12] présentent des modèles mathématiques de filtration sur gâteau basés sur la loi de Darcy. Lee [13] inclus ces modèles dans ses travaux afin de développer des outils pour la filtration et la consolidation. Les modèles mathématiques de filtration pour des gâteaux compressibles et incompressibles sont développés par Civan [14, 15] pour des filtrations linéaire et radiale. Le présent chapitre présente en détail les différents modèles pour la filtration sur gâteau sous pression des résidus miniers.

4.2.Relation débit-perte de charge**4.2.1. Loi de Darcy**

Lors des premiers instants de filtration sur gâteau d'un fluide particulaire, la totalité de la perte de charge s'effectue au travers de la membrane puisqu'il n'y a pas encore de gâteau de formé. Durant ce temps, la loi de base de l'écoulement en milieu poreux de Darcy

s'applique. Cette loi relie le débit Q d'un fluide de viscosité μ avec les pertes de charge ΔP au travers d'un filtre d'épaisseur L et de surface A :

$$Q = \frac{kA\Delta P}{\mu L} \quad (4.1)$$

où k est la perméabilité de Darcy du milieu poreux.

4.2.2. Loi de Darcy modifiée

Si un fluide propre sans particules était filtré, tous les paramètres de l'équation 4.1 seraient constants, et donc le volume cumulatif de filtrat en fonction du temps augmenterait linéairement avec une pente égale à $(kA\Delta P/\mu L)$.

Lors de la filtration sur gâteau en fournée d'un fluide particulaire, un gâteau se forme progressivement sur le filtre, ce qui augmente les pertes de charge (Figure 4.1) diminuant le débit de la filtration avec le temps.

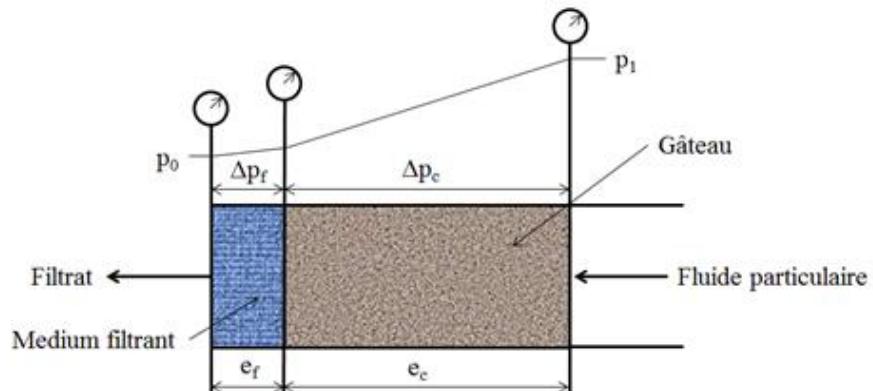


Figure 4.1 : Représentation des pertes de charge lors de la filtration sur gâteau sous pression

Lorsqu'il y a formation d'un gâteau sur le filtre, la loi de Darcy doit être modifiée :

$$Q = \frac{A\Delta P}{\mu(R_c + R_f)} \quad (4.2)$$

où R_c et R_f sont les résistances du gâteau et du filtre respectivement définies par :

$$R = \frac{e}{k} \quad (4.3)$$

où e et k sont l'épaisseur et la perméabilité du milieu perméable.

En pratique, la pénétration des particules à l'intérieur du filtre, aussi faible qu'elle puisse être, est inévitable et vient augmenter la résistance du filtre R_f . De plus, la résistance peut parfois dépendre de la pression de filtration due à la compression des fibres.

4.3. Équations de base – Gâteau incompressible

Dans le cas des gâteaux incompressibles, la résistance du gâteau est directement proportionnelle à la masse de solide sec déposée par unité de surface (w) :

$$R_c = \alpha_m w \quad (4.4)$$

où α_m est la résistance spécifique massique du gâteau.

La masse de solide sec du gâteau (m_s) est reliée à la surface filtrante (A) selon la relation suivante :

$$m_s = wA \quad (4.5)$$

La masse de solide sec du gâteau peut être reliée au volume de filtrat en faisant un bilan de masse. Tout d'abord, il faut définir la fraction solide massique (x) dans chacune des phases. Pour le fluide particulaire à filtrer, la fraction solide massique est définie comme étant :

$$x_0 = \frac{\text{masse de solide}}{\text{masse du fluide particulaire}} \quad (4.6)$$

La fraction solide massique du gâteau est pour sa part définie comme étant :

$$x_c = \frac{\text{masse de gâteau sec}}{\text{masse de gâteau humide}} \quad (4.7)$$

Le bilan de masse du liquide peut être écrit en tenant compte de x_0 et x_c :

$$\frac{\text{masse de liquide dans le fluide particulaire}}{\text{masse de solide}} = \frac{\text{masse de liquide dans le gâteau}}{\text{masse de solide}} + \frac{\text{masse de filtrat}}{\text{masse de solide}}$$

C'est-à-dire :

$$\frac{1 - x_0}{x_0} = \left(\frac{1}{x_c} - 1 \right) + \frac{\rho_l V_f}{wA} \quad (4.8)$$

où ρ_l est la densité du liquide du fluide particulaire et V_f est le volume de filtrat. Dans ce bilan de masse, tout le fluide particulaire a été filtré pour former un gâteau. Après réarrangement et en utilisant l'équation 4.8, l'équation 4.5 devient :

$$m_s = wA = \left(\frac{\rho_l x_0}{1 - \frac{x_0}{x_c}} \right) V_f = cV_f \quad (4.9)$$

où

$$c = \left(\frac{\rho_l x_0}{1 - \frac{x_0}{x_c}} \right) \quad (4.10)$$

est la concentration solide du gâteau exprimée en termes de masse de solide du gâteau par unité de volume de filtrat correspondant.

En substituant R_c de l'équation 4.4 dans 4.2 et en utilisant l'équation 4.9, l'équation de base d'une filtration sur gâteau sous pression devient :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(\alpha_m cV + R_f)} \quad (4.11)$$

Dans l'équation 4.11, le débit Q a été modifié en faisant apparaître un nouveau terme V qui est le volume spécifique de filtrat, soit le volume de filtrat par unité de surface. Les unités de dV/dt correspondent à une vitesse (m/s) que l'on appelle également vélocité d'approche.

4.3.1. Filtration à pression constante

Pour une filtration à pression constante, l'équation 4.11 peut s'intégrer comme suit :

$$\int_0^t dt = \frac{\mu\alpha_m c}{\Delta P} \int_0^V V dV + \frac{\mu R_f}{\Delta P} \int_0^V dV \quad (4.12)$$

pour obtenir

$$t = \frac{\mu\alpha_m c}{2\Delta P} V^2 + \frac{\mu R_f}{\Delta P} V \quad (4.13)$$

Lorsque le volume spécifique n'est pas nul, cette équation peut être réarrangée pour obtenir une droite avec (t/V) en ordonnée et V en abscisse :

$$\left(\frac{t}{V}\right) = aV + b \quad (4.14)$$

où $a = \frac{\mu\alpha_m c}{2\Delta P}$ et $b = \frac{\mu R_f}{P}$

En pratique, la pression varie au début de la filtration et l'équation 4.12 n'est valable que pour les cas où l'établissement de la pression est instantané. Pour les autres cas, les bornes inférieures d'intégration de cette équation doivent être remplacées par les valeurs de début de filtration à pression constante, soit t_0 et V_0 . Le résultat de l'intégration devient donc :

$$t - t_0 = \frac{\mu \alpha_m c}{2 \Delta P} (V^2 - V_0^2) + \frac{\mu R_f}{\Delta P} (V - V_0) \quad (4.15)$$

Dans le cas où la pression est appliquée progressivement, le débit initial doit être modéré pour éviter l'infiltration de particules au travers du médium filtrant propre. Cette infiltration de particules contamine le filtrat. Un débit initial modéré permet également d'assurer une distribution uniforme du gâteau sur le filtre.

4.3.2. Filtration à débit constant

Pour une filtration à débit constant et à pression variable, l'équation 4.11 devient :

$$Q = \frac{A \Delta P(t)}{\mu(\alpha_m c V(t) + R_f)} \quad (4.16)$$

où

$$V = \frac{Q}{A} t \quad (4.17)$$

Ainsi, en isolant la pression dans l'équation 4.16, on obtient :

$$\Delta P = \alpha_m \mu c \frac{Q^2}{A^2} t + \mu R_f \frac{Q}{A} \quad (4.18)$$

où le premier terme représente la perte de charge au travers du gâteau et le deuxième terme représente la perte de charge au travers du filtre. L'équation 4.18 permet d'obtenir une

droite avec P en ordonnée et t en abscisse. La pente de cette droite est égale à $\alpha_m \mu c v^2$ et l'ordonnée à l'origine est égale à $R_f Q/A$, où la variable v est la vitesse d'approche :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4.19)$$

4.4. Équations de base – Gâteau compressible

Plusieurs gâteaux de filtration sont compressibles. L'augmentation de la pression engendre une diminution de la porosité et augmente la résistance du gâteau. Pour ces systèmes, une relation empirique reliant la résistance spécifique α aux pertes de charge au travers du gâteau ΔP_c est souvent utilisée :

$$\alpha = \alpha_0 (\Delta P_c)^n \quad (4.20)$$

où α_0 correspond à la résistance spécifique à pression unitaire et n correspond à l'indice de compressibilité (nulle lorsque le gâteau est incompressible).

En utilisant l'équation 4.20, la résistance spécifique moyenne du gâteau se définit comme étant :

$$\alpha_{moy} = \frac{\alpha_0 (\Delta P_c)^n}{n + 1} \quad (4.21)$$

Dans les problèmes où le gâteau est compressible, la perte de charge au travers du gâteau (ΔP_c) et du médium (ΔP_m) doivent être traitées séparément de sorte que :

$$P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (4.22)$$

où

$$\Delta P_m = \frac{\mu R_f Q}{A} \quad (4.23)$$

et

$$\Delta P_c = \frac{\alpha_{m,moy} \mu c V_f Q}{A} \quad (4.24)$$

En substituant l'équation 4.21 dans l'équation 4.24, l'équation de la perte de charge dans le gâteau devient :

$$\Delta P_c = \frac{\alpha_{m,0} (\Delta P_c)^n \mu c V Q}{n+1} \quad (4.25)$$

L'équation 4.25 simplifiée devient :

$$\frac{\mu c V Q}{A} = \frac{(n+1)(\Delta P_c)^{1-n}}{\alpha_{m,0}} \quad (4.26)$$

4.4.1. Filtration à pression constante

Les équations de filtration à pression constante présentées à la section 4.3.1 sont aussi applicables dans le cas d'un gâteau compressible puisqu'il existe une seule résistance par pression.

4.4.2. Filtration à débit constant

Lors d'une filtration à débit constant, le caractère compressible du gâteau modifie l'équation des pertes de charge en fonction du temps. L'équation de la perte de charge au travers du gâteau en fonction du temps devient :

$$(\Delta P_c) = \left[\frac{\alpha_{m,0} \mu c}{n+1} \frac{Q^2}{A^2} t \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (4.27)$$

La perte de charge au travers du médium demeure pour sa part inchangée et répond à l'équation 4.23.

4.5. Modèle de filtration radiale

Les équations présentées dans les sections précédentes sont valables lorsque la surface de filtration est constante. Cependant, dans le cas d'une filtration où le gâteau se forme à l'intérieur ou à l'extérieur d'une surface cylindrique, l'aire de filtration varie avec

l'épaisseur du gâteau. Les équations doivent être adaptées pour tenir compte de la variation de cette surface filtrante.

Un bilan volumique permet de déterminer la variation de la surface filtrante selon le volume de filtrat extrait. Ce bilan relie directement le volume de gâteau au volume de filtrat :

$$V_c = \frac{V_f}{\left(\frac{\varphi_c}{\varphi_0} - 1\right)} \quad (4.28)$$

Dans un système de filtration radiale où le gâteau se forme sur la paroi interne d'un filtre cylindrique, le volume de gâteau créé est donné par :

$$V_c = h_f \pi [r_0^2 - (r_0 - e_c)^2] \quad (4.29)$$

où h_f est la hauteur du filtre cylindrique, r_0 est le rayon interne du filtre cylindrique et e_c est l'épaisseur du gâteau.

L'aire de filtration est également reliée à l'épaisseur du gâteau selon la relation suivante :

$$A = 2\pi h_f (r_0 - e_c) \quad (4.30)$$

En isolant $(r_0 - e_c)$ dans l'équation 4.29 et en utilisant l'équation 4.28, on obtient l'équation qui relie la surface filtrante avec le volume de filtrat extrait :

$$A = 2\pi h_f \sqrt{r_0^2 - \frac{V_f}{\pi h_f \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_0} - 1\right)}} \quad (4.31)$$

En insérant l'équation 4.31 dans l'équation 4.11, on obtient l'équation différentielle pour un système de filtration radiale lorsque le gâteau se forme sur la paroi interne d'un filtre cylindrique d'aire filtrante initiale A_0 :

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{(2\pi h_f)^2 \left(r_0^2 - \frac{V_f}{\pi h_f \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_0} - 1\right)} \right) \frac{\Delta P}{\mu}}{(\alpha_m c V_f + A_0 R_f)} \quad (4.32)$$

Selon Civan [14, 15], lorsque l'épaisseur du gâteau est faible relativement au rayon de la surface du filtre exposée à la suspension, les modèles de filtration linéaire peuvent être utilisés.

4.5.1. Filtration à pression constante

Le modèle de filtration radiale à pression constante lorsque le gâteau se forme sur la paroi interne du filtre cylindrique s'obtient par l'intégration de l'équation 4.32 :

$$\int_{t_0}^t dt = \int_{V_{f,0}}^{V_f} \frac{C_1 V_f + C_2}{r_0^2 - C_3 V_f} dV_f \quad (4.33)$$

$$\text{où} \quad C_1 = \frac{\alpha_m c \mu}{P(2\pi h_f)^2} \quad C_2 = \frac{A_0 r_f e_f \mu}{P(2\pi h_f)^2} \quad \text{et} \quad C_3 = \frac{1}{\pi h_f \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_0} - 1 \right)}$$

Après intégration et simplification, on obtient :

$$t - t_0 = \frac{C_1}{C_3} (V_{f,0} - V_f) + \left(\frac{C_2}{C_3} + \frac{r_0^2 C_1}{C_3^2} \right) \ln \left(\frac{C_3 V_{f,0} - r_0^2}{C_3 V_f - r_0^2} \right) \quad (4.34)$$

5

Montages et protocoles expérimentaux

5.1.Montages expérimentaux

5.1.1. Filtre à membrane

Le montage expérimental de filtration linéaire à membrane est constitué d'un piston amovible, entouré d'un joint d'étanchéité, qui est actionné par une presse hydraulique, d'une chambre cylindrique de 8,89 cm de diamètre et d'une membrane filtrante soutenue par un grillage métallique.

Le grillage métallique est nécessaire pour maintenir la planéité du filtre à membrane lors des essais de filtration à haute pression. De plus, le type de grillage a été choisi de manière à ce que la résistance induite par sa présence lors de la filtration soit négligeable.

5.1.2. Filtres à plaques

Les différents filtres à plaques des montages expérimentaux sont constitués d'un empilement parallèle de plaques métalliques. Ces filtres à plaques métalliques permettent l'écoulement du liquide au travers des porosités induites par la rugosité de surface des

plaques métalliques tout en retenant les particules solides. Deux configurations de filtre sont étudiées dans le présent travail, soit linéaire et radiale.

5.1.2.1. Filtration linéaire

Le montage expérimental de filtration linéaire utilise la presse hydraulique MTS-810. Ce montage est présenté en vue explosée à la Figure 5.1. Il est muni d'un support incliné pour l'écoulement du filtrat, d'une chambre cylindrique de 10,16 cm de diamètre qui est scellé par un joint d'étanchéité quadrique sur le filtre. Chaque plaque du filtre est compressée par un bloc de serrage tiré par deux tiges filetées avec boulons.

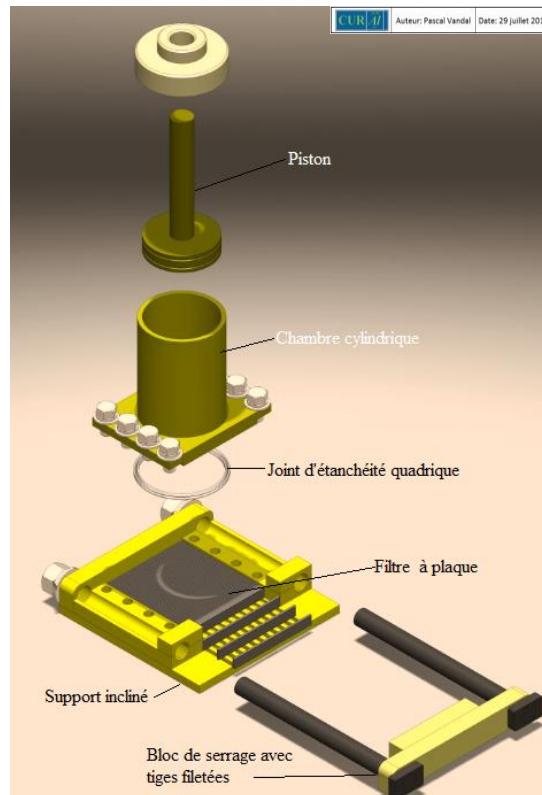


Figure 5.1 : Montage expérimental de filtration linéaire; vue explosée

Le joint d'étanchéité « Quadring » (Figure 5.2) est primordial afin d'éliminer les fuites lors de la filtration. Ce type de joint d'étanchéité permet de résister à des pressions supérieures à 100 atmosphères.



Figure 5.2 : Joint d'étanchéité « Quadring »

5.1.2.2. Filtration radiale

Le montage expérimental de filtration radiale est présenté en vue explosée à la Figure 5.3. Il est constitué de disques de filtration métalliques compressés sous des beignes de serrage par quatre tiges filetées avec boulons, d'un filet hélicoïdal, d'un piston amovible entouré d'un joint d'étanchéité qui est actionné par une presse hydraulique et d'un guide pour assurer une descente rectiligne du piston.

Le filet hélicoïdal permet de répliquer la configuration géométrique d'un système de presse à vis. Ce filet n'est pas motorisé et sert à répliquer le déplacement hélicoïdal du liquide lors de filtration dans une presse à vis. L'utilisation de ce filet est facultative.

Pour ce type de montage, la forme des disques de filtration est présentée à la Figure 5.4. Le trou central du disque forme la chambre cylindrique tandis que les quatre trous externes forment les conduits pour les tiges filetées qui permettent la compression des disques via les beignes de serrage.

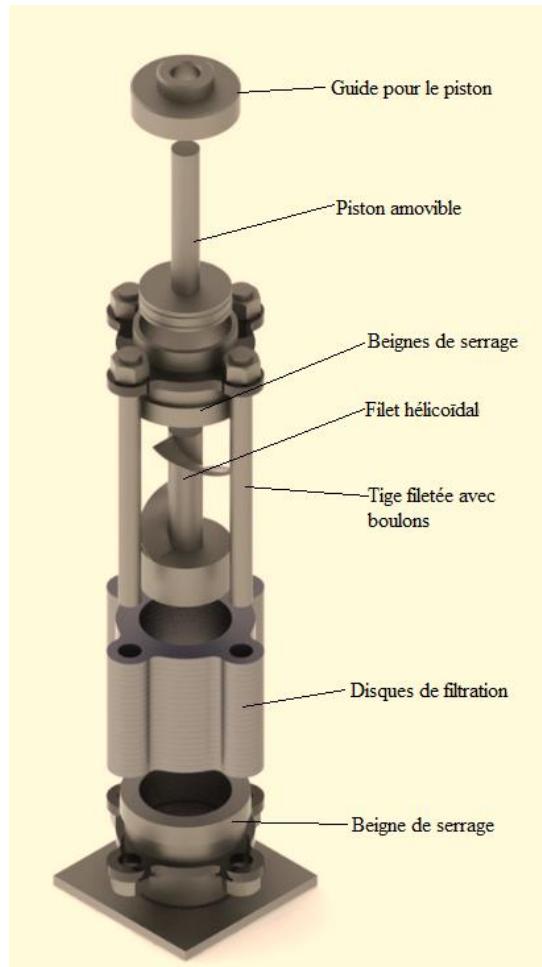


Figure 5.3 : Montage expérimental de filtration radiale; vue explosée

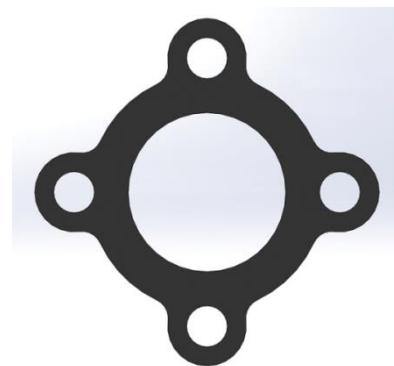


Figure 5.4 : Disque métallique composant le filtre du montage expérimental de filtration radiale

Les beignes de serrage permettent de distribuer uniformément la pression de serrage sur toute la surface des disques. Sans ces beignes, la force de compression serait surtout concentrée autour des trous de tige sur les disques laissant les intervalles entre les trous faiblement compressés. Ces beignes sont essentiels pour assurer une distribution uniforme de la pression sur l'ensemble des disques et éviter les fuites de particules solides lors de la filtration sous pression.

5.2.Protocoles expérimentaux de filtration

5.2.1. Filtration sur presse hydraulique

La presse hydraulique MTS-810 présentée à la Figure 5.5 est utilisée pour abaisser le piston amovible des montages expérimentaux permettant d'augmenter la pression dans l'enceinte contenant la suspension. La presse hydraulique est reliée à un ordinateur qui enregistre la position du piston, la force appliquée et le temps lors des essais expérimentaux. L'ordinateur permet de programmer les paramètres des essais de filtration. Deux modes peuvent être utilisés, soit à débit constant ou à pression constante. Lors des essais de filtration à débit constant, l'ordinateur est programmé de manière à ce que la vitesse du piston soit constante, la pression croît alors pendant la filtration. Pour les essais de filtration à pression constante, l'ordinateur est plutôt programmé pour appliquer une force constante, la vitesse du piston décroît alors pendant la filtration.

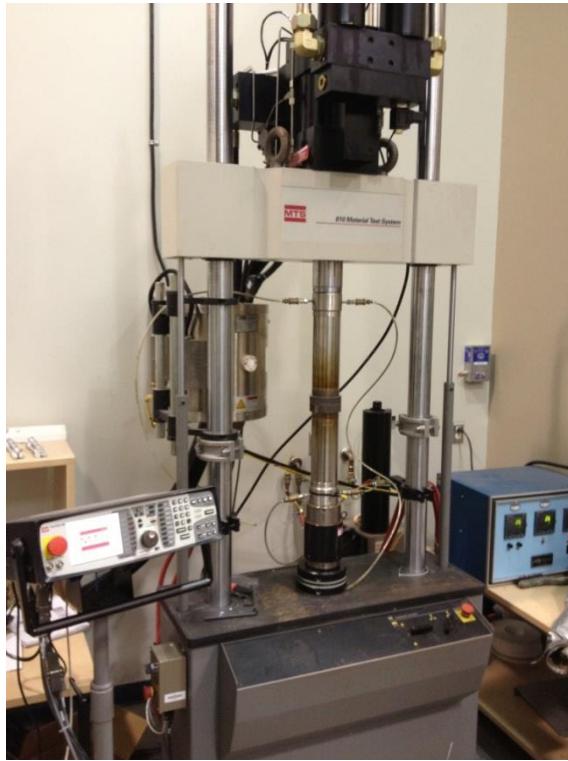


Figure 5.5 : Presse hydraulique MTS-810

5.2.1.1. Filtration à pression constante

La méthode de filtration à pression consiste à appliquer une seule pression constante sur la suspension à filtrer pendant toute la durée de l'essai jusqu'à ce que le déplacement du piston cesse. Le protocole expérimental de cette méthode est décrit ci-dessous :

- (1) Remplir la chambre cylindrique avec de la suspension à filtrer.
- (2) Insérer le piston amovible dans la chambre cylindrique jusqu'au niveau de la suspension en s'assurant que l'évent sur le piston est ouvert pour évacuer tout l'air présent dans la chambre.
- (3) S'assurer que le piston est bien aligné et fermer l'évent.

- (4) Placer le montage sur la table de la presse hydraulique et positionner le piston de la presse au niveau du piston du montage de filtration pour déterminer la position initiale, « zéro », de l'essai.
- (5) Entrer la pression de filtration requise dans le programme de la presse hydraulique.
- (6) Démarrer l'essai et maintenir la pression dans le système jusqu'à ce que le déplacement du piston cesse.
- (7) Une fois le déplacement terminé, relâcher la pression et remonter le piston de la presse hydraulique à sa position initiale.

5.2.1.2. Filtration à pression constante étagée

La méthode de filtration à pressions étagées consiste à appliquer une série successive de pressions croissantes sur la suspension. Cette méthode est très similaire à celle à pression constante. Elle permet cependant de filtrer et compacter la suspension sur une grande plage de pressions plus rapidement.

- (1) Effectuer les étapes (1) à (4) de la méthode à pression constante.
- (2) Entrer la valeur de chaque plateau de pression et leur durée dans le programme de la presse hydraulique. (exemple : 50 kPa pour 10 min, 100 kPa pour 10 min, 500 kPa pour 30 minutes, etc.)
- (3) Démarrer l'essai jusqu'à ce que le déplacement du piston cesse au terme du dernier plateau de pression programmé.

- (4) Une fois le déplacement terminé, relâcher la pression et remonter le piston de la presse hydraulique à sa position initiale.

5.2.1.3. Filtration à débit constant

La procédure expérimentale de filtration à débit constant consiste à appliquer la pression requise pour obtenir un débit constant de filtrat au travers du filtre. Le protocole expérimental de filtration à débit constant est décrit ci-dessous :

- (1) Remplir la chambre cylindrique avec de la suspension ou le liquide à filtrer.
- (2) Insérer le piston amovible dans la chambre cylindrique jusqu'au niveau de la suspension en s'assurant que l'évent sur le piston est ouvert pour évacuer tout l'air présent dans la chambre.
- (3) S'assurer que le piston est bien aligné et fermer l'évent.
- (4) Placer le montage sur la table de la presse hydraulique et positionner le piston de la presse au niveau du piston du montage de filtration pour déterminer la position initiale, « zéro », de l'essai.
- (5) Programmer la descente du piston sur l'ordinateur de la presse hydraulique de manière à avoir un débit de filtration constant (ex. : 1 ml/min/cm² de surface filtrante).
- (6) S'assurer que la course totale du piston soit inférieure à la hauteur de liquide/suspension à filtrer.
- (7) Démarrer l'essai.

- (8) Une fois l'essai terminé, remonter le piston de la presse hydraulique à sa position initiale.

5.2.2. Filtration avec pompe à déplacement positif

Les essais expérimentaux de filtration avec une pompe à déplacement positif servent principalement à déterminer la perméabilité des filtres des montages expérimentaux en faisant circuler un débit constant de liquide à travers ceux-ci. Contrairement aux essais sur la presse hydraulique, les essais expérimentaux peuvent être effectués en continu lorsque le liquide ne comporte pas de particules solides. Le montage expérimental est présenté à la Figure 5.6.

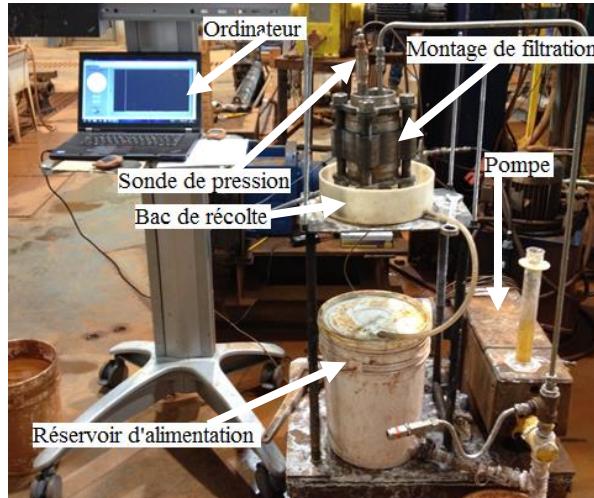


Figure 5.6 : Montage expérimental de filtration avec pompe à déplacement positif

Les essais expérimentaux s'effectuent toujours à débit constant et la pression de filtration est mesurée par une sonde de pression et enregistrée sur ordinateur. Le montage expérimental de filtration radiale est modifié pour ces essais. Le piston amovible est

remplacé par un disque plein avec deux ouvertures permettant d'alimenter le montage en liquide et la sonde de pression.

Le protocole expérimental est décrit ci-dessous :

- (1) Placer le montage de filtration radiale modifié dans le bac de récolte du filtrat.
- (2) Remplir le montage de filtration de liquide.
- (3) Insérer la sonde de pression reliée à l'ordinateur et l'alimentation en liquide sur la plaque pleine.
- (4) Démarrer l'enregistrement des données de pression sur l'ordinateur.
- (5) Démarrer la pompe.
- (6) Attendre que la pression dans le montage se stabilise et mesurer le débit de filtrat à l'aide d'un cylindre gradué et d'un chronomètre.
- (7) Mesurer plusieurs fois le débit de filtrat pour s'assurer qu'il est constant.
- (8) Changer le débit de la pompe et répéter les étapes (6) et (7).
- (9) À la fin, arrêter la pompe.
- (10) Attendre que la pression interne soit revenue à zéro et cesser la prise de données.

5.3.Méthodes de caractérisation

5.3.1. Gravimétrie

Pour déterminer la fraction solide massique d'un échantillon, une balance chauffante est utilisée. La balance chauffante permet de déterminer la fraction solide massique en

effectuant le rapport entre le poids initial de l'échantillon humide et le poids sec final. L'échantillon est placé à l'intérieur de la balance préalablement tarée. Le poids initial est enregistré (poids humide) et l'étape de chauffage débute. Une température de 200°C est maintenue jusqu'à stabilisation de la masse. Cette température permet l'évaporation du liquide présent dans l'échantillon. Le poids final sec est enregistré et l'appareil affiche le pourcentage de solide présent dans l'échantillon initial.

Pour convertir la fraction solide volumique en fraction solide massique, l'équation 5.1 est utilisée :

$$x = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_s}\right)\left(\frac{1}{\varphi} - 1\right)} \quad (5.1)$$

Dans le cas où la fraction solide massique doit être convertie en fraction solide volumique, c'est plutôt l'équation 5.2 qui est utilisée :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_s}{\rho_l}\right)\left(\frac{1}{x} - 1\right)} \quad (5.2)$$

Ce type de balance ne peut être utilisé avec des échantillons contenant des substances volatiles aux températures d'opération. De plus, lorsque le liquide de la suspension contient des solutés non volatiles (m_{sel}), la fraction solide massique fournie par

la balance inclut la masse de ces solutés. Dans ce cas, la fraction massique de soluté dans le liquide, A, est requise pour corriger la fraction massique de la balance, B :

$$A = \frac{m_{sel}}{m_l} \quad (5.3)$$

$$B = \frac{m_{sol} + m_{sel}}{m_{susp}} \quad (5.4)$$

Ainsi, la fraction solide massique corrigée pour les échantillons avec solides dissous devient :

$$x = \frac{B - A}{1 - A} \quad (5.5)$$

Pour avoir cette fraction sur une base volumique, l'équation 5.6 est utilisée :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_s}{\rho_l}\right) \left(\frac{1 - B}{B - A}\right)} \quad (5.6)$$

5.3.2. Rugosité des plaques de filtration

La perméabilité d'un filtre à plaques métalliques dépend principalement de la rugosité de surface de ces plaques. Tel qu'illustré à la Figure 5.7, la rugosité de la surface de la

configuration est responsable des pores permettant l'écoulement du fluide. Pour que les particules solides soient retenues, la largeur des pores doit être inférieure au diamètre des particules solides, sinon elles pourraient traverser le filtre ou venir se loger dans les interstices et colmater le filtre. La largeur des pores est pour sa part déterminée par la hauteur maximale des pics de rugosité d'une surface puisque ces pics sont ceux qui entrent en contact. Pour augmenter la perméabilité du filtre et diminuer les pertes de charge, il faut augmenter la quantité de pores sans augmenter leurs largeurs.



Figure 5.7 : Représentation de deux plaques rugueuses en contact

Différents paramètres peuvent être utilisés pour caractériser la rugosité d'une surface. Le plus utilisé est celui de la moyenne arithmétique des valeurs absolues, Sa :

$$Sa = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (5.7)$$

où $\pm z_i$ correspond à la hauteur d'un pic ou la profondeur d'une vallée par rapport au plan de référence et n correspond à leur nombre. Un autre paramètre utilisé pour caractériser la rugosité d'une surface est la racine quadratique moyenne Sq :

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (5.8)$$

Dans un profil de rugosité, la hauteur positive du pic le plus haut est représentée par la variable Sp et la profondeur négative de la vallée la plus profonde par Sv . L'espacement maximal du profil St est donc déterminé par :

$$St = Sp - Sv \quad (5.9)$$

Pour mesurer la rugosité de surface d'une plaque, deux instruments sont disponibles. Le premier instrument est un rugosimètre (Figure 5.8 a). Le rugosimètre utilise le contact physique entre une fine pointe et la surface à caractériser (Figure 5.8 b). La pointe balaye la surface et transmet à l'appareil les irrégularités de la surface selon sa position spatiale. Le rugosimètre permet de caractériser seulement les surfaces dont les irrégularités en surface sont plus grosses que les dimensions de la pointe de l'appareil. De plus, ce type d'appareil permet seulement de balayer linéairement la surface. Pour caractériser l'ensemble de celle-ci, il est nécessaire de faire plusieurs balayages à différents endroits de la surface pour avoir une rugosité représentative de la surface à caractériser.

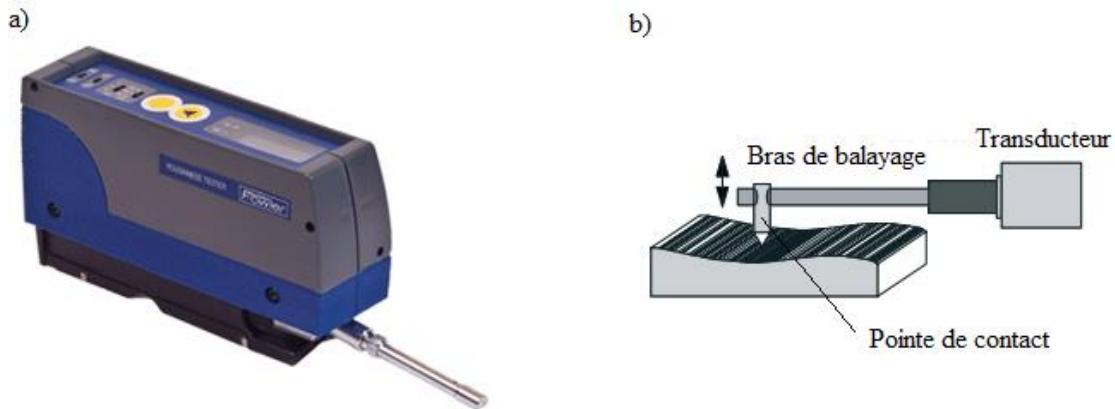


Figure 5.8 : a) Rugosimètre et b) schéma du balayage de la surface par la fine pointe de contact

Le second instrument est le profilomètre optique (Figure 5.9). Cet instrument permet de mesurer la rugosité d'une surface avec une très grande précision en utilisant les propriétés ondulatoires de la lumière pour comparer la différence du chemin optique entre la surface à caractériser et une surface de référence. Une surface complète peut être caractérisée sans qu'il y ait contact avec celle-ci. De plus, la profilométrie optique permet de visualiser une surface en trois dimensions et de caractériser la rugosité d'une surface de l'ordre de grandeur des nanomètres. Elle est cependant restreinte aux matériaux ayant une surface réfléchissante.



Figure 5.9 : Profilomètre optique

5.3.3. Mouillabilité de la surface des plaques

La mouillabilité d'une surface est la mesure quantifiant l'aptitude d'une surface à être mouillée (Figure 5.10). Le degré de mouillabilité est déterminé par un équilibre entre les forces d'adhésion et de cohésion (Tableau 5.1). Ce comportement découle de l'interaction entre les molécules à l'interface des trois milieux en contact, soit le solide, le liquide et le gaz dans le cas présent.

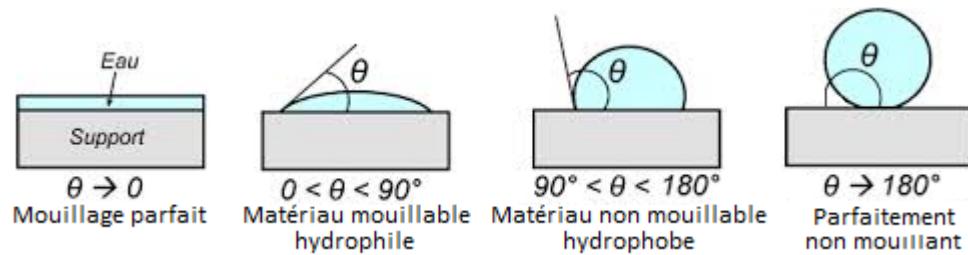


Figure 5.10 : Représentation de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur un support selon son degré de mouillabilité

La mouillabilité de la surface des plaques constituant le filtre métallique influence le déplacement du liquide entre les disques avant d'être expulsé du filtre. Une surface hydrophile est une surface hautement mouillante et en mouillabilité statique, l'angle de contact entre la goutte et la surface sera inférieur à 90°.

Tableau 5.1: Degré de mouillabilité d'une surface selon les forces d'adhésion et de cohésion

Angle de contact	Degré de mouillabilité	Force d'adhésion	Force de cohésion
$\theta = 0^\circ$	Mouillage parfait	Forte	Faible
$0 < \theta < 90^\circ$	Haute mouillabilité	Forte	Forte
		Faible	Faible
$90 \leq \theta < 180^\circ$	Faible mouillabilité	Faible	Forte
$\theta = 180^\circ$	Parfaitement non mouillant	Faible	Forte

Pour caractériser la mouillabilité d'une surface, il suffit de mesurer par analyse d'image, l'angle formé entre une goutte d'eau et la surface du solide (Figure 5.11). Le volume de la goutte est contrôlé par le programme de l'équipement et reste constant pour toutes les surfaces à caractériser. L'angle de contact doit être mesuré au même moment après que la goutte ait touchée la surface puisque celui-ci peut changer avec le temps.

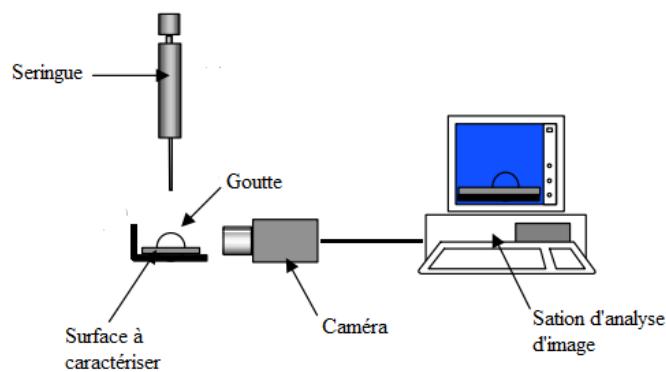


Figure 5.11 : Technique de caractérisation de la mouillabilité d'une surface

5.3.4. Force de compression entre les plaques

Une force de compression doit être appliquée sur les plaques pour que leur empilement offre une barrière aux particules solides et permette de filtrer efficacement les particules. Logiquement, la compression rapproche les plaques les unes des autres et augmente les zones de contact diminuant le vide entre les plaques. Pour des matériaux malléables, la force de compression peut venir déformer les rugosités et ainsi grandement réduire la fraction de vide et diminuer la perméabilité du filtre.

La force de compression entre les disques peut être déterminée expérimentalement à l'aide d'une cellule de charge (Figure 5.12) insérée entre deux plaques compressées pour obtenir la force de compression.



Figure 5.12 : Cellule de charge

La force de compression peut également être déterminée par une simulation sur le logiciel SolidWorks. En dessinant un empilement de plaques, le logiciel effectue le maillage et permet de modéliser la répartition de la force sur l'ensemble des plaques.

6

Résultats et discussion

6.1.Filtration de la boue rouge sur membrane

Les essais expérimentaux de filtration de la boue rouge sur membrane sont effectués avec le montage expérimental décrit à la section 5.1.1 de filtration linéaire avec filtre à membrane sur la presse hydraulique. Les méthodes à pression constante et à pression étagée sont utilisées. La méthode de filtration à pression étagée permet de déterminer la limite d'élasticité en compression de la boue rouge pour différentes fractions solides tandis que la méthode de filtration à pression constante unique permet de déterminer d'autres propriétés, telles que la résistance spécifique du gâteau, le taux de déposition des particules et la limite d'élasticité en compression.

6.1.1. Préparation des échantillons de boue rouge

La suspension de boue rouge utilisée pour les essais est constituée d'une boue floculée remaniée par plusieurs étapes de lavage provenant directement d'une usine de production d'alumine. Afin d'assurer l'homogénéisation de la suspension avant les essais expérimentaux, la boue est mélangée avec une hélice quadripale de 6 cm de diamètre à 450 rpm pendant 5 minutes.

6.1.2. Limite d'élasticité en compression

Les données obtenues lors des essais expérimentaux avec la méthode à pression étagée ont permis de déterminer rapidement la limite d'élasticité en compression de la boue rouge pour différentes fractions solides massiques. Les graphiques montrant l'évolution de la fraction solide massique dans le temps par rapport à la pression appliquée lors des essais avec la méthode à pression étagée sont présentés en annexe. Au terme de chaque plateau de pression, la fraction solide volumique finale de la boue (ϕ_∞) est la limite d'élasticité en compression pour cette pression ($P_y(\phi_\infty)$). Ainsi, chaque pression appliquée lors d'un essai avec la méthode à pression étagée fournit une valeur de limite d'élasticité en compression (ϕ_∞ , $P_y(\phi_\infty)$). La Figure 6.1 schématise le principe de filtration à pression constante permettant de déterminer la limite d'élasticité en compression pour une fraction solide donnée.

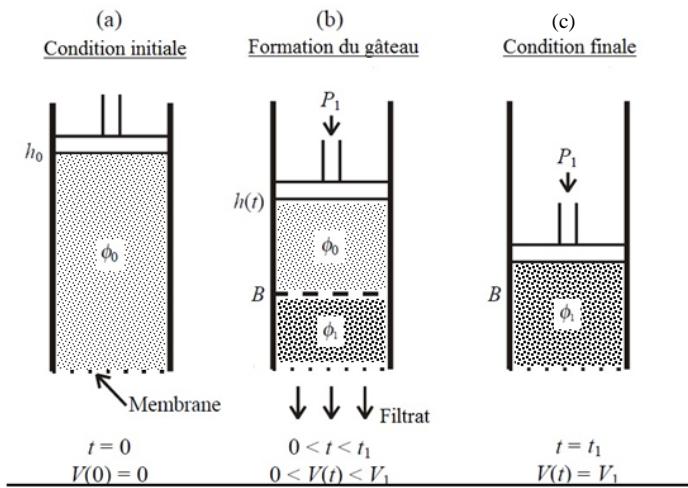


Figure 6.1 : Schéma du principe de filtration à pression constante pour déterminer la limite d'élasticité en compression d'une suspension

Les résultats de limite d'élasticité en compression de la boue rouge en fonction de la fraction solide massique pour chaque essai à pression étagée sont présentés à la Figure 6.2. Cette figure présente les résultats obtenus lors des trois essais de filtration de la boue rouge à l'aide de la méthode à pression étagée « MPÉ » ainsi que les résultats obtenus lors de la filtration avec la méthode à pression constante unique « MPU ». Dans le cas de la méthode MPU, la valeur de chaque fraction solide massique est obtenue à partir d'échantillons du gâteau final dosés au moyen de balances chauffantes et corrigés avec l'équation 5.5. Dans le cas de la méthode MPÉ, ces valeurs ont été calculées à partir des variations du volume de gâteau. Les résultats des deux méthodes sont statistiquement identiques. La méthode à pression étagée est donc une technique efficace et rapide pour déterminer la limite d'élasticité en compression des suspensions. Les manipulations expérimentales supplémentaires requises par le chargement du montage de filtration entre les essais avec la méthode MPU sont éliminées avec la méthode MPÉ.

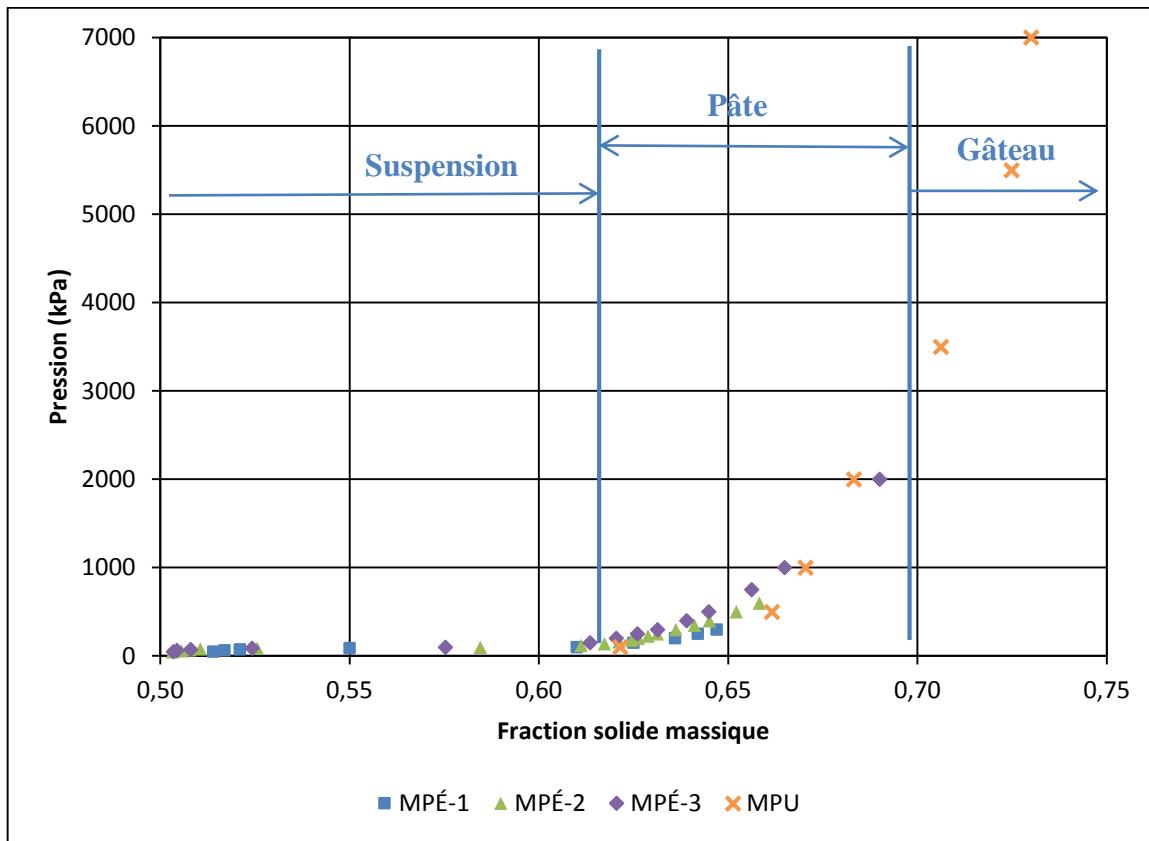


Figure 6.2 : Limite d'élasticité en compression en fonction de la fraction solide massique de la boue rouge

6.1.3. Classification de l'état de la boue rouge

Les résultats présentés à la Figure 6.2 permettent de distinguer les zones d'état de la boue : suspension, pâte et gâteau. La suspension initiale utilisée pour tous les essais avait une fraction solide d'environ 50% (p/p). Cette fraction solide correspond à celle à la sortie des décanteurs dans le procédé Bayer. Pour comprimer le réseau irréversiblement, il faut appliquer une pression sur la suspension. L'état de la boue rouge peut être classifié de suspension, pâte ou gâteau selon sa concentration en particules solides en analysant la force

du réseau tel démontré dans la Figure 3.7. Lorsque la fraction solide massique de la boue est inférieure à 62%, la boue rouge est à l'état d'une suspension. La force de résistance à la compression qu'exerce le réseau est très faible et la pression nécessaire pour augmenter la fraction solide de la boue est basse avec une augmentation quasi-linéaire. Lorsque la boue est à l'état d'une suspension, son état ressemble plutôt au liquide et elle s'écoule bien. Pour une fraction solide massique entre 62 et 70%, la boue rouge est plutôt à l'état d'une pâte. Dans cet état, le comportement de la boue est non-Newtonien (type fluide de Casson) et la force nécessaire à appliquer pour augmenter la fraction solide de la boue augmente de manière exponentielle. Son apparence est plutôt visqueuse et son pouvoir d'écoulement est faible. Au-delà d'une concentration de 70% (p/p), la boue est à l'état d'un gâteau. Dans cet état, son apparence est plutôt celle d'un solide et la loi de comportement en milieu visqueux ne s'applique plus. La limite d'élasticité en compression tend vers une asymptote verticale qui semble se situer à une fraction solide massique de 0,75.

6.1.4. Résistance spécifique massique

Les résultats obtenus avec la méthode à pression unique permettent de tracer des courbes continues de filtration t/V vs V . Avec la méthode à pression étagée, le gâteau est compacté par le piston jusqu'à sa limite d'élasticité en compression. La quantité initiale de liquide à l'intérieur du gâteau formé est faible, donc le réseau est plutôt comprimé expulsant un très petit volume de liquide. Dans ce cas, la loi de Darcy d'écoulement en milieu poreux n'est pas valide. Avec la méthode à pression unique, une suspension fraîche ayant une fraction solide d'environ 50% contenant relativement beaucoup de liquide est

utilisée pour commencer chaque essai. Une grande quantité de liquide est extraite, ce qui permet de tracer les courbes de filtration. Ces courbes t/V vs V obtenues avec la méthode à pression unique pour les pressions de 100 à 7000 kPa sont présentées à la Figure 6.3. En augmentant la pression de filtration, la pente des droites diminue. La filtration du volume de liquide présent initialement dans la suspension est donc plus rapide.

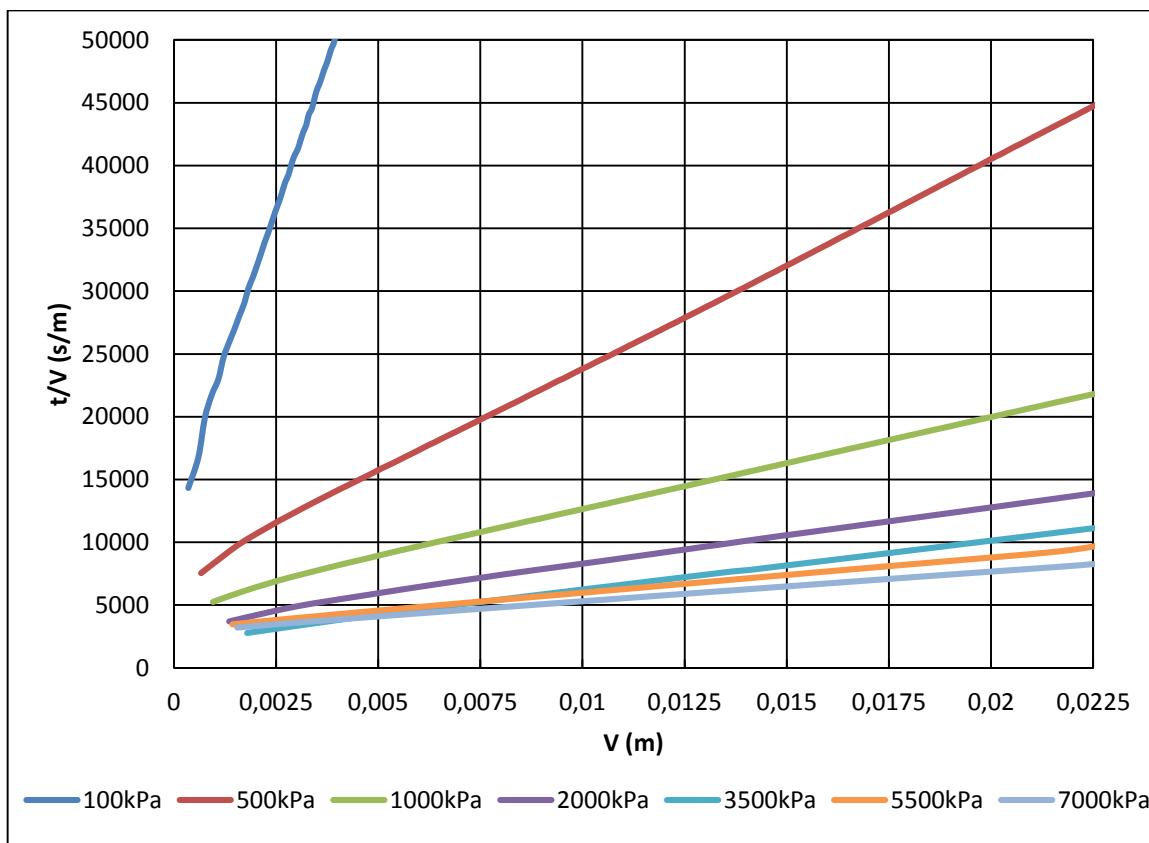


Figure 6.3 : Courbes de filtration t/V vs V pour les essais sur la boue rouge avec la méthode à pression unique

Pour déterminer la résistance spécifique massique du gâteau, il suffit d'isoler α_m dans l'équation de la pente a de l'équation 4.14 :

$$\alpha_m = \frac{a2\Delta P}{\mu c} \quad (6.1)$$

Puisque la structure de la suspension résiste au déplacement du piston, la pression de filtration correspond à la pression appliquée sur le piston diminuée de la limite d'élasticité en compression. Ainsi les résistances spécifiques massiques de la boue rouge sont calculées pour toutes les pressions étudiées et présentées à la Figure 6.4.

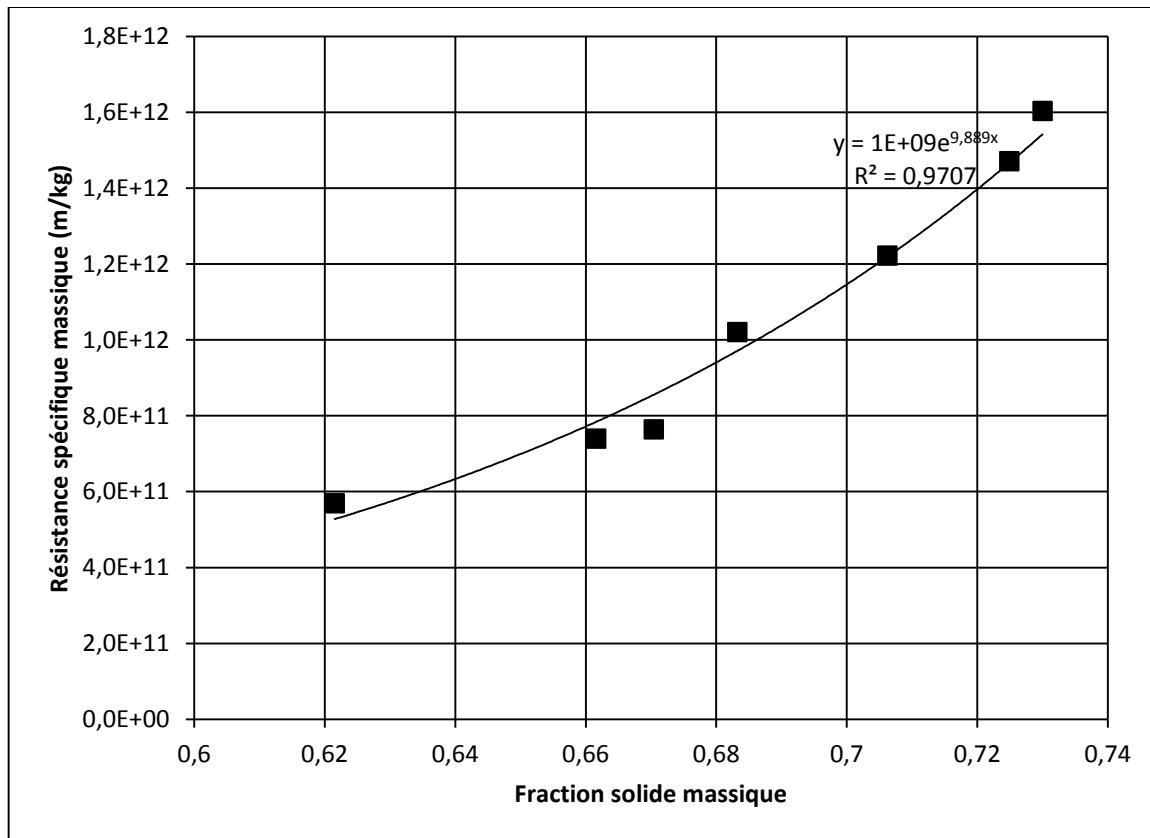


Figure 6.4 : Résistance spécifique massique de la boue rouge en fonction de la fraction solide massique

La résistance spécifique massique de la boue rouge semble croître exponentiellement dans la plage de pressions étudiée. Plus le réseau est dense, plus la fraction de vide est faible et donc plus la résistance spécifique massique augmente.

6.1.5. Taux de déposition des particules solides

La fraction solide massique du gâteau augmente en fonction de la pression de filtration, tel que présenté à la Figure 6.2. Le taux de déposition des particules solides sous forme de gâteau dépend aussi de la pression. La masse de particules déposée à chaque instant est calculée par l'équation 4.9 pendant les essais de filtration avec la méthode à pression unique. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 6.5 en pourcentage afin de normaliser les courbes par rapport à la masse de solide initiale présente dans le montage de filtration. Pour tous les essais, la filtration a duré jusqu'à ce que toute la masse de particules soit déposée. Comme l'essai à 100 kPa a duré environ trois heures, l'échelle de temps de la figure ne montre pas la fin de la filtration.

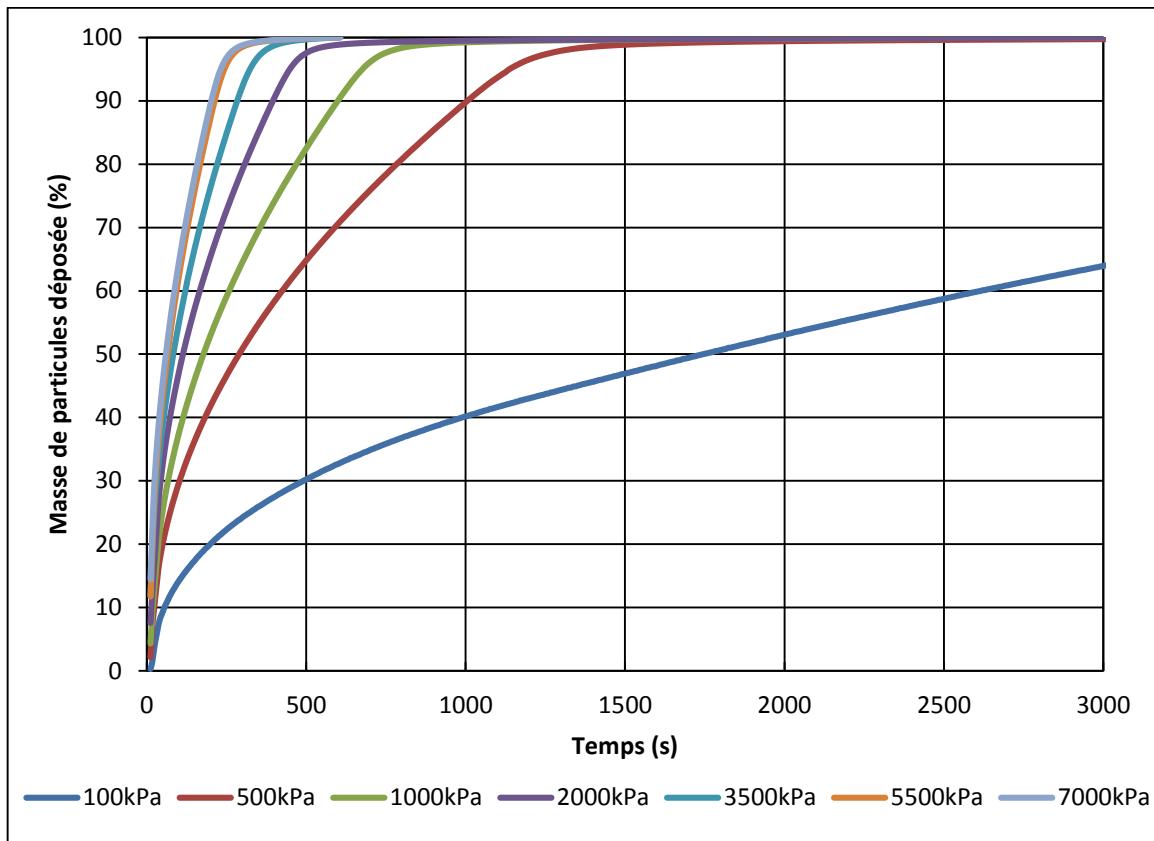


Figure 6.5 : Pourcentage de la masse de solide initiale déposée sur le gâteau en fonction du temps

Plus la pression de filtration est élevée, plus les particules présentes dans la suspension initiale se déposent rapidement sur le filtre pour former le gâteau. Ainsi, en calculant la pente moyenne de chacune des courbes entre 60 et 90% de la masse de particules totales déposées (mptd) dans le gâteau, il est possible de déterminer un taux moyen de déposition des particules solides dans le gâteau (Figure 6.6). Le taux de déposition des particules solides varie énormément entre 100 et 500 kPa mais varie très peu entre 5500 et 7000 kPa. La valeur maximale du taux de déposition des particules solides dans le gâteau est environ de 0,25 %/s et est atteint à partir de 5500 kPa. Selon les résultats,

une augmentation de la pression au-delà de 5500 kPa n'est plus très efficace dans le cas de la boue rouge.

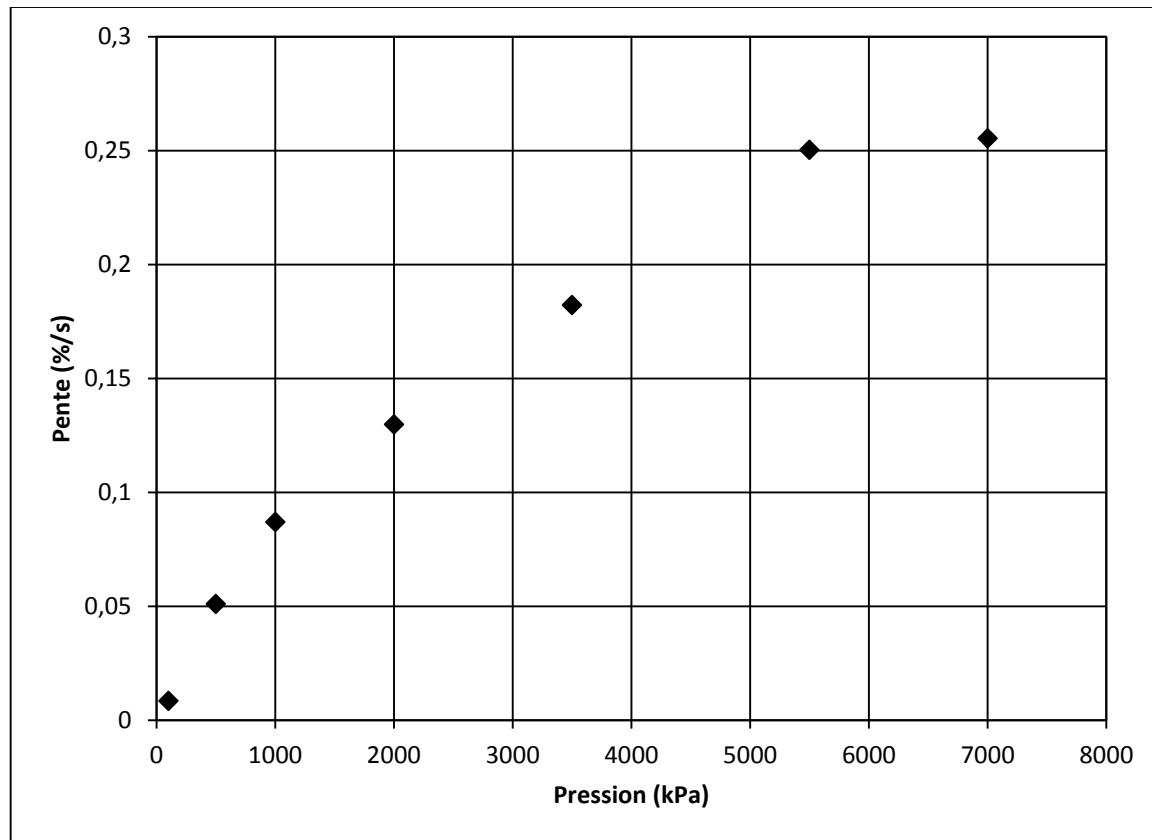


Figure 6.6 : Taux de déposition des particules solides sur le gâteau pour chaque pression de filtration étudiée avec la méthode à pression unique

6.1.6. Calculs d'erreurs

Pour déterminer la répétabilité des résultats, des réplicas ont été effectués à différentes pressions. La précision sur les mesures de la résistance spécifique massique du gâteau se situe aux alentours de $\pm 20\%$. Les sources d'erreurs peuvent provenir de la composition et de la nature de la boue rouge floculée (quantité de floculant, fraction solide initiale, source

de boue rouge, type de bauxite, etc.), des manipulations et de la précision des instruments utilisés.

6.2. Caractérisation des plaques de filtration

La caractéristique la plus importante d'une plaque composant un filtre à plaque est sa rugosité de surface. Cette propriété, jumelée avec la pression de serrage, est responsable de la porosité du filtre à plaques. Cette porosité du filtre déterminera les pertes de charge au travers du filtre et la résistance de celui-ci. La mouillabilité des plaques est également une propriété importante puisqu'elle influencera l'écoulement du fluide au travers du filtre (perméabilité). Les sections suivantes présentent la caractérisation de la rugosité des plaques de filtration à l'aide d'un rugosimètre et d'un profilomètre optique et la caractérisation de la mouillabilité des plaques.

6.2.1. Rugosité des plaques de filtration

6.2.1.1. Résultats du profilomètre

La Figure 6.7 présente les résultats de l'analyse au profilomètre optique de la rugosité des plaques d'acier et d'acier inoxydable standard, pulvérisées au jet de fines billes de verre (sbbv) et pulvérisées au jet de sable naturel (sbsn), particules plus grossières. La variable Sa est l'écart moyen arithmétique du profil de rugosité, la variable Sp est la hauteur maximale des saillies et la variable Sv est la profondeur maximale des creux du profil.

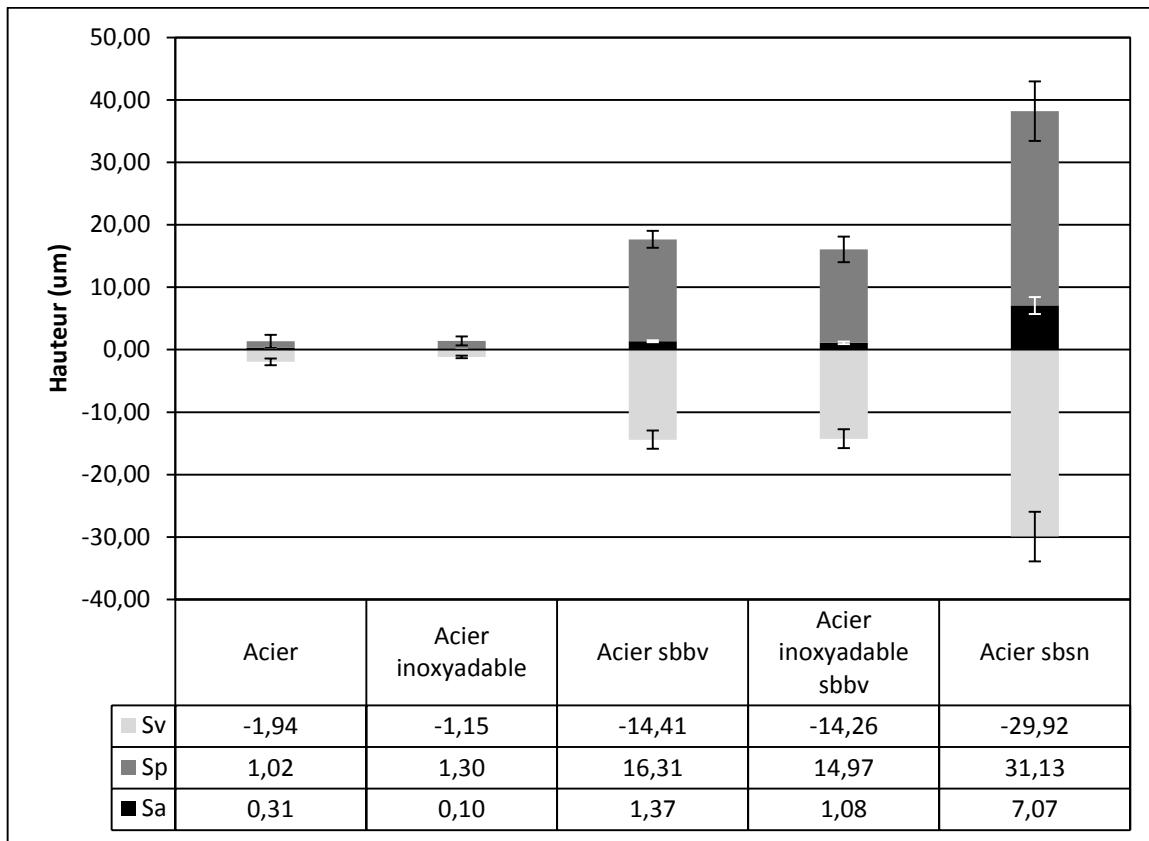


Figure 6.7 : Analyse de la rugosité de surface des plaques au profilomètre optique

Les résultats montrent que l'acier possède une rugosité de surface *Sa* trois fois supérieure à celle de l'acier inoxydable ($0.31 \mu\text{m}$ pour l'acier et $0.10 \mu\text{m}$ pour l'acier inoxydable). La hauteur maximale et minimale des profils est par contre plutôt similaire. Ceci indique que la surface de l'acier inoxydable possède un profil de rugosité moyen plus régulier que celui de l'acier (Figure 6.8).

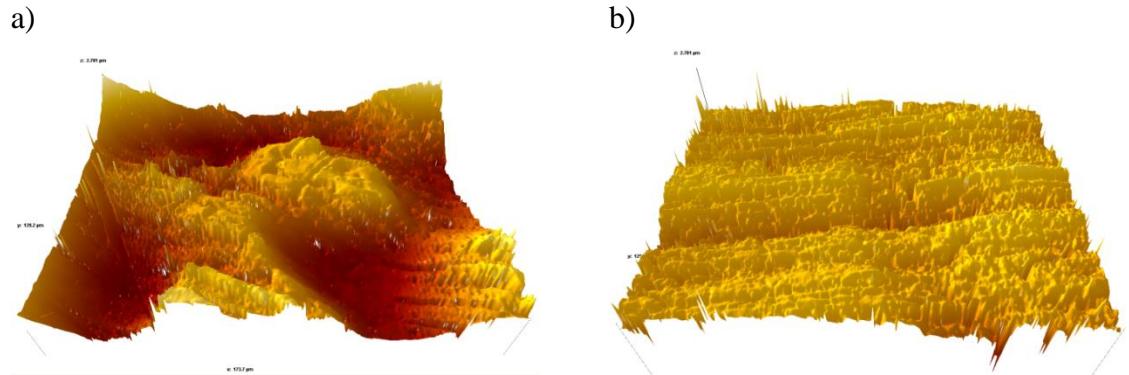


Figure 6.8 : Profil de rugosité de a) l'acier et de b) l'acier inoxydable

Lorsque l'acier et l'acier inoxydable sont pulvérisés au jet de billes de verre, leur profil de rugosité est plutôt similaire. Les deux surfaces ont une valeur de Sa légèrement supérieure à 1 μm et une hauteur maximale du profil de rugosité (somme des valeurs absolues de Sp et Sv) de 30 μm . Les images du profil de rugosité sont présentées à la Figure 6.9.

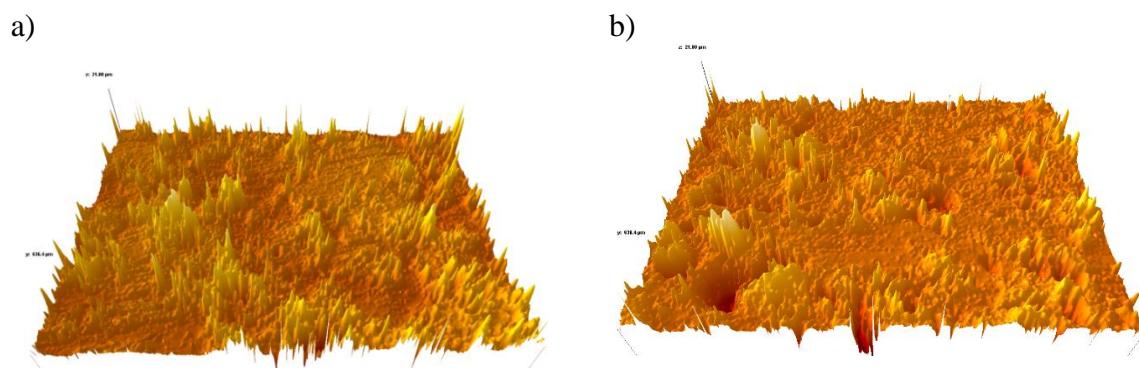


Figure 6.9 : Profil de rugosité de a) l'acier pulvérisé au jet de billes de verre et de b) l'acier inoxydable pulvérisé au jet de billes de verre

Seulement l'acier a été pulvérisé au jet de sable naturel puisque la surface de l'acier inoxydable est trop dure pour pouvoir être pulvérisée par cette méthode. Le profil de rugosité possède une valeur de *Sa* cinq fois supérieure à celle de l'acier pulvérisé au jet de billes de verre. La Figure 6.10 présente l'image du profil de rugosité.

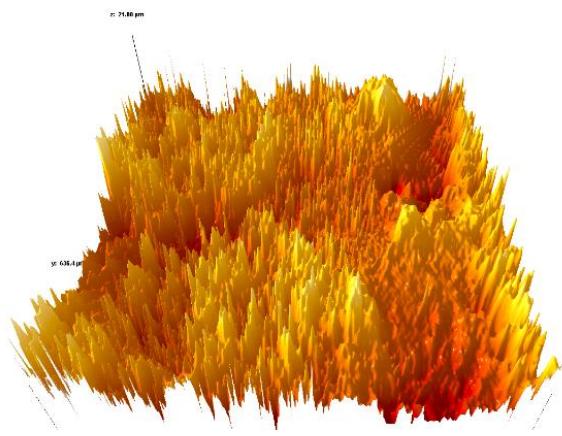


Figure 6.10 : Profil de rugosité de l'acier pulvérisé au jet de sable naturel

6.2.1.2. Résultats du rugosimètre

L'analyse au rugosimètre a permis de déterminer la rugosité de surface des plaques dont la surface ne réfléchit pas la lumière telles que les plaques recouvertes de peinture cuite bleue et noire (deux types de peinture cuite différentes) ainsi que les plaques d'acier rouillé. L'analyse a également été réalisée sur une plaque d'acier inoxydable pulvérisée au jet de billes de verre (sbbv) à titre de comparaison avec l'analyse au profilomètre optique.

Les résultats sont présentés à la Figure 6.11.

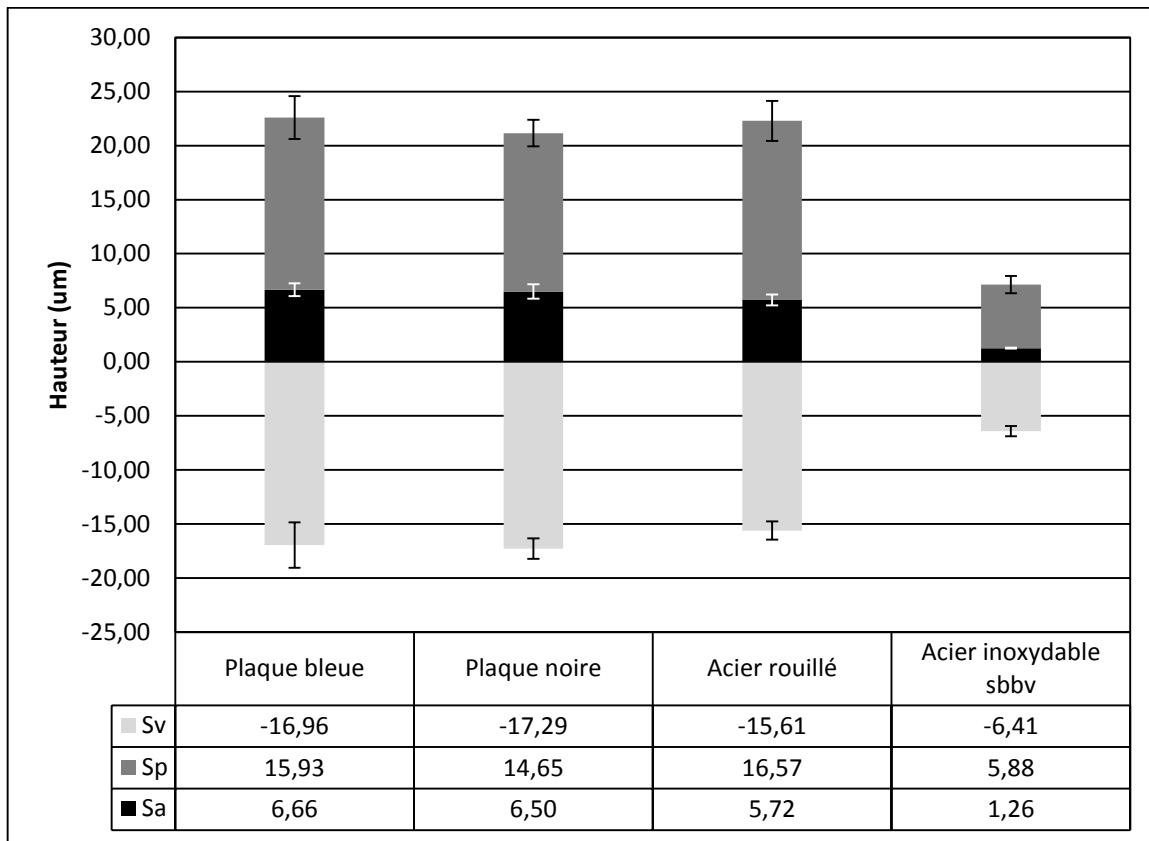


Figure 6.11 : Analyse de la rugosité de surface des plaques au rugosimètre

L'analyse démontre que les plaques recouvertes de peinture cuite bleue et noire ont un profil de rugosité très similaire. La Figure 6.12 et la Figure 6.13 montrent le résultat d'une analyse au rugosimètre de chacune de ces plaques.

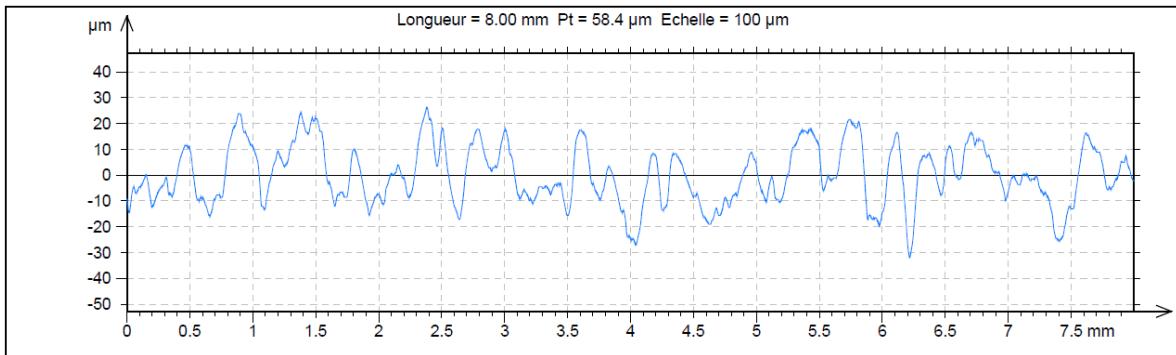


Figure 6.12 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier recouverte de peinture cuite bleue

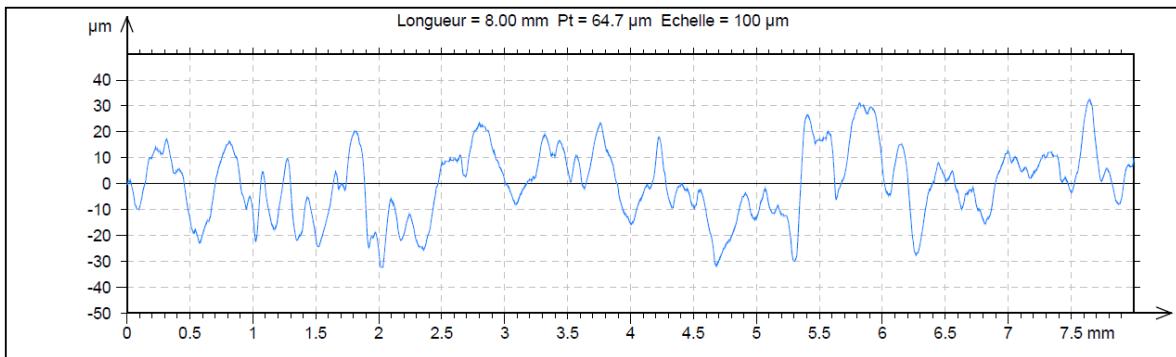


Figure 6.13 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier recouverte de peinture cuite noire

L'analyse d'une plaque d'acier rouillé montre que la rugosité de surface est similaire à celle de l'acier recouvert de peinture cuite avec une valeur de S_a de 5,72 μm . Cependant, le résultat obtenu démontre une surface beaucoup plus irrégulière (Figure 6.14).

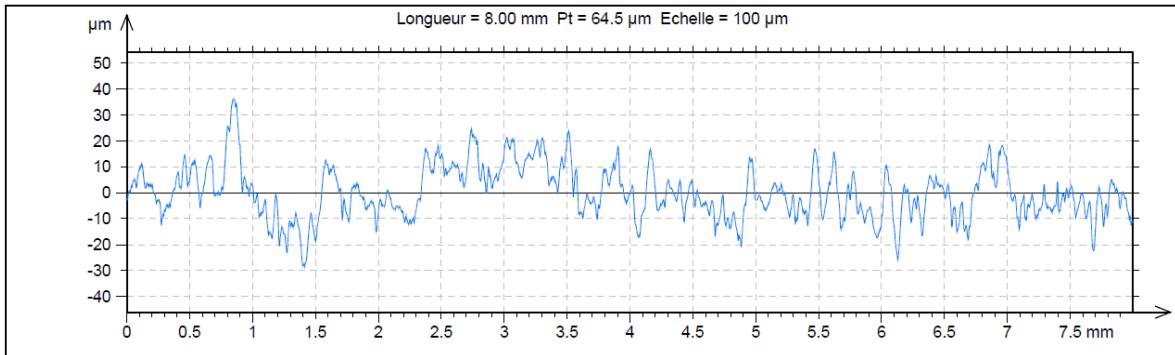


Figure 6.14 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier rouillé

L'analyse au rugosimètre d'une plaque d'acier inoxydable pulvérisé au jet de billes de verre montre une rugosité de surface de $1.26 \mu\text{m}$, ce qui correspond à la valeur obtenue avec l'analyse au profilomètre optique. Cependant, le profil montre des valeurs de Sp et Sv inférieures à celles de l'analyse au profilomètre optique. Ce résultat s'explique par le contact entre la pointe du rugosimètre et la surface. La pointe ne peut entrer profondément dans les creux étroits, sous-estimant souvent les valeurs. L'image du profil obtenu (Figure 6.15) est en accord avec cette conclusion puisque les pics du profil sont très étroits.

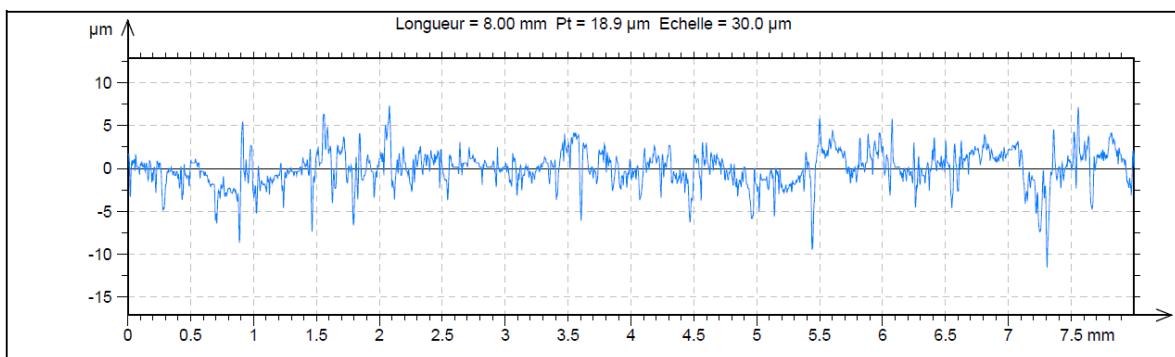


Figure 6.15 : Profil de rugosité d'une plaque d'acier inoxydable pulvérisé au jet de billes de verre

6.2.2. Mouillabilité des plaques de filtration

Pour déterminer la mouillabilité des différents matériaux pouvant servir de plaque de filtration, l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface des plaques a été mesuré par analyse d'image. Le volume de la goutte déposée en surface est de 4 ml et la capture d'image est effectuée 5 secondes après le dépôt de la goutte. Les résultats d'angle de contact moyen sont présentés dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Angle de contact d'une goutte d'eau en surface des plaques de filtration de différents matériaux

Type de matériau	Angle de contact moyen	Écart type
Acier	66,2°	7,3
Acier oxydé	38,3°	12,9
Acier (sbsn)	114,9°	10,9
Acier inoxydable	71,2°	3,7
Acier inoxydable (sbbv)	69,3°	5,1
Peinture cuite	54,4°	12,1

Les résultats démontrent qu'à l'exception de l'acier sablé au jet de sable naturel (sbsn), les matériaux présentés sont hydrophiles. L'acier sablé au jet de sable naturel se classe dans la famille des matériaux hydrophobes puisque l'angle de contact moyen est supérieur à 90° (Tableau 5.1). Tel que le montre la Figure 6.7, l'acier sablé au jet de sable naturel possède une rugosité de surface moyenne (S_a) supérieure à 7 microns avec des valeurs de pics et de creux à 30 microns. Tel que le démontre la Figure 6.16, l'angle de contact de la goutte d'eau est causé par la rugosité de la surface. La goutte d'eau ne pénètre pas complètement dans le matériau dans les premiers instants de contact, ce qui donne un

angle supérieur à 90° . Cette observation est également justifiée par la diminution de l'angle de contact de la goutte avec l'augmentation du temps de contact.

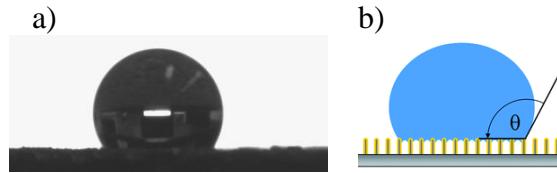


Figure 6.16 : a) Goutte d'eau en surface d'une plaque d'acier (sbsn) et b) représentation d'une goutte d'eau sur une surface rugueuse possédant des pics et des creux étroits

L'acier oxydé est le matériau qui offre l'angle de contact le plus faible avec une valeur moyenne de $38,3^\circ$. Cette valeur s'explique par la présence élevée d'oxygène en surface du métal. L'oxygène provient de la réaction électrolytique entre les ions ferreux de l'acier et l'oxygène de l'air ambiant. La réaction produit des oxydes de fer qui se déposent en surface du métal pour former la rouille. Cette réaction se produit de manière inégale sur la surface des disques de filtration, ce qui explique la valeur élevée de l'écart type à $12,9^\circ$. Plus la surface sur laquelle la goutte d'eau est déposée est oxydée, plus l'angle de contact est faible.

L'angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface d'acier et d'acier inoxydable est plutôt similaire. L'augmentation de la rugosité de surface de l'acier inoxydable par la pulvérisation de billes de verre ne modifie pas significativement la mouillabilité de la surface. La peinture cuite offre pour sa part une surface légèrement plus hydrophile avec un angle de contact moyen de $54,4^\circ$. La rugosité présentant des pics larges explique en partie la mouillabilité de la surface. L'eau rempli les interstices et la goutte possède un angle de contact apparent plus aigu.

6.3. Filtration linéaire avec filtre à plaques

Les essais de filtration avec le montage de filtration linéaire à plaques ont permis de filtrer un liquide clair à débit constant au travers d'un gâteau de boue rouge préalablement formé et d'un filtre à plaque d'acier recouvert de peinture cuite. En reliant cette pression d'opération à l'épaisseur du gâteau, il est possible de déterminer la résistance du milieu filtrant à l'aide de la loi de Darcy (Équation 4.2). En second lieu, puisque le filtre est constitué de plaques métalliques, des essais de filtration à pression constante ont été effectués afin de vérifier l'augmentation de la résistance du filtre avec l'encrassement de celui-ci.

6.3.1. Filtration sur gâteau de boue rouge à débit constant

Pour effectuer les essais de filtration sur gâteau de boue rouge, des gâteaux de différentes épaisseurs ont été fabriqués dans le montage expérimental de filtration linéaire avec filtre à plaques. Pour ce faire, trois différents volumes initiaux de boue rouge ont été filtrés selon le protocole de filtration sur presse hydraulique à pression constante unique (section 5.2.1.1). De cette manière, des gâteaux de différentes épaisseurs mais de même fraction solide massique ont été formés, puisque la même pression de filtration a été utilisée. Le Tableau 6.2 présente les différents volumes de boue utilisés, leur fraction solide massique initiale, la pression de filtration, les épaisseurs de gâteau obtenues et la fraction solide massique du gâteau.

Toutes les fractions solides massiques présentes dans ce tableau sont mesurées expérimentalement à l'aide d'une balance chauffante. Des échantillons de gâteau ont été récoltés à la fin des essais pour effectuer les mesures expérimentales. Chaque épaisseur a été mesurée expérimentalement et calculée à l'aide des données obtenues par le programme de la presse hydraulique.

Tableau 6.2 : Données pour déterminer l'épaisseur du gâteau selon le volume de boue initiale filtrée

Pression (kPa)	Volume de boue à filtrer (ml)	Fraction solide massique initiale (%)	Épaisseur du gâteau (mm)	Fraction solide massique du gâteau (%)
3000	56	41,68	3	70
3000	112	41,68	6	70
3000	205	41,68	11	70

Pour déterminer la résistance du filtre et du gâteau créé, il suffit de faire circuler de l'eau à débit constant au travers de ceux-ci. Les essais ont été effectués avec la méthode de filtration à débit constant (section 5.2.1.3) à un débit de filtrat de 1,0 ml/min/cm², ce qui représente 81 ml/min pour le filtre expérimental de filtration linéaire avec filtre à plaques de 10,16 cm de diamètre.

La pression finale d'opération pour chaque essai de filtration de l'eau à débit constant est présentée dans la Figure 6.17. L'augmentation de la pression en fonction de l'épaisseur de gâteau est parfaitement linéaire. Ce comportement correspond à celui attendu de la loi de Darcy (équation 4.1). Le gâteau plus épais requiert une pression plus grande pour maintenir un même débit.

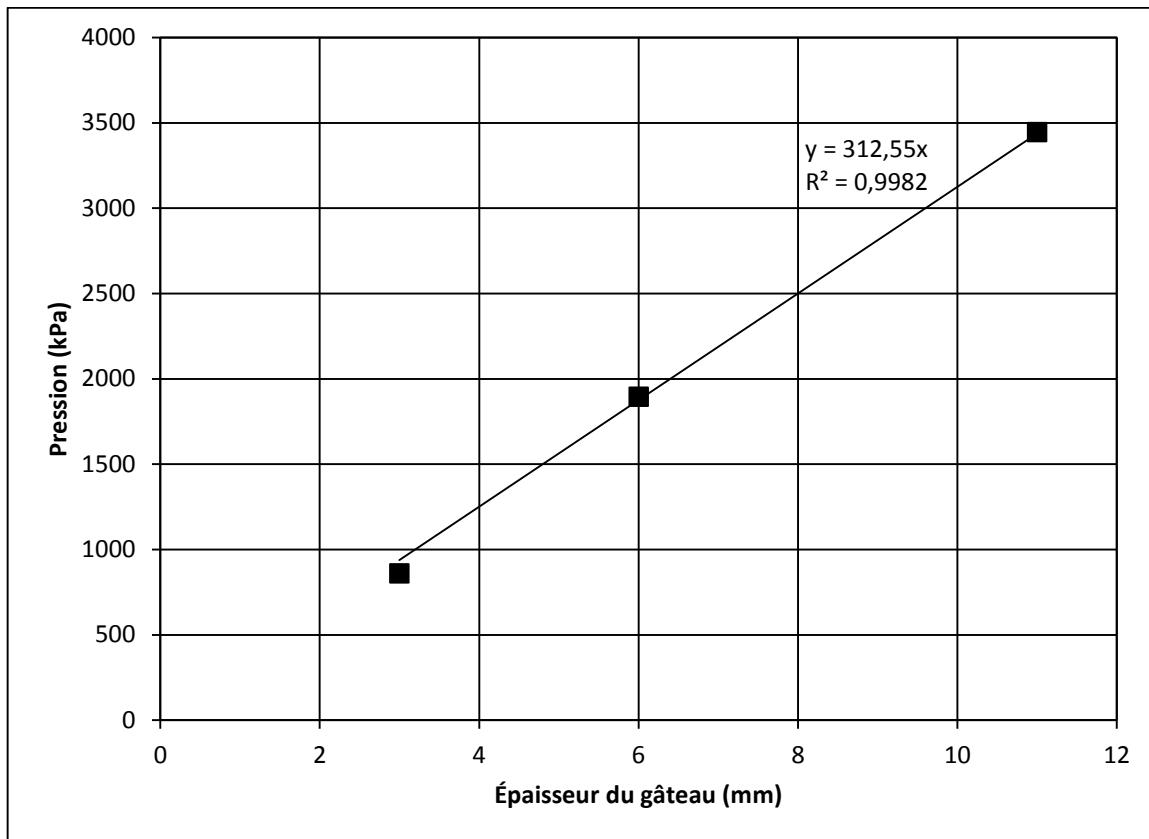


Figure 6.17 : Pression finale pour faire circuler un débit d'eau constant de 1 ml/min/cm² au travers de différentes épaisseurs de gâteau et d'un filtre d'acier recouvert de peinture cuite.

Puisque le filtre est composé d'une couche de gâteau de boue rouge et d'un filtre à plaques d'acier recouvert de peinture cuite, la loi de Darcy modifiée (équation 4.2) peut être utilisée pour déterminer la résistance de chacune des composantes du filtre. La résistance totale du système est donnée par :

$$(R_c + R_f) = \frac{AP}{\mu Q} \quad (6.2)$$

La valeur de la résistance spécifique massique de la boue rouge pour une fraction solide massique égale à 0,70 est de $1,20 \times 10^{12}$ m/kg. Elle a été déterminée à l'aide des résultats obtenus dans la section 6.1.4. L'équation 4.4 peut être modifiée afin de déterminer la résistance induite par le gâteau.

$$R_c = \alpha_m e_c \varphi_c \rho_s \quad (6.3)$$

Tableau 6.3 : Résultats expérimentaux pour déterminer la résistance induite par le gâteau de boue rouge

Épaisseur du gâteau (mm)	Pression (Pa)	$(R_c + R_f)$ (m ⁻¹)	R_c (m ⁻¹)	Résistance induite par le gâteau (%)
3	864 845	5,17E+12	4,94E+12	96
6	1 896 058	1,14E+13	9,88E+12	87
11	3 447 379	2,07E+13	1,81E+13	88

Le Tableau 6.3 montre que la résistance induite par le gâteau représente environ 90% de la résistance totale lors de la filtration. La majorité de la perte de charge est induite par l'épaisseur de gâteau formé. Pour les applications de filtration de la boue rouge, il serait d'intérêt de diminuer l'épaisseur de la couche de gâteau. Les résultats démontrent que la résistance du filtre augmente avec la pression et l'épaisseur du gâteau. Une pression de filtration plus grande appliquée plus longtemps force plus de particules solides à l'intérieur du filtre, risquant de l'encrasser et d'augmenter sa résistance.

6.3.2. Encrassement des filtres à plaques

Des particules solides peuvent s'infiltrer au travers du filtre lorsque les porosités du filtre induites par la rugosité de surface des plaques sont plus grosses que les particules de la suspension à filtrer. Dans le cas d'un filtre à plaques d'acier recouvert de peinture cuite, la rugosité de surface des plaques est en moyenne 6,50 microns (section 6.2.1.2), ce qui laisse des interstices moyens de 13,00 microns pour la filtration. Puisque la taille moyenne des particules de boue rouge varie entre 1 et 10 microns, des particules de boue rouge peuvent traverser le filtre. De plus, des particules peuvent rester bloquées à l'intérieur du filtre, augmentant sa résistance. Pour déterminer l'augmentation de la résistance d'un filtre encrassé, deux essais de filtration à pression constante avec la méthode de filtration à pression unique (section 5.2.1.1) ont été effectués. Dans le premier essai, un filtre propre a été utilisé. Dans le deuxième essai, le même filtre que l'essai précédent a été utilisé mais après la filtration de la boue rouge. Ce filtre était donc encrassé de particules solides tel que le montre la Figure 6.19.



Figure 6.18 : Encrassement par les particules de boue rouge du filtre à plaque d'acier recouvert de peinture cuite

La pression utilisée pour les essais est 3447 kPa. La courbe de filtration de chaque essai est présentée à la Figure 6.19. Les deux courbes montrent une pente similaire ce qui indique que la résistance induite par le gâteau est la même. Il est normal d'observer ce phénomène puisque les deux filtrations ont été effectuées à la même pression formant ainsi un gâteau à la même fraction solide massique de 71%. L'écart entre les deux courbes provient d'une ordonnée à l'origine différente, ce qui indique que la résistance induite par le filtre augmente avec l'encrassement de celui-ci.

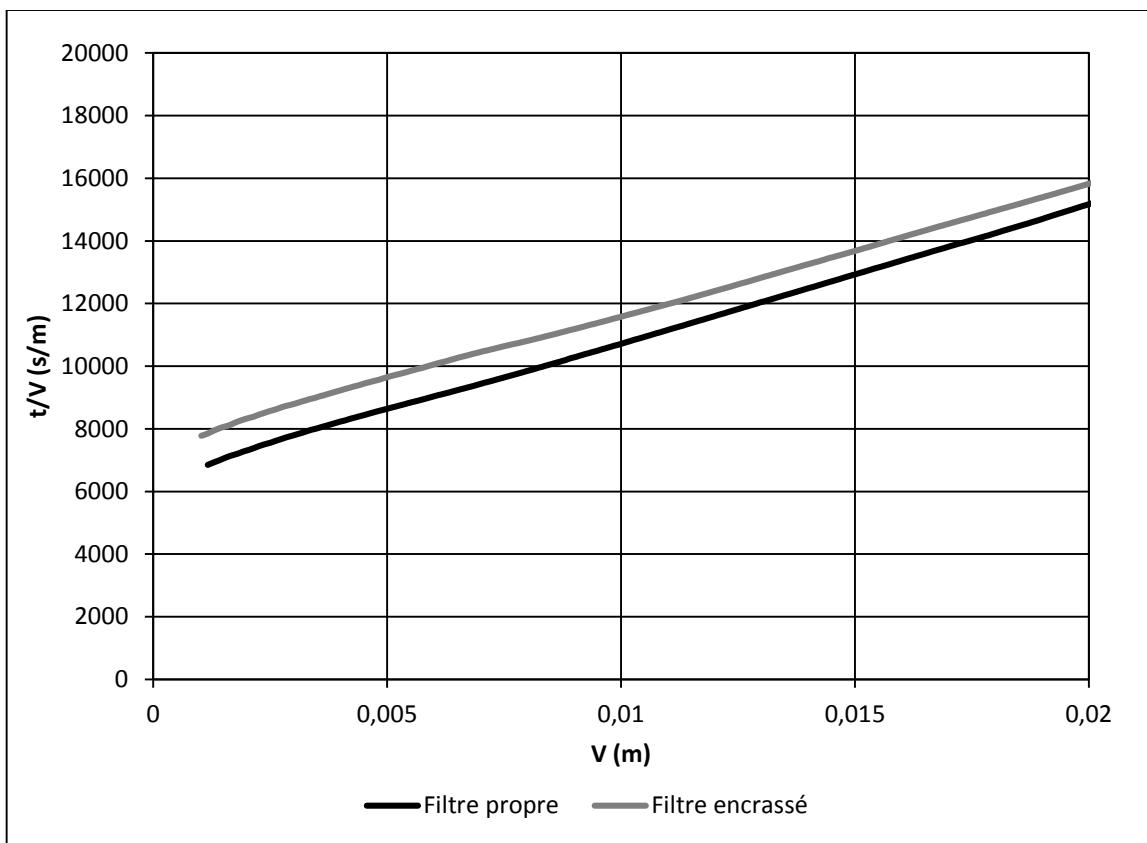


Figure 6.19 : Courbes de filtration t/V vs V de la boue rouge à pression constante de 3447 kPa sur filtre à plaques

La résistance du filtre est calculée à partir de l'ordonnée à l'origine b par :

$$R_f = \frac{bP}{\mu} \quad (6.4)$$

Pour le filtre propre, la résistance est égale à $1,83 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$, tandis que pour le filtre encrassé elle est de $2,14 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$, soit une augmentation de la résistance du filtre de 17%.

Lors d'une filtration sur gâteau, les particules solides s'infiltrent à l'intérieur du filtre surtout au début de la filtration puisque lorsque le gâteau est formé, celui-ci agit comme écran pour retenir les particules solides.

6.4. Filtration radiale avec filtre à plaques

6.4.1. Filtration continue avec pompe à déplacement positif

La perméabilité des filtres d'acier et d'acier inoxydable est déterminée en faisant circuler un débit constant d'eau au travers du filtre. Le protocole utilisé est celui présenté à la section 5.2.2. Les deux filtres utilisés sont présentés à la Figure 6.20. Dans les deux cas, un nombre identique de disques de filtration est utilisé pour une même hauteur de filtre, soit une densité de fente égale à 7 fentes/cm, et les disques ont la même force de serrage.

a)



b)



Figure 6.20 : Montage de filtration pour déterminer la perméabilité du a) filtre d'acier et b) filtre d'acier inoxydable

Puisque les essais expérimentaux sont effectués avec un liquide exempt de particules solides, la loi de Darcy d'écoulement en milieu poreux (équation 4.1) peut être utilisée pour déterminer la résistance des filtres. L'équation de la résistance du filtre est :

$$R_f = \frac{AP}{\mu Q} \quad (6.5)$$

Les résistances des filtres d'acier et d'acier inoxydable sans traitement et avec pulvérisation de la surface au jet de billes de verre sont présentées dans le Tableau 6.4.

Tableau 6.4 : Résistance des filtres d'acier et d'acier inoxydable

Paramètres	Acier		Acier inoxydable	
	Sans traitement	Pulvérisé au jet de billes de verre	Sans traitement	Pulvérisé au jet de billes de verre
<i>Sa</i> (μm)	0.31	1.37	0.10	1.08
<i>e_f</i> (m)	0.0254	0.0127	0.0254	0.0254
<i>R_f</i> (m⁻¹)	6.8x10 ¹³	3.5x10 ¹³	N/A	5.1x10 ¹³
				5.2x10 ¹¹

Les résultats démontrent qu'augmenter la rugosité de surface des plaques composant le filtre d'acier inoxydable d'un facteur 10 diminue sa résistance d'un facteur 100.

En comparant les résultats de résistance du filtre d'acier sans traitement pour les deux épaisseurs de filtre, on remarque que la résistance du filtre deux fois moins épais est deux fois moindre. Ce résultat est normal puisque, selon l'équation 4.3, la résistance du filtre est égale au quotient de son épaisseur par sa perméabilité. Dans le cas présent, puisque le même type de filtre est utilisé, la perméabilité ne change pas et puisqu'il y a un facteur deux entre les deux épaisseurs de filtre, ce même facteur se retrouve entre les résistances.

La résistance du filtre composé de disques d'acier pulvérisé au jet de billes de verre n'a pu être déterminée puisqu'une pression constante n'a pu être obtenue. Ce résultat est présenté à la Figure 6.21 pour une filtration à un débit constant de 75 ml/min. Dans le cas de la filtration au travers du filtre d'acier inoxydable, la pression moyenne se stabilise à une valeur d'environ 35 kPa. Par contre, pour le premier essai avec le filtre d'acier, la pression croît sans cesse pour atteindre une valeur de 170 kPa après 25 minutes de filtration à débit constant. Pour le second essai avec le filtre d'acier, la pression finale atteint une valeur de 415 kPa. Le second essai a été effectué immédiatement après l'essai #1 sans avoir démonté ni nettoyé le filtre et après avoir attendu que la pression à l'intérieur du filtre revienne à zéro.

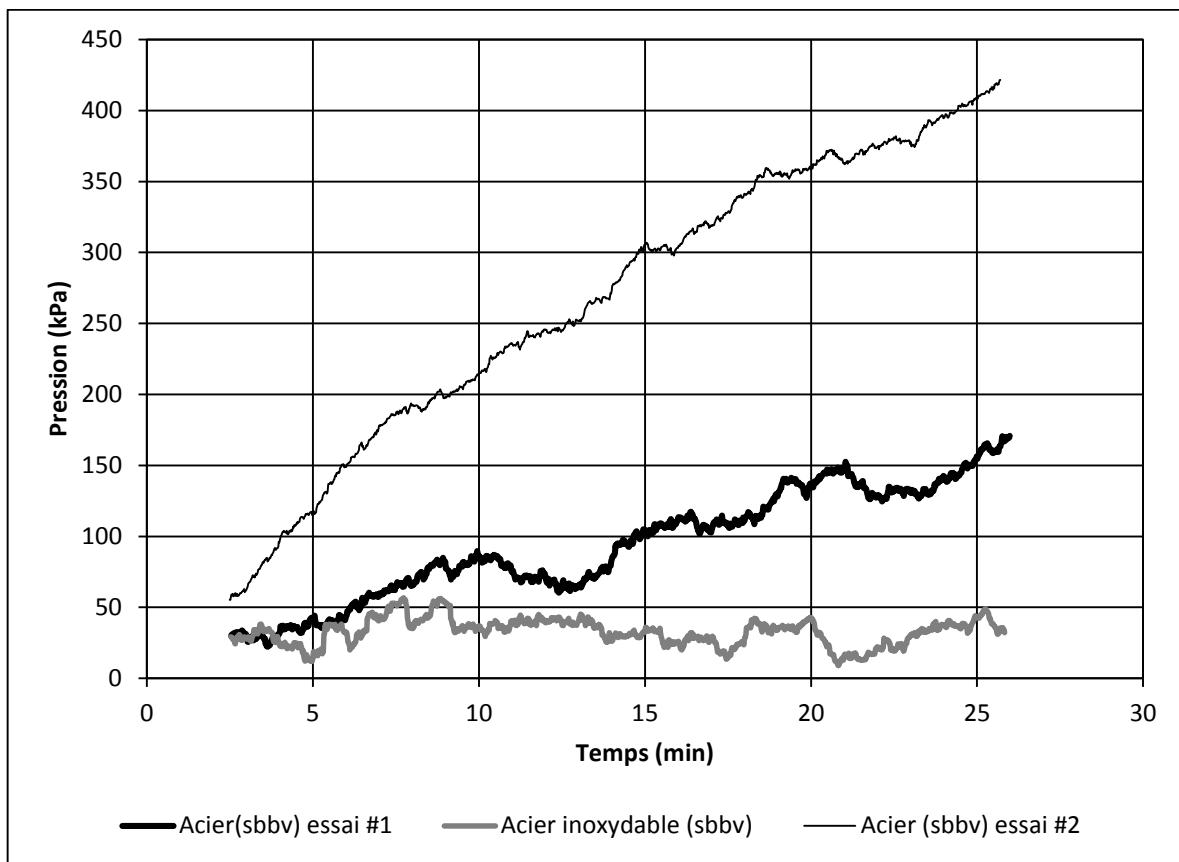


Figure 6.21 : Données expérimentales de pression en fonction du temps pour la filtration d'un débit constant de 75 ml/min

Puisque la pression augmente continuellement lors de la filtration de l'eau au travers du filtre de disques d'acier, la résistance du filtre augmente également. Ce phénomène avait également été observé à plus petite échelle lors de la filtration d'un débit constant au travers du filtre de disques d'acier non-traité. L'augmentation de la pression n'était pas aussi évidente. Cette augmentation pourrait provenir de l'oxydation de la surface des disques d'acier lors de l'écoulement de l'eau au travers du filtre. Après un essai de filtration, de multiples taches de couleur rouille se retrouvent en surface des disques, indiquant la présence d'oxydation du métal. En s'oxydant, des particules d'oxyde de fer se déposent

dans les porosités du filtre, ce qui diminue sa fraction de vide et augmente sa résistance. Le traitement de surface consistant à augmenter la rugosité par pulvérisation d'un jet d'agrégats met la surface du métal à nue et favorise la réaction d'oxydation. Le filtre composé de plaques d'acier dont la surface a été pulvérisée au jet de billes de verre est donc propice à s'oxyder.

6.4.2. Filtration sur presse hydraulique à débit constant

6.4.2.1. Densité de fentes

La filtration à débit constant de la boue rouge sur presse hydraulique permet de déterminer l'efficacité de la filtration selon la densité de fentes du filtre. La densité de fentes d'un filtre métallique à plaques se définit comme étant le nombre de fente entre les plaques par unité de longueur. Pour avoir un filtre avec une densité de fente élevée pour une même hauteur de filtre, l'épaisseur axiale d'une plaque doit être petite. La fraction de vide du filtre, et donc la perméabilité de celui-ci, est fonction de sa densité de fentes. Les essais expérimentaux ont été effectués avec le montage de filtration radiale composé de disques d'acier en suivant le protocole de filtration à débit constant décrit dans la section 5.2.1.3. Deux essais expérimentaux sont présentés dans la Figure 6.22 afin de comparer la filtration au travers d'un filtre ayant une densité de fentes différente. La pression à l'intérieur du système croît linéairement en fonction du temps dans les deux cas, tel que prévu par l'équation 4.18. L'augmentation de la pression non linéaire dans les premiers instants de la filtration est associée à la phase de pénétration du filtrat entre les disques du

filtre. Une fois que toutes les porosités du filtre sont imbibées de filtrat, l'augmentation de la pression est principalement due à l'accumulation du gâteau lors de la filtration.

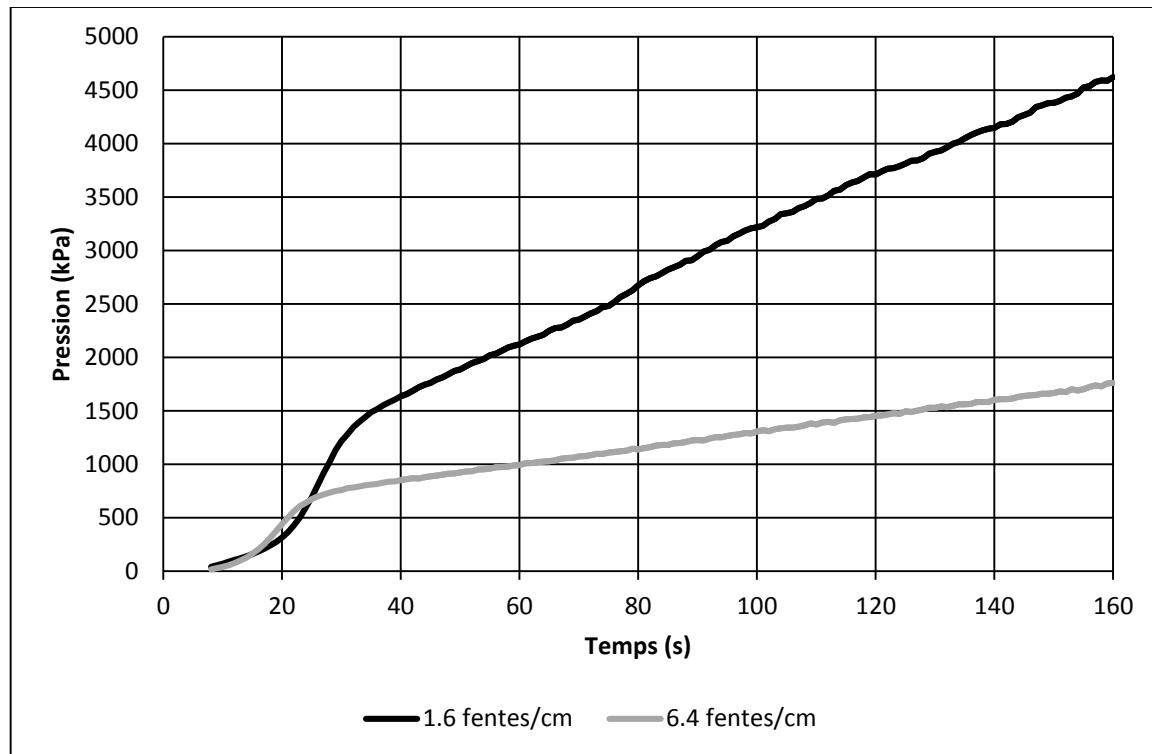


Figure 6.22 : Représentation de la filtration de la boue rouge au travers de deux filtres avec une densité de fente différente

La pression nécessaire pour filtrer un débit constant de 62.1 ml/min est supérieure lorsque le filtre possède une densité de fentes plus petite puisque la résistance offerte par le celui-ci est plus élevé. Cependant, selon l'équation 4.18, une plus grande pente indique seulement que le gâteau formé offre une résistance supérieure.

6.4.2.2. Type de disques

Des essais de filtration avec le montage expérimental de filtration radiale ont permis de comparer les pertes de charge dans le système pour filtrer un débit constant de filtrat de boue rouge avec différents matériaux de disques filtrants. Pour ces essais, le protocole décrit à la section 5.2.1.3 a été suivi et le débit constant utilisé est de 39 ml/min. Les paramètres expérimentaux sont présentés dans le Tableau 6.5.

Tableau 6.5 : Paramètres expérimentaux des essais de filtration à débit constant avec différents matériaux de plaques filtrantes

Diamètre interne du filtre	0,1016 m
Épaisseur filtrante	0,0254 m
Hauteur du filtre	0,0699 m
Épaisseur des disques	1,84 mm
Densité de fente	6,6 fentes/cm
Couple de serrage	56,5 Nm

Les résultats de la filtration de la boue rouge sont présentés à la Figure 6.23. La filtration d'un débit constant de filtrat au travers d'un filtre composé de disques d'acier inoxydable nécessite une pression interne largement supérieure aux autres filtres étudiés. De plus la montée abrupte en pression indique que la force nécessaire pour faire écouler le filtrat au travers du milieu poreux est grande. Il est normal d'observer une pression supérieure pour ce type de filtre puisque selon la Figure 6.7, l'acier inoxydable possède une rugosité inférieure aux autres plaques avec une valeur de S_a égale à 0,10 microns mesurée au profilomètre optique. Cette valeur faible de rugosité de surface produit un filtre avec une faible porosité. L'augmentation de la rugosité de surface de l'acier inoxydable par la

pulvérisation au jet de billes de verre (sbbv) diminue significativement la pression nécessaire pour la filtration.

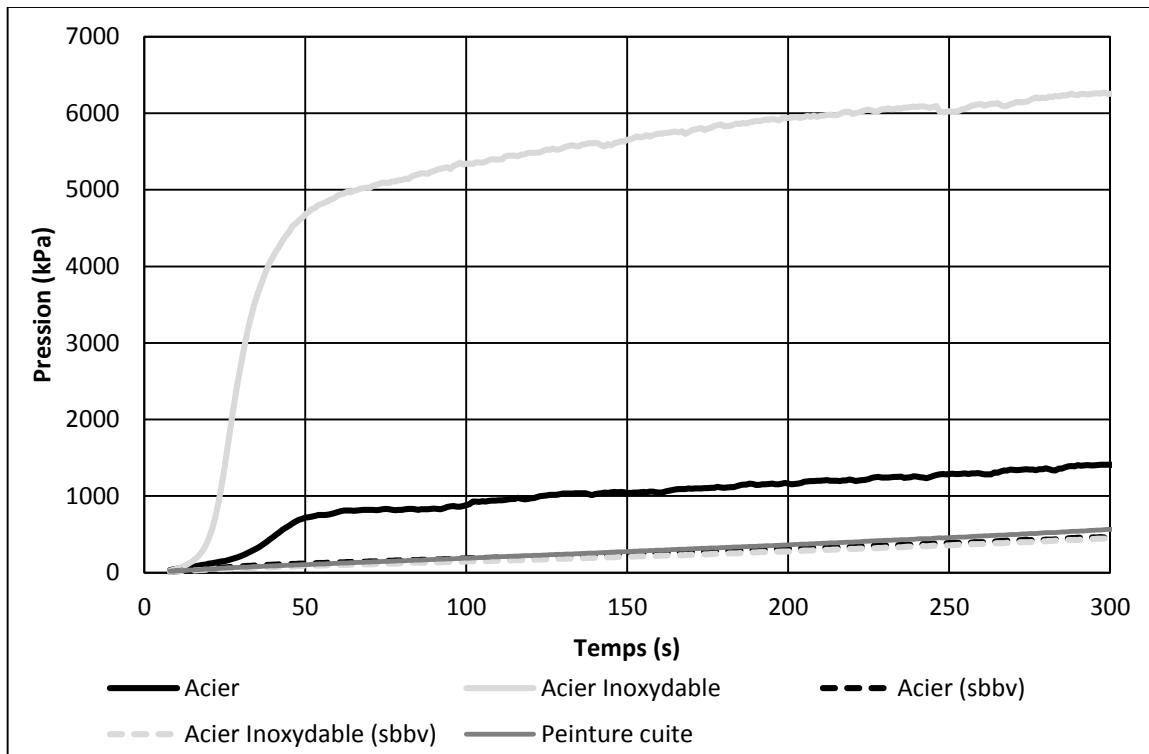


Figure 6.23 : Pression interne en fonction du temps pour la filtration à débit constant de la boue rouge au travers différents types de filtre

Les filtres d'acier et d'acier inoxydable pulvérisés au jet de billes de verre ainsi que le filtre d'acier recouvert de peinture cuite ont des pertes de charge similaires lors de la filtration de la boue rouge à débit constant. La pression étant relativement faible et l'absence de montée abrupte en pression indique que les pertes de charges du système sont principalement dues à l'augmentation de l'épaisseur du gâteau avec le temps.

6.4.3. Filtration du résidu de la digestion du charbon

6.4.3.1. Composition

La composition des résidus de la digestion du charbon dépend du procédé de digestion. Les huiles présentes dans ce résidu contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques cancérigènes (HAPs). Parce que les installations dans le laboratoire ne permettent pas de capter les vapeurs de HAPs, les résidus de la digestion du charbon ont été remplacés par un mélange d'essai inoffensif. Dans ce mélange, les huiles ont été remplacées par de l'huile de canola, le charbon non converti par du charbon vierge et les cendres de charbon et les oxydes de fer catalyseurs de digestion par un concentré de fer (Tableau 6.6). Le ratio des particules solides est conservé dans le mélange d'essai de manière à répliquer adéquatement le résidu. Le Tableau 6.6 montre que le mélange d'essai comporte moins de liquide que les résidus, soit 50% massique de liquide contrairement à 86.4%. Le mélange d'essai correspond donc à un mélange où une certaine quantité de liquide aurait déjà été extraite.

Tableau 6.6 : Composition des résidus de la digestion du charbon et du mélange d'essai

Résidu de la digestion du charbon		Mélange d'essai ^a	
Matériel	Concentration [% p/p]	Matériel	Concentration [% p/p]
Huiles ^b	86.4	Huile de canola	50.0
Charbon non converti (sans cendres)	3.0	Charbon	11.0
Cendre de charbon	7.6	Concentré de fer (Oxyde de fer)	39.0
Oxyde de fer catalyseur	3.0		

^a Mélange de base, même ratio de solides organiques/inorganiques que les résidus

^b Contient une forte concentration de HAPs

Une analyse au microscope électronique à balayage (MEB) permet de visualiser les solides présents dans les résidus de la digestion du charbon (Figure 6.24). Dans cette image, les composés inorganiques et organiques apparaissent lumineux et sombres respectivement. Les composés inorganiques sont en fait les cendres de charbon et le catalyseur. Les composés organiques sont pour leur part le charbon non converti.

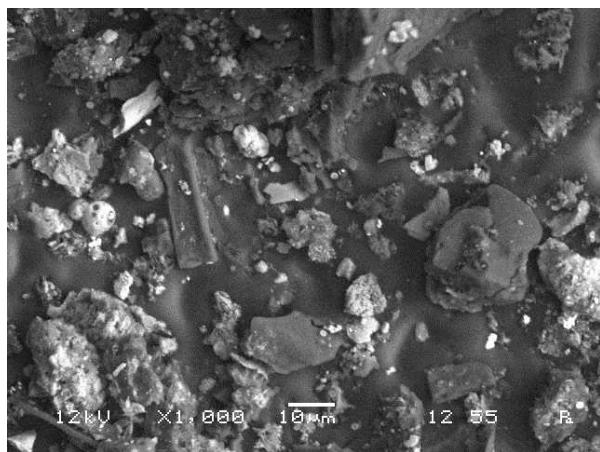


Figure 6.24 : Image au MEB des solides du résidu de la digestion du charbon

La granulométrie des particules solides du résidu de la digestion du charbon s'étend de 0,5 à 100 μm (Figure 6.25). Les particules d'oxyde de fer catalyseurs sont plus petites et leur taille s'étend de 0,2 à 60 μm (Figure 6.26).

Dans le mélange d'essai, les particules de charbon ont une taille inférieure à 75 μm et le concentré du fer est présent en trois tailles de quantité égale, soit 75-53 μm , 53-45 μm et <45 μm .

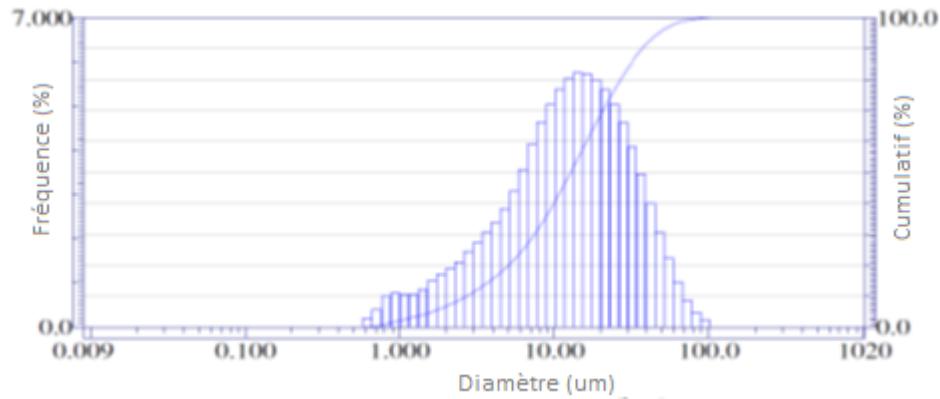


Figure 6.25 : Distribution volumique de la taille des particules des solides présents dans le résidu [33]

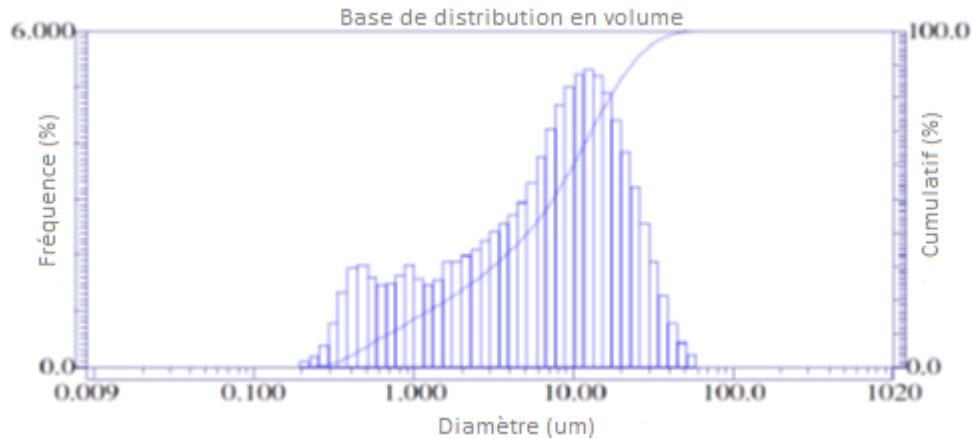


Figure 6.26 : Distribution volumique de la taille des particules de l'oxyde de fer catalyseur [33]

La viscosité des huiles présentes dans le résidu diminue fortement avec l’augmentation de la température. La viscosité passe de 130 à 15 cP en les réchauffant de 50 à 100 °C. Puisque la performance d’une filtration dépend directement de la viscosité du fluide, il est d’intérêt à diminuer celle-ci. Il est envisagé d’effectuer la filtration du résidu à environ 70°C de manière à diminuer la viscosité tout en limitant l’augmentation de la pression de vapeur des huiles. À cette température, la viscosité des huiles est similaire à

celle de l'huile de canola à température de la pièce (Figure 6.27), qui est la température des essais en laboratoire.

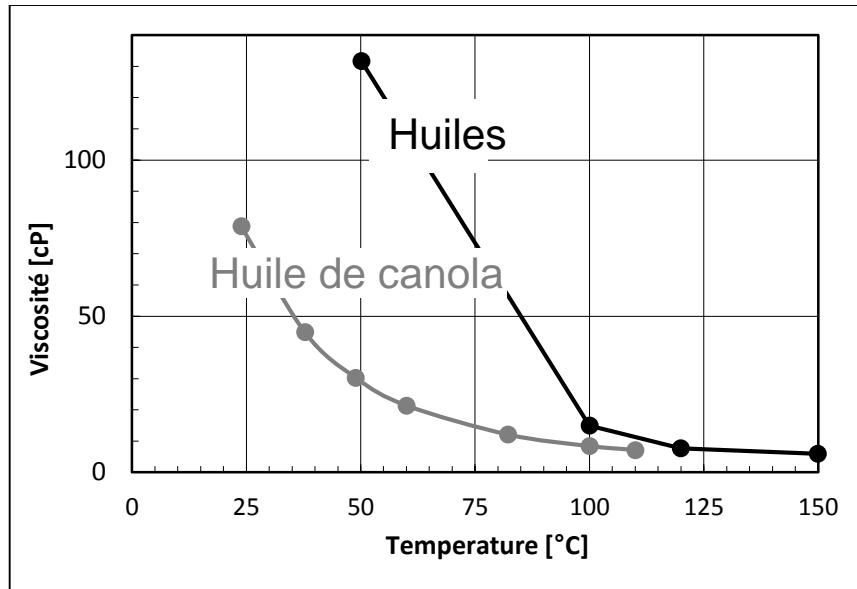


Figure 6.27 : Viscosité des huiles du résidu de la digestion du charbon et de l'huile de canola[33]

6.4.3.2. Filtration avec de l'huile de canola pure

Tout d'abord, un essai de filtration à débit constant avec de l'huile de canola pure a été effectué avec la méthode décrite à la section 5.2.1.3. Pour cet essai, un débit constant de 23 mL/min a été utilisé et deux couples de serrage des boulons de 56,5 Nm et 113 Nm ont été employés. Les résultats présentés à la Figure 6.28 démontrent que jusqu'à un volume de filtrat cumulatif d'environ 20 ml, la pression augmente très rapidement. Par la suite, un plateau de pression est atteint. L'augmentation initiale de la pression est associée avec l'augmentation de la pénétration de l'huile dans le vide présent entre les disques de filtration. Un fois que toutes les porosités du filtre sont remplies, la surface du disque

mouillée par l'huile n'augmente plus et la friction présente entre les disques et l'huile devient constante.

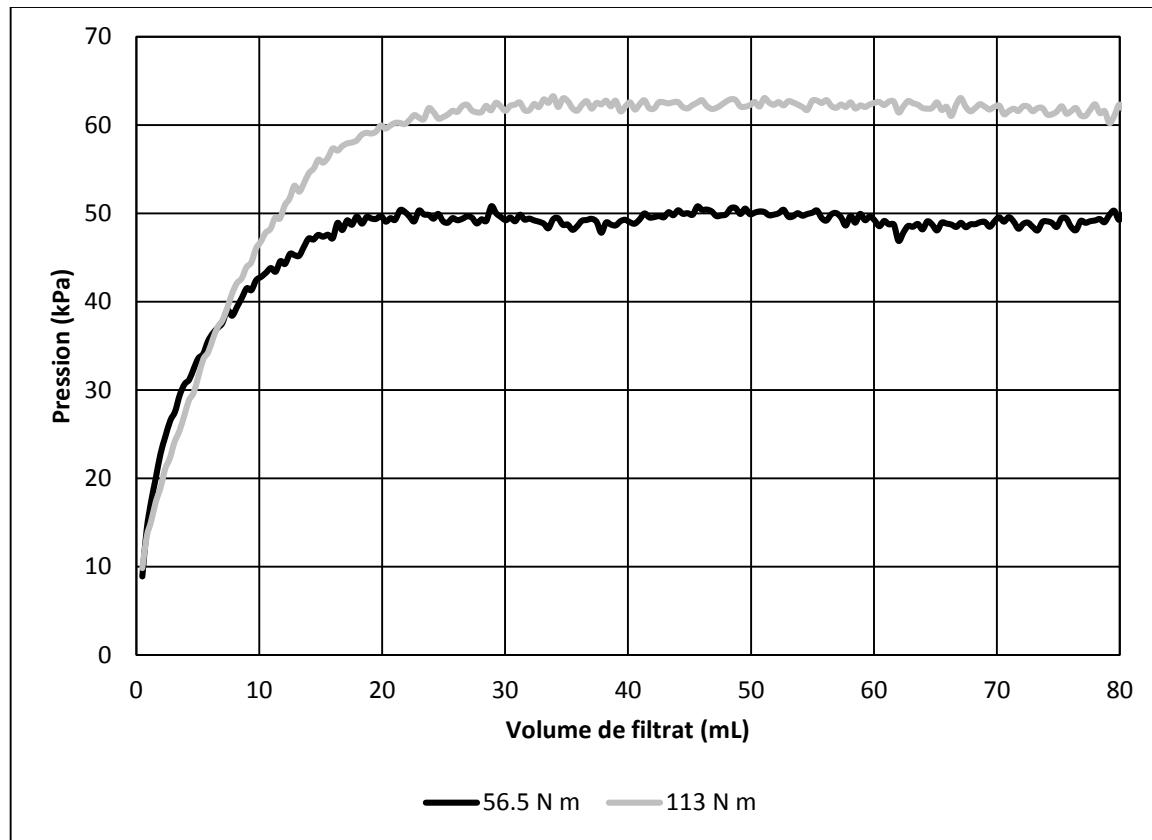


Figure 6.28 : Pression à l'intérieur du montage de filtration pour un débit constant d'huile de canola de 23 mL/min

La Figure 6.28 démontre également que l'augmentation du couple de serrage des boulons augmente la pression nécessaire pour filtrer l'huile de canola pure à un même débit. Il est raisonnable de croire que l'augmentation du couple de serrage des boulons diminue la porosité du filtre. Cette diminution de la porosité du filtre occasionne une augmentation des pertes de charges d'environ 12 kPa. Pour tous les autres essais de

filtration des résidus de la digestion du charbon, un couple de serrage de 56.5 Nm a été employé.

6.4.3.3. Filtration de la suspension à pression constante

La filtration de la suspension du mélange d'essai à pression constante a été effectuée en suivant la méthode à pression constante unique décrite à la section 5.2.1.1. Pour cet essai, une pression de 6895 kPa a été atteinte en partant d'une pression nulle avec une rampe linéaire de 460 kPa/min. Cette rampe linéaire de montée en pression est longue et ne permet pas de caractériser la résistance spécifique du gâteau. Elle a été retenue pour des raisons de sécurité et afin de ne pas endommager les équipements.

Pour déterminer l'épaisseur du gâteau, l'équation 4.29 est insérée dans l'équation 4.28 et l'épaisseur du gâteau est isolée pour obtenir :

$$e_c = r_0 - \sqrt{r_0^2 - \frac{V_f}{h_f \pi \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_0} - 1 \right)}} \quad (5.10)$$

L'épaisseur du gâteau en fonction du temps est présentée à la Figure 6.29. Le calcul d'épaisseur suppose que le gâteau se forme à sa fraction solide massique finale de 89 % (p/p) à tout moment.

Les résultats démontrent que 27 mm des 34,6 mm de gâteau sont formés pendant la montée en pression. Dans cette montée en pression, l'épaisseur du gâteau augmente très

rapidement et ralenti ensuite lorsque la consigne de pression est atteinte. Il est normal d'observer ce ralentissement de l'augmentation de l'épaisseur du gâteau puisque la résistance à la filtration augmente en fonction de l'épaisseur de celui-ci.

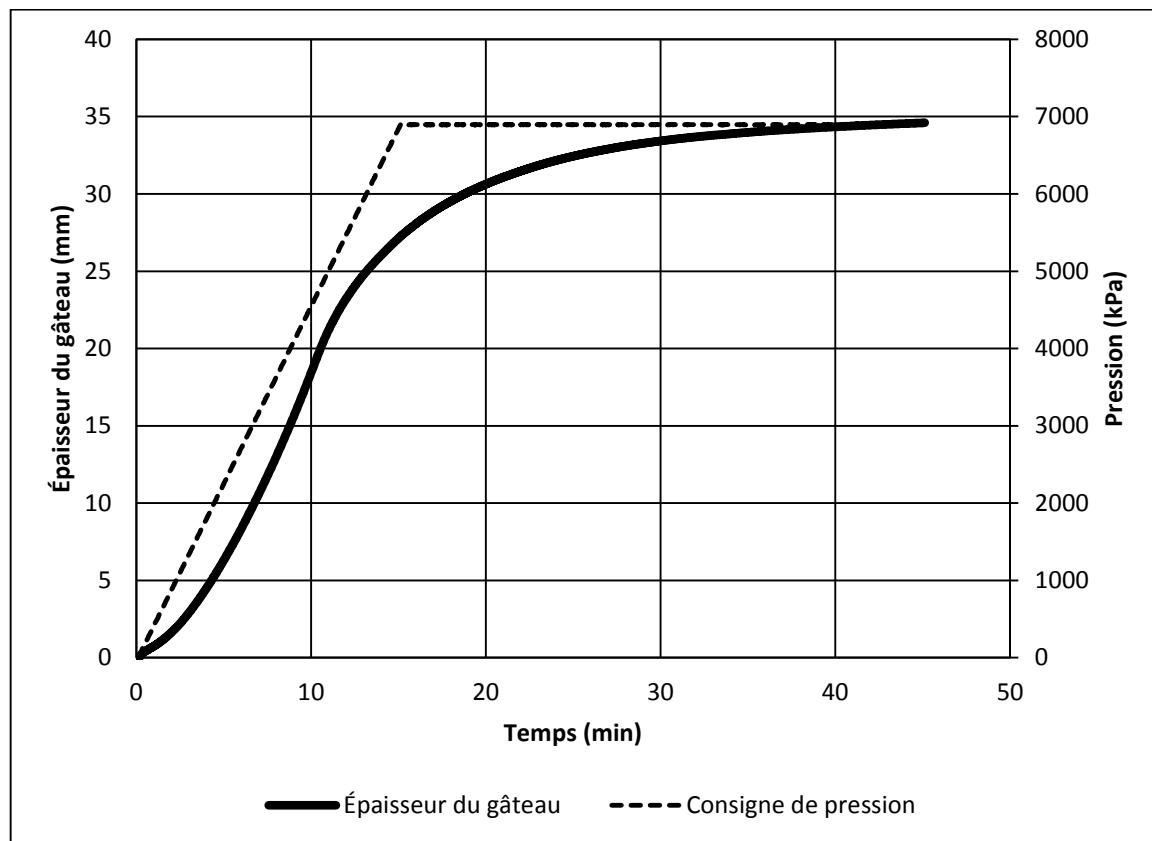


Figure 6.29 : Épaisseur du gâteau (89 % (p/p)) du mélange d'essai en fonction du temps pour une filtration à pression constante

La Figure 6.30 montre le gâteau formé à l'intérieur du montage de filtration radiale au terme de l'essai de filtration à pression constante. Sur cette figure, il est possible d'observer qu'une quantité de solution initiale n'a pas été filtrée. Pour pouvoir filtrer le liquide restant, un temps de filtration très long serait requis puisque la résistance induite par une épaisseur de 34,6 mm de gâteau est très grande.

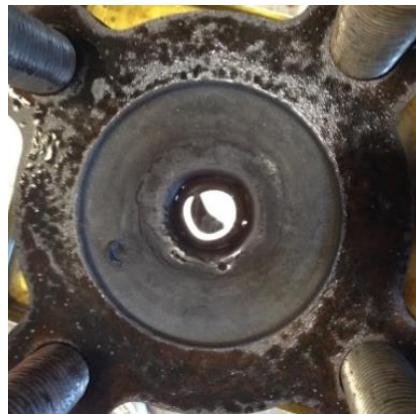


Figure 6.30 : Représentation du gâteau formé lors de l'essai de filtration à pression constante

6.4.4. Filtration de divers résidus miniers

6.4.4.1. Paramètres expérimentaux

La filtration des résidus miniers de la production du bore, de l'alumine et du fer est étudiée dans la présente section. Ces différents résidus miniers sont communément appelés boue grise, boue rouge et boue noire, respectivement. Tous les échantillons sont fournis par le Centre de Recherche et Développement d'Arvida de Rio Tinto. Tous ces résidus possèdent un potentiel d'augmentation de la siccité par filtration en vue de la disposition.

Afin de comparer ces divers résidus miniers, une filtration à pression constante de 5171 kPa avec la méthode de filtration à pression unique (5.2.1.1) est utilisée. La concentration initiale de chaque échantillon est de 450 g/L et le volume initial de boue est de 850 ml. Le Tableau 6.7 présente les paramètres expérimentaux du montage expérimental de filtration radiale.

Tableau 6.7 : Paramètres expérimentaux de la filtration de divers résidus miniers

Diamètre interne du filtre	0,1016 m
Épaisseur filtrante	0,0254 m
Hauteur du filtre	0,0445 m
Épaisseur des disques	1,52 mm
Matériel des disques	Acier inoxydable
Densité de fente	6,7 fentes/cm
Couple de serrage	56,5 Nm

6.4.4.2. Résultats de la filtration

La Figure 6.31 montre le volume de filtrat extrait de chaque suspension en fonction du temps. La filtration de la boue noire est légèrement plus efficace que celle de la boue rouge et largement supérieure à celle de la boue grise. Le volume total de filtrat est de 583 mL pour la boue noire, 567 mL pour la boue rouge et 120 mL pour la boue grise.

Les résultats démontrent que 93% de la masse de solide présente initialement dans la suspension de boue noire, 89% dans la boue rouge et 24% dans la boue grise ont été déposés sous forme de gâteau après 40 minutes. Une formation de gâteau aussi faible que 24% lors de la filtration de la boue grise démontre que la résistance induite par le gâteau formé est très grande et limite la filtration.

La fraction solide massique du gâteau de la boue noire est de 88,6% (p/p). La boue grise et la boue rouge ont atteint pour leur part une fraction solide massique de gâteau égale à 65% (p/p) et 70% (p/p) respectivement (Figure 6.32). Ces résultats démontrent que la compaction de la boue noire est supérieure à celle de la boue rouge et de la boue grise.

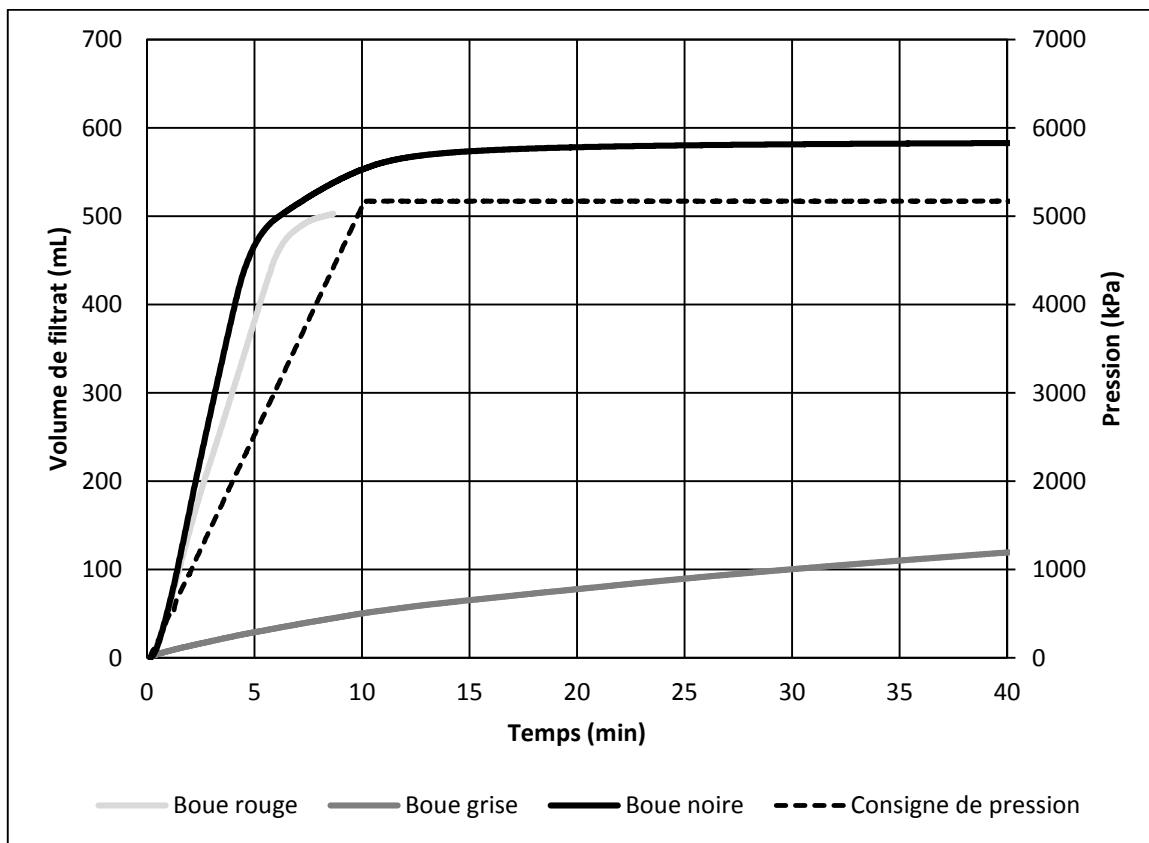


Figure 6.31 : Volume de filtrat en fonction du temps pour divers résidus miniers lors d'une filtration à pression constante

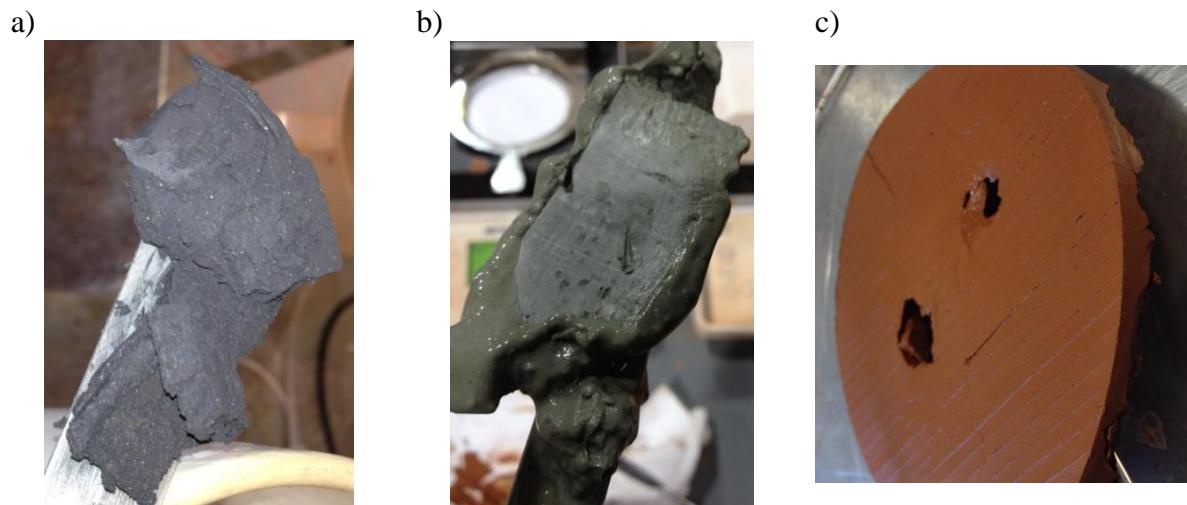


Figure 6.32 : Échantillon d'un gâteau de a) boue noire, b) boue grise et c) boue rouge

7**Conclusion**

L'objectif principal de ce mémoire était d'étudier la filtration sous haute pression de divers résidus miniers. Pour ce faire, différents montages expérimentaux comportant un filtre à plaques métalliques ont été conçus de manière à pouvoir filtrer ces résidus. L'utilisation d'un filtre à plaques métalliques permet de résister à la pression interne nécessaire pour effectuer la filtration tout en assurant la séparation solide-liquide.

L'étude du comportement rhéologique de la boue rouge a été effectuée, notamment la limite d'élasticité en compression, de la résistance spécifique massique ainsi que du taux de déposition des particules solides sous forme de gâteau. Cette partie a été effectuée avec le montage expérimental de filtration linéaire avec filtre à membrane. En observant la limite d'élasticité en compression de la boue rouge, les résultats ont permis de classifier son état comme étant une suspension, une pâte ou un gâteau selon sa fraction solide massique. Une méthode de filtration à pression étagée a été employée afin de déterminer la limite d'élasticité en compression de la boue rouge. Cette méthode, contrairement à la méthode de filtration à pression unique, a permis d'obtenir les résultats beaucoup plus rapidement en diminuant les manipulations nécessaires en laboratoire. Par contre, la méthode de filtration à pression unique doit être employée afin de tracer les courbes de filtration et déterminer les

autres propriétés. La caractérisation des propriétés rhéologiques de la boue rouge permet de pouvoir comparer la filtration de différents résidus miniers à celle-ci sans avoir à caractériser complètement leur comportement rhéologique.

Ce travail présente également les modèles mathématiques pour décrire la filtration linéaire et radiale sur gâteau. Ces modèles découlent de la loi de Darcy d'écoulement en milieu poreux et ont été adaptés pour de la filtration à pression ou à débit constant, pour des gâteaux compressibles et incompressibles. Dans le cas des résidus miniers, le modèle de filtration pour des gâteaux incompressibles a été utilisé. Afin d'étudier la filtration des suspensions avec les modèles mathématiques présentés, divers essais ont été effectués dans les montages de filtres à plaques linéaires et radiales. Dans le cas de la filtration radiale, le modèle est hautement complexifié par la réduction de la surface de filtration avec l'augmentation de l'épaisseur du gâteau.

L'utilisation de filtres à plaques s'avère une conception adaptée pour effectuer la filtration des résidus miniers sous haute pression. Avec les différents essais de filtration du présent travail, l'étude paramétrique de ce type de filtre a été effectuée. Dans le but d'améliorer la perméabilité, l'étude démontre que l'épaisseur filtrante et la force de compression des plaques doivent être minimisées tandis que la densité de plaques doit être augmentée. La rugosité de surface du matériel est la principale caractéristique pour le choix du type de matériel des plaques métalliques. Cette propriété est beaucoup plus importante que la mouillabilité du métal choisi. Les résultats semblent démontrer qu'une surface hydrophile améliore la perméabilité en laissant s'écouler plus facilement le filtrat au travers

du filtre. Par contre, cette propriété influence la perméabilité de manière beaucoup moins importante que la rugosité de surface des plaques. La rugosité est responsable de la fraction de vide du filtre, qui est directement reliée à la perméabilité de celui-ci. Une surface plus rugueuse augmentera de manière significative la perméabilité du filtre. Il a été démontré que l'acier inoxydable offre une faible perméabilité, due à sa surface peu rugueuse. Par contre, lorsque pulvérisé au jet de billes de verre, sa surface plus rugueuse permet d'obtenir une plus haute perméabilité. De plus, contrairement à l'acier qui est susceptible de s'oxyder, l'acier inoxydable est un matériel de choix pour ce type de filtre. Cependant, l'acier inoxydable est beaucoup plus dispendieux que l'acier. Un revêtement de surface tel que la peinture cuite permet de protéger l'acier de la corrosion tout en offrant au matériel une rugosité de surface permettant une haute perméabilité. Ce type de matériel permet une filtration optimale d'une suspension telle que la boue rouge.

La boue rouge a été le matériel de référence de cet ouvrage. Son potentiel de filtration a été comparé à divers résidus miniers, tels que les résidus de la production de bore, les résidus de la production du fer et les résidus de la digestion du charbon. Les résultats ont démontré que la séparation solide-liquide du résidu de la production du fer est similaire à celle de la boue rouge. Par contre, pour le résidu de la production du bore, le gâteau formé a une trop grande résistance, offrant un taux de déposition des particules solides trop faible. La filtration permet d'obtenir une haute fraction solide, mais le temps de filtration est très long. Le résidu de la digestion du charbon, contrairement aux autres résidus étudiés,

possède un filtrat visqueux. La technique de séparation solide-liquide de filtration sous haute pression s'avère efficace pour ce type de suspension.

Il serait intéressant de poursuivre l'étude du comportement rhéologique des divers résidus miniers présentés dans ce travail. Connaître la limite d'élasticité en compression et la résistance spécifique massique de chaque résidu permettrait d'optimiser la filtration en adaptant les paramètres d'opération. Il serait également intéressant de poursuivre l'étude de la filtration des résidus de la digestion du charbon en utilisant directement la suspension au lieu du mélange d'essai. Pour ce faire, le montage expérimental devra être adapté pour pouvoir chauffer la suspension pendant la filtration de manière à diminuer la viscosité du filtrat. De plus, un système de captation des HAP devra être installé afin d'éviter tout risque pour la santé des opérateurs de la presse hydraulique.

La filtration sous haute pression avec filtres à plaques est efficace pour augmenter significativement la fraction solide des résidus miniers. Pour répondre aux besoins de l'industrie, cette technique doit être adaptée. Les volumes de résidus produits sont très importants et la filtration, telle que présentée dans le présent travail, est un procédé en fournée nécessitant beaucoup de manipulations. De plus, le gâteau qui se forme en surface du filtre est responsable de la majorité de la résistance à la filtration. Une technologie permettant la filtration sous haute pression en continue, minimisant l'épaisseur de gâteau en surface du filtre, pourrait s'avérer très efficace pour l'industrie. Une presse à vis, entourée d'un filtre à plaques métalliques, pouvant être opérée à de très hautes pressions répondrait

aux besoins. Son filtre métallique pourrait être adapté en fonction du résidu à traiter selon les recommandations de cet ouvrage.

Bibliographie

1. Hind, A.R., S.K. Bhargava, and S.C. Grocott, *The surface chemistry of Bayer process solids: A review*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1999(146): p. 359-374.
2. G. Power, M.G., C. Klauber, *Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices*. Hydrometallurgy, 2011. **108**: p. 33-45.
3. Boivin, A., *Étude expérimentale sur le compactage de la boue rouge dans un décanteur semi-industriel*. 2004, UQAC. p. 195.
4. Usher, S.P., *Suspension dewatering characterisation and optimisation*, in *Department of chemical engineering*. 2002, The University of Melbourne: Victoria, Australia. p. 326.
5. P. Aimar, P.B., A. Maurel, *Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) - Aspects théoriques: mécanismes de transfert*. Technique de l'ingénieur, 2010.
6. Shirato, M., *Filtration*. D. Eng. Diss. Nagoya Univ. Japan, 1960.
7. Shirato, M., *Verification of internal flow mechanism theory of cake filtration*. Filtration, 1972. **Sep. 9**: p. 290-297.
8. Shirato, M., *Principles of expression and design of membrane compression-type filter press operation*. Encyclopedia of fluid mechanics, 1986. **Vol. 5**.
9. Shirato, M., *Constant pressure expression of solid-liquid mixtures with medium resistance*. J. Chem. Eng. Jpn., 1977. **10**: p. 154-159.
10. Shirato, M., *Internal flow mechanism in filter cake*. AIChE Journal, 1969. **15**(3): p. 405-409.
11. Shirato, M., *Fundamental analysis for expression under constant pressure*. Filtration, 1970. **Sep. 7**: p. 277-282.
12. Shirato, M., *Calculations of consolidation period in expression operations*. J. Chem. Eng. Jpn., 1974. **7**: p. 229-231.
13. Lee, D.J., Wang C. H., *Theories of cake filtration and consolidation and implications to sludge dewatering*. Water research, 1999. **Vol. 34**(No. 1): p. 1-20.
14. Civan, F., *Incompressive cake filtration: Mechanism parameters, and modeling*. AIChE Journal, 1998. **44**(11).
15. Civan, F., *Practical model for compressive cake filtration including fine particle invasion*. AIChE Journal, 1998. **Vol. 44**(No. 11): p. 2388-2397.

16. Rahul Konnur, S.R., *Parameter estimation and simulation of dependence of constant pressure batch dewatering on initial solids concentration*. International journal of mineral processing, 2007. **81**: p. 248-255.
17. Brigitte L. Sorensen, K.K., Steffen L. Lauritzen, *A theoretical model for blinding in cake filtration*. Water environment research, 1997. **69**: p. 168.
18. Bernd Reichman, J.T., *Expression behaviour of fine particle suspensions and the consolidated cake strength*. Powder technology, 2001. **121**: p. 182-189.
19. Wakeman, R., *The influence of particle properties on filtration*. Separation and purification technology, 2007. **58**: p. 234-241.
20. Plouraboué, F., et al., *Geodesic network method for flows between two rough surfaces in contact*. Physical Review E, 2006. **73**(3): p. 036305.
21. Varnik, F. and D. Raabe, *Scaling effects in microscale fluid flows at rough solid surfaces*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2006. **14**(5): p. 857-873.
22. Svarovsky, L., *Solid liquid separation*. 3rd ed. 1990, England: Butterworth & Co. 716.
23. Powell, S.T., *Water conditionning for industry*. 1954, New York: McGraw-Hill.
24. Lau, Y.L., *Temperature effect on settling velocity and deposition of cohesive sediment*. Journal of hydraulic research, 1994. **32**(1): p. 41-51.
25. Wallis, G.B., *A simplified one-dimensional two-component vertical flow*. Inst. Chem. Eng. Symp. on interaction between fluids and particles, 1962. **19**: p. 9-16.
26. Wakeman, R.J. and E.S. Tarleton, *Filtration - Equipement selection modelling and process simulation*. 1st ed. 1999, Great Britain: Elsevier Advanced Technology. 446.
27. Barnes, H.A. and Q.D. Nguyen, *Rotating vane rheometre - A review*. Journal of Non-Newtonian fluid mechanics, 2001. **98**: p. 1-14.
28. Jewell, R.J. and A.B. Fourie, *Paste and Thickened Tailings - A Guide*. Second edition ed. 2006: Australian Center for Geomechanics.
29. Grossiord, J.-L. and G. Couarrazé, *Initiation à la rhéologie*. 3e ed. 2000, Paris: Édition TEC & DOC. 300.
30. Nguyen, Q.D. and D.V. Boger, *Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspensions*. Rheological Acta, 1985. **24**: p. 427-437.
31. Schramm, G., *A practical approach to rheology and rheometry*. 2nd ed. 1998, Federal Republic of Germany: Thermo Haake. 267.
32. Howells, I., et al., *Time dependent batch settling of flocculated suspensions*. Appl. Math. Model, 1990. **14**: p. 77-86.

33. Gravel, S. and H. Darmstadt, *Solid/Liquid separation of coal digest - Proof of concept tests performed at the Université du Québec à Chicoutimi*. Rio Tinto Alcan technical letter, 2013. **ARDC**.

Annexes

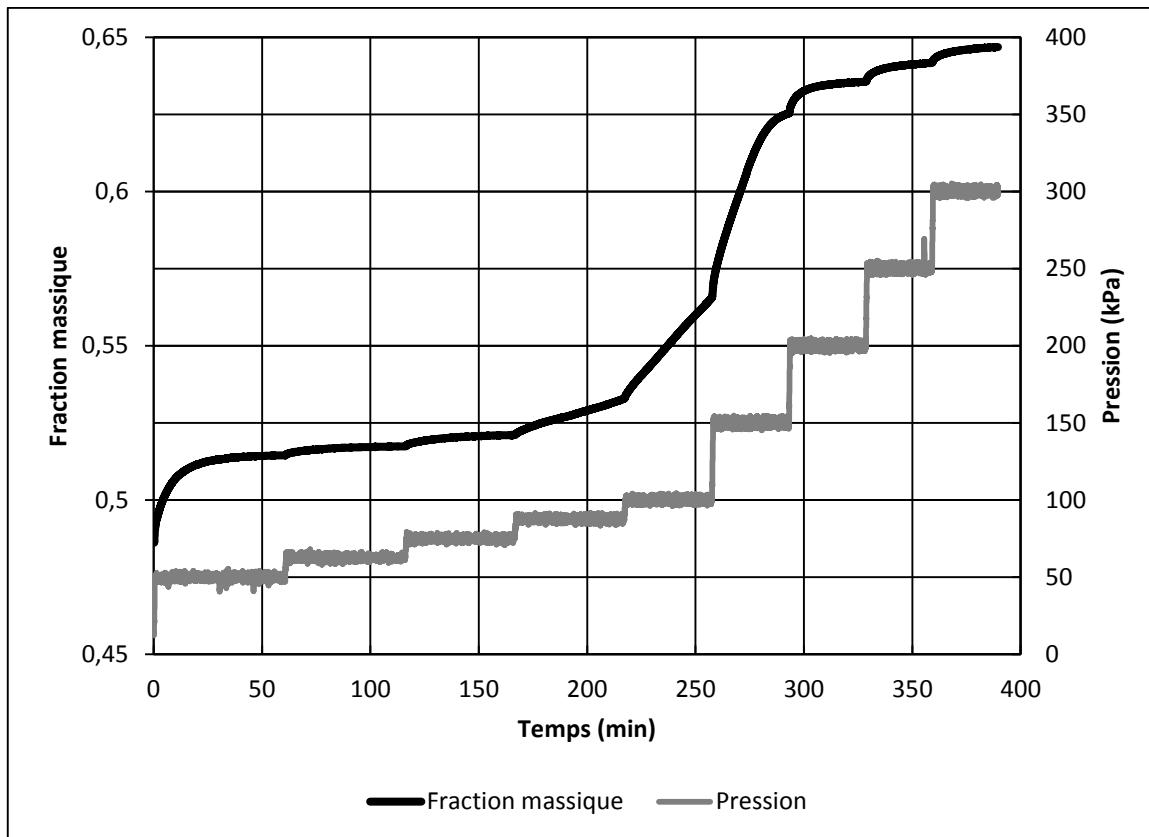


Figure 7.1: Évolution de la fraction massique moyenne de la boue rouge en fonction du temps lors du premier essai de filtration avec la méthode à pression étagée

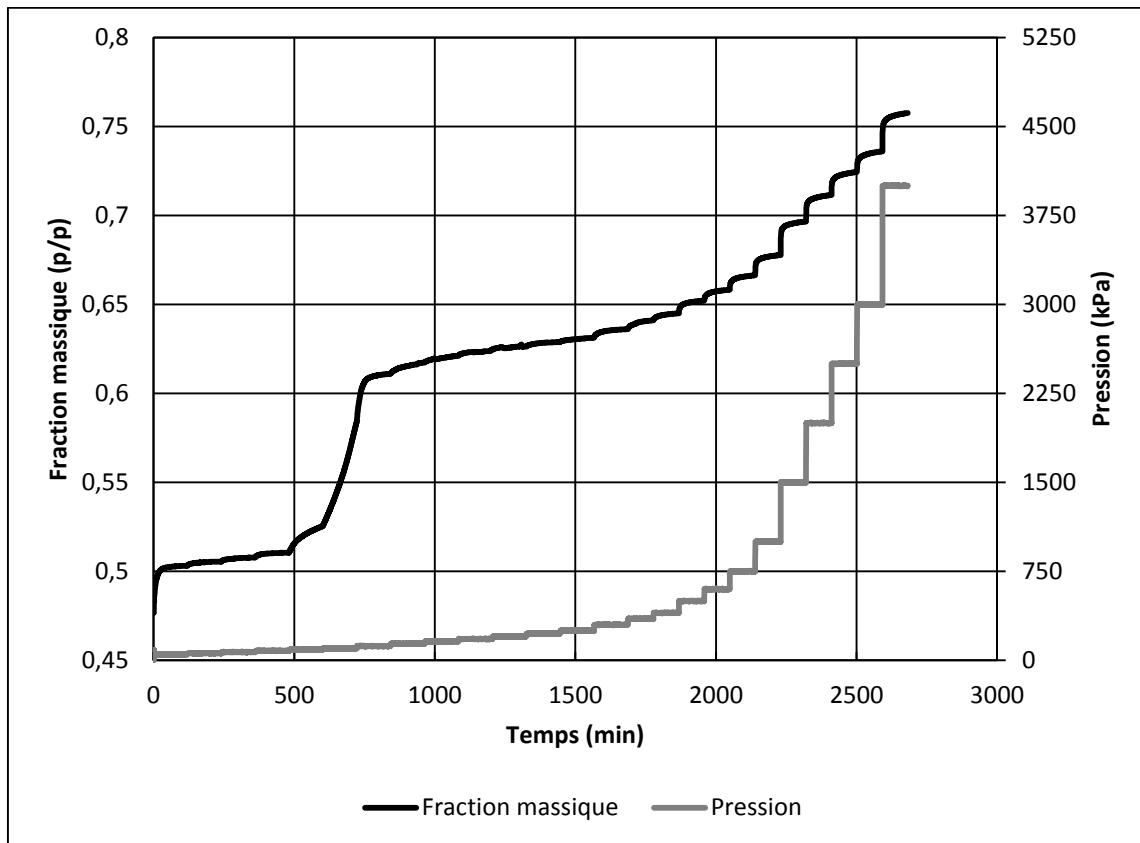


Figure 7.2: Évolution de la fraction massique moyenne de la boue rouge en fonction du temps lors du second essai de filtration avec la méthode à pression étagée

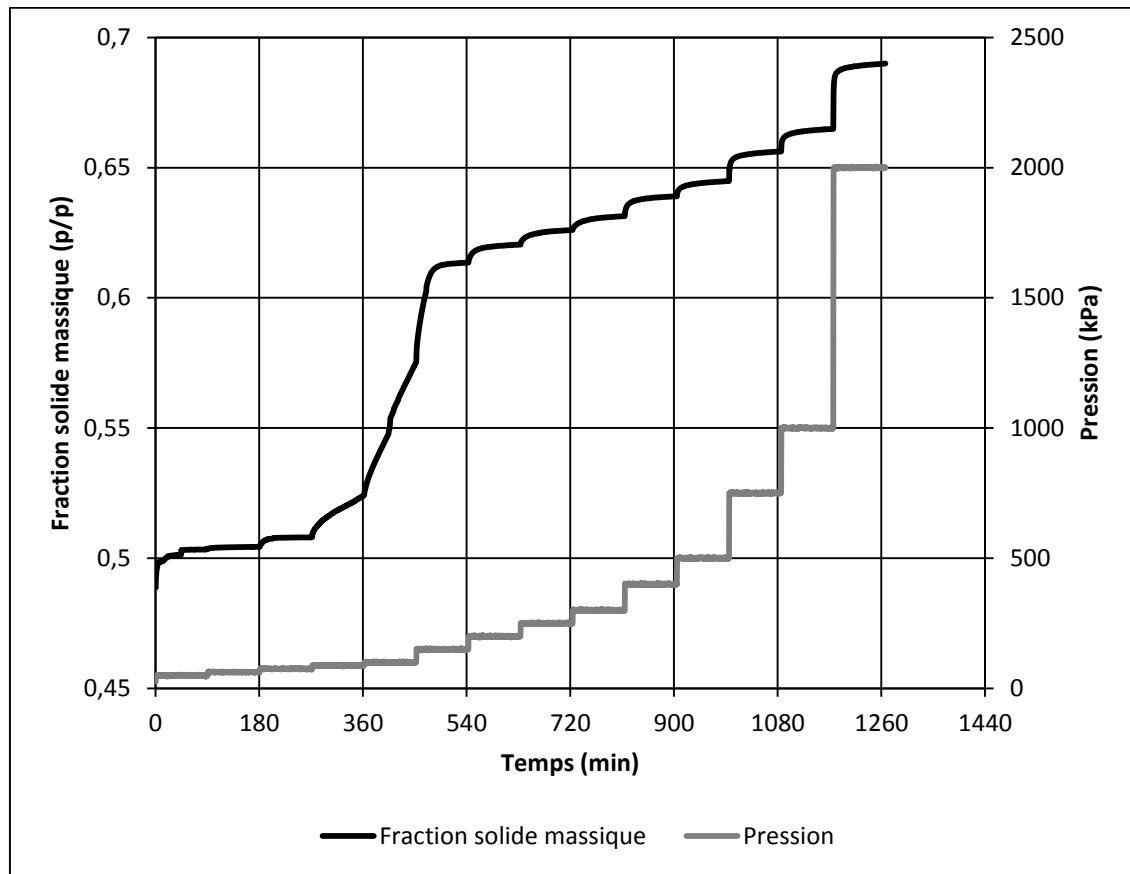


Figure 7.3: Évolution de la fraction massique moyenne de la boue rouge en fonction du temps lors du troisième essai de filtration avec la méthode à pression étagée