

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI**

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

Par  
Alain Boivin  
Bacc. en Chimie

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LE COMPACTAGE DE LA  
BOUE ROUGE DANS UN DÉCANTEUR SEMI-INDUSTRIEL**

Juillet 2004



### **Mise en garde/Advice**

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

**À mon grand-père Herman**

## Sommaire

Le procédé Bayer est utilisé dans l'industrie de l'aluminium pour extraire l'alumine de la bauxite. Une des étapes critiques de ce procédé est la décantation par gravité des impuretés contenues dans la bauxite préalablement mise en solution. Lors de cette séparation, la liqueur contenant l'alumine en solution est récupérée à la surverse du décanteur tandis que les résidus solides sont évacués par le puits de décharge situé au fond. Durant l'évacuation des résidus, une certaine quantité de liqueur Bayer emprisonnée à l'intérieur de la boue se trouve elle aussi évacuée. Pour optimiser cette séparation, il faut diminuer la quantité de liqueur évacuée et, par conséquent, optimiser le compactage de la boue rouge.

Le compactage de la boue rouge est favorisé par l'introduction de grandes structures au fond des décanteurs appelées, râteaux. Ces râteaux, en plus d'augmenter le compactage de la boue, doivent favoriser son déplacement vers le puits de décharge. Le but de ce projet de maîtrise est d'améliorer l'efficacité des décanteurs et de comparer l'efficacité de différentes configurations de râteaux à compacter et déplacer la boue.

Pour évaluer l'efficacité des différentes configurations de râteau, les essais sont effectués, en continu, avec de la boue rouge flokulée à l'intérieur d'un décanteur pilote d'échelle 1 :11. Des débitmètres massiques sont placés à la surverse et à la sousverse du décanteur pour mesurer les quantités et les concentrations, tandis qu'une cellule de charge est placée sur l'arbre du râteau pour mesurer le couple.

Les résultats obtenus montrent que l'espacement entre les lames du râteau est un facteur très important sur le compactage et le déplacement de la boue; si cette espacement est trop faible, il y a obstruction du râteau; si l'espacement est trop grand, le compactage est faible. Les résultats montrent aussi que le décentrage du puits d'alimentation permet la distribution du sable dans tout le volume boue du décanteur, ce qui augmente grandement la stabilité du couple et de la sousverse.

## Remerciements

Je me dois ici de remercier plusieurs personnes sans lesquelles ce projet n'aurait pu prendre forme, se réaliser et s'achever.

Je voudrais d'abord remercier M. Guy Simard, mon directeur de maîtrise, pour avoir été l'instigateur de ce projet et, pour m'avoir aidé à le réaliser.

Mes remerciements s'adressent également à M. Guy Peloquin, chargé de projets au Centre de Recherche et Développement d'Arvida (CRDA), pour ses encouragements et ses conseils lors de l'accomplissement de ce projet.

Je remercie aussi M. André Leclerc pour l'aide précieuse apportée lors du développement de certaines équations mathématiques.

Je remercie également M. Rock Lemyre et M. Rénald Dufour, techniciens au CRDA, pour leurs conseils et l'énergie mise dans la réalisation de chacune des expériences.

Mes remerciements vont aussi à la société Alcan, pour son support financier tout au long de mes études de 2<sup>ième</sup> cycle. Le niveau et la qualité de la recherche appliquée réalisée à l'UQAC bénéficient grandement de la contribution financière et technique de la compagnie Alcan.

Je remercie M. Patrice Paquet pour les bons conseils, techniques et autres, si généreusement partagés.

Je voudrais finalement remercier ma famille pour l'appui et la compréhension dont elle a fait preuve tout au long de ce projet.

## Nomenclature

A	Aire	$\text{m}^2$
$A_e$	Coefficient d'efficacité	-
B	Induction magnétique	T
C	Concentration	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
C	Compactage	%
$C_D$	Coefficient de traînée	-
$C_L$	Coefficient de poussée	-
$C_s$	Facteur de forme	-
d	Diamètre	m
D	Coefficient de diffusion	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
E	Champs électrique	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
E	Énergie	$\text{N}\cdot\text{m}$
$E_A$	Énergie attractive	$\text{N}\cdot\text{m}$
$E_R$	Énergie répulsion	$\text{N}\cdot\text{m}$
F	Facteur de jauge	-
F	Force	N
$F_c$	Force de Coriolis	N
$F_D$	Force de traînée	N
$F_g$	Force de gravité	N
$F_L$	Force de Magnus	N
$F_s$	Fraction solide	-
g	Accélération gravitationnelle	$9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
G	Gradient de vitesse	$\text{s}^{-1}$
h	Hauteur	m
I	Indice de stabilité	-
$J_x$	Flux de matière selon x	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}$

L	Longueur	m
m	Masse	kg
M	Couple du râteau	N·m·rad <sup>-1</sup>
N <sub>v</sub>	Nombre de particules par unité de volume	m <sup>-3</sup>
P	Poids	kg
P <sub>y</sub>	Force de compression solide	Pa
q	Charge électrique	C
Q	Débit volumique	m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
r	Rayon	m
R	Résistance	Ohm
S	Surface	m <sup>2</sup>
S <sub>p</sub>	Surface projetée	m <sup>2</sup>
t	Temps	s
T	Température	K
T <sub>c</sub>	Taux de compactage	%
T <sub>R</sub>	Temps de résidence	h
u	Vitesse perpendiculaire au bras du râteau	m/s
u <sub>ii</sub>	Vitesse tangentiel de la lame	m/s
v	Vitesse	m·s <sup>-1</sup>
v <sub>r</sub>	Vitesse relative	m·s <sup>-1</sup>
v <sub>f</sub>	Vitesse de sédimentation	m·s <sup>-1</sup>
V	Volume	m <sup>3</sup>

#### Lettres grecques

$\alpha$	Angle	rad
$\beta$	Viscosité plastique	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation	s <sup>-1</sup>
$\varepsilon$	Déformation	-
$\eta$	Viscosité absolue	kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>

$\theta$	Angle	rad
$\kappa$	Constante de Boltzmann	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
$\mu_{\text{rel}}$	Viscosité relative	-
$\mu_{\text{sp}}$	Viscosité spécifique	-
$\mu$	Viscosité dynamique	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
$\rho$	Densité	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho$	Fraction massique	%
$\tau$	Contrainte de cisaillement	Pa
$\tau_c$	Seuil de cisaillement	Pa
$\nu$	Viscosité cinématique	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
$\phi$	Fraction volumique	%
$\phi_g$	Fraction volumique (gel point)	%
$\psi$	Facteur de correction	-
$\omega$	Vitesse angulaire	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

#### Lettres indicielles

a <sub>m</sub>	Masse ajoutée	-
b	Corps de la solution	-
b <sub>s</sub>	Boue sèche	-
c	Cône	-
i	Inertie	-
L	Liquide ou fluide	-
p	Particule	-
r	Râteau	-
s	surface	-

#### Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds	$\frac{\rho u L}{\mu}$
----	--------------------	------------------------

## Table des matières

<b>SOMMAIRE</b>	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>IV</b>
<b>NOMENCLATURE</b>	<b>V</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>XIX</b>
<b>1 INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 OBJECTIFS ET PROBLÉMATIQUE	7
1.2 REVUE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS	10
<b>2 TECHNIQUES DE SÉPARATION SOLIDE-LIQUIDE</b>	<b>14</b>
2.1 INTRODUCTION	14
2.2 LA SÉPARATION SOLIDE-LIQUIDE	14
2.3 LES PROCÉDÉS DE SÉPARATION SOLIDE-LIQUIDE	16
2.3.1 <i>La flottation</i>	17
2.3.2 <i>La sédimentation par gravité</i>	17
2.3.3 <i>La sédimentation centrifuge</i>	17
2.3.3.1 Les hydrocyclones	17
2.3.3.2 Les centrifuges	18

2.3.4 <i>La filtration</i>	18
2.3.5 <i>Le tamisage</i>	18
2.4 LA CARACTÉRISATION DES PARTICULES EN SUSPENSION	19
2.4.1 <i>La définition du concept de taille des particules</i>	20
2.4.2 <i>Les types de distribution des particules</i>	22
<b>3 LA FLOCULATION ET LA COAGULATION</b>	<b>24</b>
3.1 INTRODUCTION	24
3.2 LES INTERACTIONS ENTRE LES PARTICULES ET LA STABILITÉ	25
3.3 LA COAGULATION	28
3.4 LA FLOCULATION	30
3.4.1 <i>Le mécanisme de la floculation</i>	33
3.4.2 <i>Les types de mécanismes de floculation</i>	36
3.4.3 <i>Agents de coagulation et de floculation</i>	38
3.4.3.1 Inorganiques	38
3.4.3.2 Synthétiques organiques	39
3.4.4 <i>Facteurs influençant la floculation</i>	41
3.4.5 <i>Implication pratique</i>	42
<b>4 LA DÉCANTATION DES PARTICULES DE BOUE ROUGE</b>	<b>44</b>
4.1 INTRODUCTION	44
4.2 LA SÉDIMENTATION DES PARTICULES	45
4.2.1 <i>Phénomène de la sédimentation à trois phases</i>	45

<i>4.2.2 Les forces agissant sur une particule</i>	48
4.2.2.1 La force de traînée $F_D$	48
4.2.2.2 La force de Magnus « lift force »	49
4.2.2.3 L'inertie du fluide	50
4.2.2.4 La diffusion Brownienne	50
4.2.2.5 Les forces de corps électromagnétiques	50
<i>4.2.3 La vitesse de sédimentation</i>	51
<i>4.2.4 Calculs des vitesses de sédimentation à l'intérieur du décanteur</i>	56
4.2.4.1 La pulpe non floculée	56
4.2.4.3 Le sable à l'intérieur de la boue	60
4.2.4.4 La pulpe floculée	62
<i>4.2.5 Facteurs influençant la sédimentation</i>	65
4.2.5.1 La nature des particules	65
4.2.5.2 L'effet de la concentration des particules	66
4.2.5.3 La nature du pré-traitement	68
4.2.5.4 La différence de densité entre le fluide et les particules	68
4.2.5.5 Infrastructures servant à la décantation	68
<b>5 LA RHÉOLOGIE DE LA BOUE ROUGE</b>	70
<b>5.1 INTRODUCTION</b>	70
<b>5.2 GÉNÉRALITÉS</b>	70
<i>5.2.1 Déformation et vitesse de cisaillement</i>	71
5.2.1.1 Les déformations de cisaillement	71

5.2.1.2	Vitesse de cisaillement	73
5.2.2	<i>Équation rhéologique d'état et rhéogramme</i>	73
5.2.3	<i>Les viscosités</i>	74
5.2.3.1	La viscosité dynamique ou viscosité apparente	74
5.2.3.2	La viscosité cinématique	76
5.2.3.3	Les viscosités relative, spécifique et intrinsèque	76
5.3	LES PROPRIÉTÉS DU MODE D'ÉCOULEMENT DE LA BOUE ROUGE	77
5.3.1	<i>La viscosité, la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation</i>	77
5.3.2	<i>Facteurs influençant la viscosité de la boue rouge</i>	81
5.3.2.1	La concentration solide	82
5.3.2.2	La floculation	83
5.3.2.3	Le sable	83
5.3.3	<i>Étude rhéologique de la boue rouge</i>	84
5.3.4	<i>L'écoulement de la boue en fonction de la viscosité</i>	87
5.3.5	<i>La thixotropie</i>	90
<b>6</b>	<b>LE COMPACTAGE DE LA BOUE ET LES RÂTEAUX</b>	<b>92</b>
6.1	LE COMPACTAGE DE LA BOUE	92
6.1.1	<i>Le compactage</i>	92
6.1.2	<i>Le «gel point»</i>	94
6.1.3	<i>La force de compression solide ou «Compressive yield stress»</i>	96
6.1.3.1	Détermination de la force de compression solide	98
6.1.4	<i>Facteurs influençant le compactage</i>	99

<i>6.1.5 Le seuil de cisaillement ou «shear yield stress»</i>	100
<b>6.2 LES RÂTEAUX</b>	104
<i>6.2.1 Le couple du râteau</i>	105
6.2.1.1 Expression du cisaillement $\tau$ pour un point donné sur la lame	106
6.2.1.2 Expression de la force appliquée en un point sur la lame	109
6.2.1.3 Expression du couple appliqué sur une lame	111
6.2.1.4 Détermination des angles $\theta_+$ et $\theta_-$	114
<i>6.2.2 Le déplacement de la boue rouge vers le puits de décharge</i>	116
<b>7 MONTAGE EXPÉRIMENTAL</b>	121
<b>7.1 MONTAGE EXPÉRIMENTAL</b>	121
<i>7.1.1 Description du montage</i>	122
<i>7.1.2 Description des instruments de mesure</i>	132
7.1.2.1 Les thermocouples	132
7.1.2.2 Le torque senseur et les cellules de charge	133
7.1.2.3 Les débitmètres Coriolis	135
<b>7.2 DESCRIPTION DES ESSAIS RÉALISÉS ET MODIFICATIONS DU MONTAGE</b>	136
<i>7.2.1 Les essais thermiques</i>	137
7.2.1.1 Les paramètres expérimentaux	137
7.2.1.2 Protocole expérimental	138
<i>7.2.2 Les essais sur les trois configurations de râteau</i>	140
7.2.2.1 Les paramètres expérimentaux	140
7.2.2.2 Protocole expérimental	140

<i>7.2.3 Essais avec le puits décentré</i>	141
7.2.3.1 Les paramètres expérimentaux	141
7.2.3.2 Protocole expérimental	142
<i>7.3 MÉTHODE D'ANALYSE</i>	143
<i>7.3.1 Les fractions solides</i>	143
<i>7.3.2 Le traitement des données</i>	144
7.3.2.1 Les données thermiques	144
7.3.2.2 Les données de couple et de force	144
7.3.2.3 Les données du débitmètre Coriolis	144
<i>7.3.3 Les erreurs sur les mesures</i>	145
<b>8 RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>146</b>
<i>8.1 LE DÉPLACEMENT DE LA BOUE SOUS L'EFFET DU RÂTEAU EN FOURNÉE</i>	147
<i>8.2 LE DÉPLACEMENT DE LA BOUE EN SYSTÈME CONTINU AVEC FLOCULATION, SOUS TROIS DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DE RÂTEAU</i>	152
<i>8.2.1 Les trois configurations de râteaux étudiées</i>	153
<i>8.2.2 Comparaison entre les trois configurations de râteaux étudiées</i>	156
<i>8.2.3 Coefficient d'efficacité des râteaux</i>	169
<i>8.3 ÉTUDE SUR LA FORMATION DU NOYAU</i>	172
<b>9 CONCLUSION</b>	<b>186</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>189</b>

## Liste des figures

Figure 1. 1 Raffinerie Queensland Alumina en Australie.	1
Figure 1. 2 Diagramme du procédé Bayer.	2
Figure 1. 3 Décanteur de boue rouge.	4
Figure 1. 4 Schéma d'un décanteur.	5
Figure 1. 5 Vue d'un bras d'un râteau.	6
Figure 2. 1 Schéma d'un séparateur.	15
Figure 2. 2 Classification des procédés de séparation solide-liquide.	16
Figure 2. 3 Guide de sélection des équipements de séparation solide-liquide.	19
Figure 3.1 Rapprochement de deux particules de même charge.	26
Figure 3.2 (A) Courbes de répulsion. (B) Courbe d'attraction entre deux particules de même charge.	26
Figure 3. 3 Courbes d'énergie potentielle pour deux particules se rapprochant].	27
Figure 3. 4Courbes d'énergie potentielle : (A) particules stabilisés. (B) particules coagulées	29
Figure 3.5 Exemples de monomères et de poly-électrolytes.	32
Figure 3. 6 (A) Polymères formant des ponts entre les particules. (B) Particules stables par adsorption de polymères.	34
Figure 3. 7 Floculation par neutralisation de la charge et formation de ponts.	35

Figure 3. 8 (A) Homopolymère-polyacrylamide. (B) Monomère acrylique hydrolysé	40
Figure 3. 9 Boue floculée à l'intérieur de la liqueur Bayer (flocs).	42
Figure 4. 1 Graphique continu des phases observées durant la sédimentation.	47
Figure 4. 2 Sédimentation d'une suspension floculée.	47
Figure 4. 3 (A) Circulation et force de Magnus ( $F_L$ ) appliquée sur un cylindre.	49
Figure 4. 4 Particule en mouvement dans un fluide.	52
Figure 4. 5 Flocs.	62
Figure 4. 6 Ligne de boue ou «mud line» à l'intérieur d'un cylindre gradué.	63
Figure 4. 7 Représentation du voile de boue.	64
Figure 4. 8 Effet de la concentration sur la sédimentation.	67
Figure 4. 9 Schéma simplifié d'un décanteur.	69
Figure 5. 1 Plan de cisaillement.	71
Figure 5. 2 Représentation de l'angle $\alpha$ .	72
Figure 5. 3 Représentation d'un rhéogramme.	75
Figure 5. 4 (a) Rhéogramme d'un corps fluidisant. (b) Variation de la viscosité d'un corps fluidisant.	78
Figure 5. 5 Rhéogramme de la boue rouge (corps de Casson).	79
Figure 5. 7 Boue rouge à la sortie du décanteur pilote (densité $\approx 1800 \text{ kg/m}^3$ ).	82
Figure 5. 6 Rhéogramme de la boue rouge (fluide de Casson, thixotrope).	91

Figure 6. 1 Percolation du fluide à travers les particules de boue.	93
Figure 6. 2 Illustration et localisation du «gel point».	95
Figure 6. 3 (A) Force de compression solide. (B) Contrainte de cisaillement.	102
Figure 6. 4 Écoulement visqueux autour d'une structure ronde.	103
Figure 6. 5 Bras d'un râteau étudié dans le décanteur pilote.	104
Figure 6. 6 Schéma simplifié d'un râteau à une lame.	105
Figure 6. 7 Illustration des différents angles et distances qui se retrouvent sur une lame et qui permettent le calcul du cisaillement.	106
Figure 6. 8 Représentation des composantes de vitesse d'une lame d'un râteau.	107
Figure 6. 9 Illustration de la loi des sinus.	108
Figure 6. 10 Illustration de l'égalité donnée par l'équation 6.16.	110
Figure 6. 11 Représentation des composantes du couple appliqué sur une lame.	111
Figure 6. 12 Surface effective d'une lame de râteau.	117
Figure 6. 13 Différents design de râteau : (a) design conventionnel; (b) design	120
Figure 7. 1 Photo du montage expérimental.	121
Figure 7. 2 Plan détaillé du réservoir de liqueur.	122
Figure 7. 3 Plan et dimension d'un homogénéisateur.	124
Figure 7. 4 Vue en plan du décanteur.	125

Figure 7. 5 (A) Photo d'une dent instrumentée fixée sur le bras du râteau. (B) Cellule de charge et lame.	127
Figure 7. 6 (A) Alimentation et surverse. (B) Mélangeur statique.	129
Figure 7. 7 Puits d'alimentation.	130
Figure 7. 8 (A) Boucle de recirculation. (B) Sous-verse.	131
Figure 7. 9 Thermocouple utilisé.	132
Figure 7. 10 Effet thermocouple.	133
Figure 7. 11 Description détaillée d'une jauge à pellicule.	134
Figure 7. 12 Trois différents types de jauge.	135
Figure 7. 13 Puits d'alimentation utilisé pour les essais thermiques et les essais de comparaison des trois râteaux.(A) Vue verticale. (B) Vue en plan.	137
Figure 7. 14 (A) Disposition des thermocouples sur le râteau. (B) Endroit où le	139
Figure 8. 1 Déplacement de la boue en fonction du nombre de tours effectués.	149
Figure 8. 2 Isosurface après 18 tours.	151
Figure 8. 3 Demi-râteau à lame progressive (configuration originale).	154
Figure 8. 4 (A) Râteau complémentaire. (B) Râteau à trois lames et un seul bras.	156
Figure 8. 5 Couple et fraction solide vs temps pour le râteau à 5 lames et 1 bras.	157
Figure 8. 6 Couple et fraction solide vs temps pour le râteau à 5 lames et 2 bras.	159
Figure 8. 7 Couple et fraction solide vs temps pour le râteau à 3 lames et 1 bras.	160
Figure 8. 8 Comparaison du couple des trois configurations de râteau vs temps.	161

Figure 8. 9 Comparaison du % de fraction solide à la sousverse en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.	164
Figure 8. 10 Comparaison du % de sable à la sousverse en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.	165
Figure 8. 11 Comparaison du % de particules fines à la sousverse en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.	166
Figure 8. 12 Comparaison du coefficient d'efficacité en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.	171
Figure 8. 13 Illustration de la formation du noyau.	173
Figure 8. 14 (A), (B) Exemples de noyau.	175
Figure 8. 15 Intérieur du noyau.	175
Figure 8. 16 (A) Couple et %FS vs temps. (B) Vitesse râteau vs temps.	178
Figure 8. 17 Distribution du sable et de la fraction solide pour le puits centré et décentré avec une alimentation en sable de 28%.	180
Figure 8. 18 Comparaison entre les pourcentages fraction solide à la sousverse pour différentes expériences.	182
Figure 8. 19 Illustration du calcul de l'indice d'instabilité.	183

## Liste des tableaux

Tableau 2. 1 Définitions s'appliquant au diamètre sphérique équivalent [41].	20
Tableau 2. 2 Définitions s'appliquant au diamètre circulaire équivalent [41].	21
Tableau 2. 3 Définitions s'appliquant au diamètre statistique [43].	21
Tableau 3. 1 Choix du poids moléculaire des floculants en fonction de la technique de séparation utilisée.	41
Tableau 4. 1 Vitesses de sédimentation, ( $N_{Re}$ ) et coefficient de traînée en fonction du nombre d'itération pour une particule de 400 $\mu\text{m}$ de diamètre.	59
Tableau 4. 2 Vitesses de sédimentation des particules de sable dans la pulpe floquée.	59
Tableau 4. 3 Vitesses de sédimentation des particules de sable dans la boue compactée.	61
Tableau 6. 1 Débit volumique découlant des lames du râteau complémentaire.	118
Tableau 8. 1 Indice d'instabilité et % d'arrêt pour les six expériences.	184

## Introduction

L'aluminium entrant dans la fabrication de nombreux produits de consommation est obtenu à partir du procédé d'électrolyse Hall-Héroux. Pour effectuer l'électrolyse de l'aluminium, il faut principalement de l'électricité et de l'alumine. L'électricité est produite par les centrales hydroélectriques tandis que l'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer. Par ce procédé, environ 4 tonnes de bauxite sont nécessaires pour produire 2 tonnes d'alumine, qui produiront ensuite 1 tonne d'aluminium. À l'échelle mondiale, les plus grosses raffineries d'alumine peuvent produire jusqu'à 4,2 millions de tonnes d'alumine par an (voir figure 1.1).



Figure 1. 1 Raffinerie Queensland Alumina en Australie [34].

L'extraction de l'alumine de la bauxite nécessite 4 étapes : la digestion, la clarification, la précipitation et la calcination. La figure 1.2 montre un diagramme détaillé du procédé Bayer.

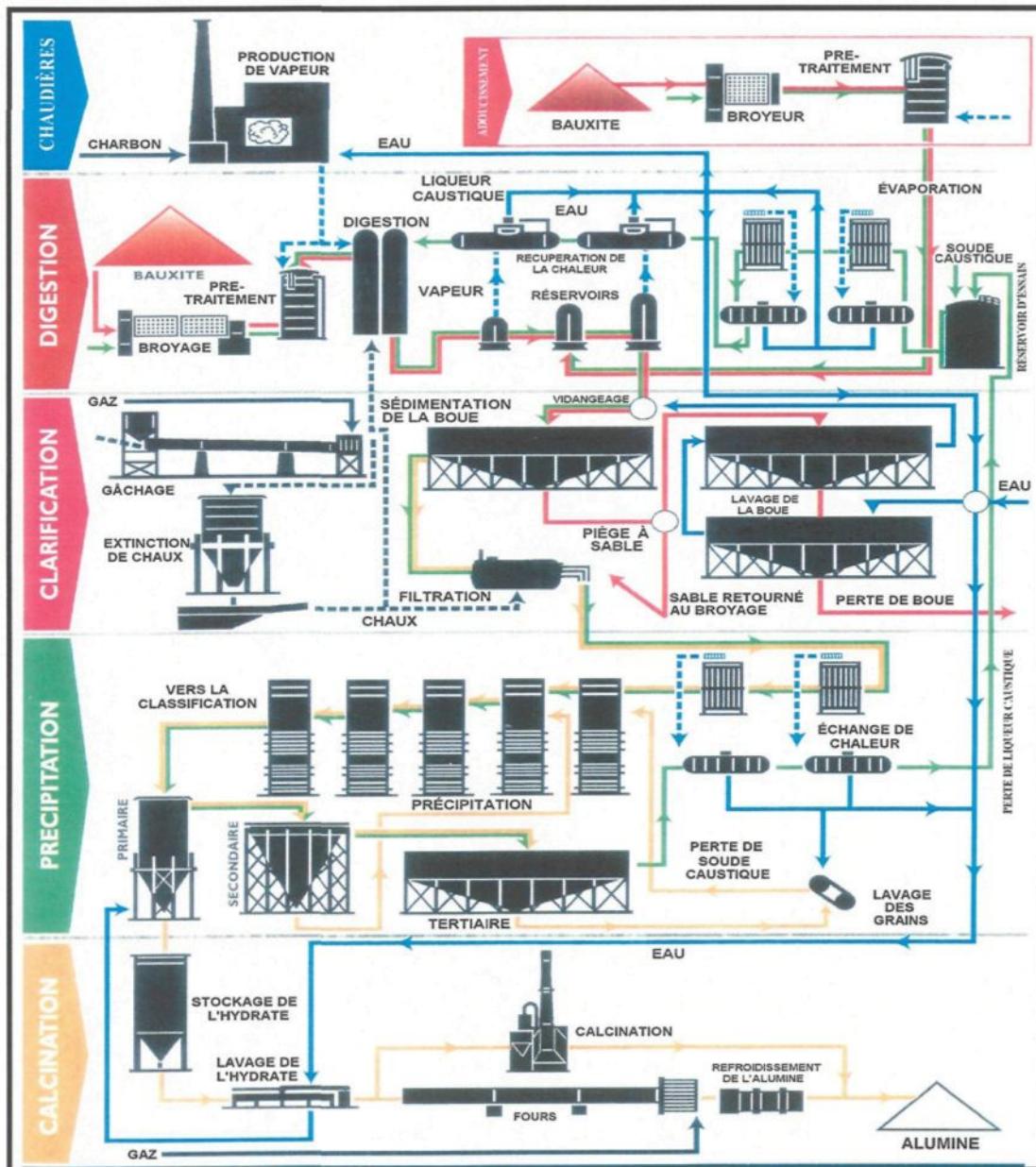


Figure 1. 2 Diagramme du procédé Bayer [33].

La première étape du procédé Bayer est la digestion. Pendant cette étape, la bauxite est broyée en de fines particules n'excédant pas 20 mm. Les particules obtenues sont ensuite dirigées vers un moulin, là elles sont mélangées à une solution de soude caustique afin d'obtenir une pulpe épaisse. Après un moment dans les réservoirs de prétraitement, la pulpe de bauxite est dirigée vers une série d'autoclaves verticaux, à l'intérieur desquels la pulpe est brassée dans une liqueur Bayer recyclée à une température de plus de 250 °C, sous une pression d'environ 3500 kPa [7, 25]. Le mélange sortant, une mixture composée d'alumine dissoute et de résidus solides de bauxite appelée pulpe d'extraction, est refroidi jusqu'à 100 °C dans une série de condenseurs. La vapeur récupérée des réservoirs de refroidissement est finalement utilisée pour préchauffer la liqueur Bayer entrant dans les autoclaves.

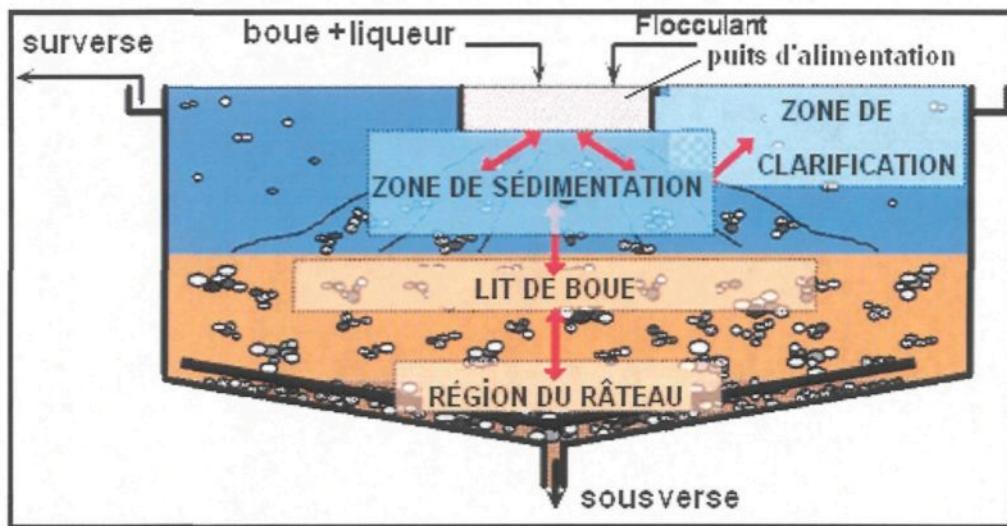
L'étape de la clarification consiste à séparer la liqueur Bayer, contenant l'aluminate en solution, des résidus solides qui s'y trouvent sous forme de fines particules et de sable. Ces résidus forment une boue dont la couleur rouge provient d'oxydes présents dans la bauxite. Selon la classification géologique, les boues correspondent à des super colloïdes dont le diamètre des particules en suspension se situe entre 1 et 10 microns [7].

Cette étape de séparation s'effectue par sédimentation à l'intérieur des décanteurs, qui sont de grands réservoirs cylindriques pouvant atteindre 33 mètres de diamètre (figure 1.3). Le lavage de la boue est réalisé dans un système à contre-courant, composé de plusieurs décanteurs placés en série. La liqueur recueillie à la surverse d'un décanteur est dirigée vers l'alimentation du décanteur situé en amont, tandis que la boue recueillie à la sousverse est orientée vers l'alimentation du décanteur situé en aval. À chaque stade, la

boue et la liqueur sont mélangées, ce qui a pour effet d'enrichir la liqueur en aluminate et en caustique, en plus de laver la boue. La liqueur Bayer, enrichie d'aluminate, est récupérée à la surverse du premier décanteur pour être filtrée et dirigée vers l'étape de la précipitation, pendant que la boue lavée est pompée de la sousverse du dernier décanteur vers les sites d'entreposage.



Figure 1. 3 Décanteur de boue rouge [24].



**Figure 1. 4 Schéma d'un décanteur.**

Le décanteur est alimenté par le puits d'alimentation, situé dans sa partie supérieure (figure 1.4). Le processus de séparation solide/liquide entre la boue et la liqueur Bayer est accéléré par l'ajout de floculants synthétiques, ce qui a pour effet d'agglomérer les particules de boue rouge et d'en augmenter la vitesse de sédimentation. Le puits d'alimentation favorise le mélange entre le floculant et les particules de boue fine. Les flocons ou agglomérats sédimentent plus ou moins rapidement selon leur taille. L'accumulation des couches successives de flocons dans la partie inférieure du décanteur forme la boue. Le compactage et l'évacuation de la boue sont ensuite accélérés par l'action de grandes structures rotatives, appelées «râteaux», placées tout au fond des décanteurs (figure 1.5). Ces râteaux peuvent être de formes et de tailles diverses selon les usines et les procédés utilisés.



**Figure 1. 5 Vue d'un bras d'un râteau.**

Après avoir été clarifiée et filtrée, la liqueur Bayer provenant de la surverse du premier décanteur du circuit de boue entre dans le processus de précipitation, à la fin duquel elle refroidira dans des réservoirs ouverts. À l'intérieur de ces réservoirs, la liqueur est mise en contact avec de petits cristaux d'hydrate d'alumine afin de provoquer la précipitation des cristaux d'hydrate d'alumine en solution, qui seront ensuite séparés selon leur taille dans des réservoirs de classification. Les cristaux de première classification, c'est-à-dire les plus gros, sont récupérés pour former l'alumine, alors que les autres sont retournés aux précipitateurs pour servir d'amorce.

L'hydrate d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) récupéré durant la précipitation est ensuite nettoyé et prêt pour la calcination. À cette étape, l'hydrate d'alumine est chauffé aux environs de 800 °C pour qu'il devienne de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [24].

## 1.1 Objectifs et problématique

Lors de l'opération des décanteurs de boue rouge, les principaux problèmes rencontrés sont l'augmentation graduelle du couple du râteau et la diminution de la fraction solide à la sousverse.

Ces variations surviennent généralement après une opération prolongée du décanteur, ce qui laisse supposer que le système subit un vieillissement. Typiquement, le cycle d'opération d'un décanteur varie entre cinq semaines et trois ans, selon la fonction de ce décanteur. L'augmentation progressive et quasi irréversible du couple met en danger les structures du râteau et mène, le plus souvent, à l'arrêt du décanteur. Ces variations constituent donc le principal facteur limitatif de la durée d'opération des décanteurs.

L'augmentation graduelle du couple est généralement accompagnée de fluctuations du pourcentage solide à la sousverse. Ces variations correspondent à des diminutions de fraction solide et entraînent une perte considérable de liqueur Bayer, qui se retrouve mélangée et évacuée avec les résidus. De façon optimale, le temps de résidence de la boue à l'intérieur d'un décanteur ne doit pas excéder huit heures, puisqu'un phénomène de réversion se produit et que l'aluminate précipite dans la boue. De plus, une baisse de la fraction solide à la sousverse a un effet immédiat sur la consistance de la boue, ce qui devient problématique puisque les superficies dédiées à la disposition de la boue ne sont pas illimitées.

Le couple découle essentiellement de deux facteurs : la structure du râteau et le lit de boue. Le terme «lit de boue» est employé pour désigner le volume de boue sédimentée

au fond du décanteur. L'hypothèse la plus plausible expliquant le vieillissement du système et l'augmentation graduelle du couple est l'obstruction (bridging) du râteau due à la grande viscosité de la boue. L'obstruction graduelle des espaces qui séparent les lames du râteau empêche la boue de s'écouler librement entre les lames. Cette obstruction augmente de façon graduelle et considérable la surface effective du râteau. Puisque le couple est directement proportionnel à la surface balayée par les lames, l'augmentation de la surface effective provoque une augmentation du couple. De plus, l'obstruction graduelle du râteau empêche systématiquement le déplacement régulier de la boue vers le centre du décanteur. Le râteau n'agit donc plus comme une pompe radiale. Ce changement de comportement provoque des instabilités de couple et de fraction solide à la sousverse. Pour diminuer ou empêcher l'obstruction du râteau, la solution envisagée est une augmentation de l'espace entre les lames.

La diminution de la fraction solide à la sousverse du décanteur semble être provoquée par la formation d'un amas en périphérie de l'arbre d'entraînement du râteau. La formation graduelle de cet amas au centre du décanteur est causée par l'accumulation de particules de sable et de gros flocons, qui contiennent une bonne quantité de floculant et qui sédimentent très rapidement. Le sable et les particules de boue couplés à l'action du floculant tendent, sous l'action du processus de compactage, à se cimenter pour former un noyau très dur et très compact. Le lit de boue devient alors de moins en moins homogène et son centre de plus en plus visqueux et dense. La masse de boue et de sable qui s'accumule obstrue graduellement le puits de décharge et les structures du râteau. Lorsque cette masse devient assez importante, il se produit un cisaillement du lit de boue et la masse

commence à tourner avec la structure du râteau, ce qui crée alors des chemins préférentiels sous la masse de boue en rotation. L'infiltration de liqueur Bayer et de boue faiblement compactée qui en résulte provoque alors une baisse de la fraction solide. Le décentrage du puits d'alimentation semble la meilleure solution à ce problème puisqu'il permet de diluer les particules de sable dans un plus grand volume de boue tout en diminuant l'apport direct de matière au centre du décanteur.

L'objectif du présent mémoire de maîtrise est donc de vérifier l'efficacité de l'espacement des lames du râteau et du décentrage du puits d'alimentation. La première partie des travaux portera sur l'étude de l'action du râteau sur le déplacement de la boue rouge en fournée, par traçage thermique. La seconde partie étudiera l'efficacité de trois configurations de râteau en système continu. Ces travaux permettront d'évaluer l'effet de l'espacement des lames du râteau. La dernière partie des travaux sera consacrée d'abord à l'observation du noyau, ensuite à l'étude de l'efficacité du décentrage du puits d'alimentation.

Il est très difficile d'étudier concrètement les phénomènes se produisant à l'intérieur des décanteurs d'usine, parce qu'il est difficile de mesurer précisément les quantités de matière entrant et sortant et parce que les décanteurs ne peuvent être arrêtés durant l'opération.

Pour permettre l'observation des phénomènes impliqués lors de la décantation de la boue rouge et pour faciliter le contrôle de certains paramètres d'opération, les expériences sont effectuées dans un système à échelle réduite 1:11, appelé décanteur pilote (voir

chapitre 7). L'utilisation d'un montage à échelle réduite a pour autre avantage d'augmenter de façon exponentielle le facteur de vieillissement du système. Ce vieillissement prématûre permet de reproduire en une soixantaine d'heures les instabilités opérationnelles qui surviennent en usine après quelques mois d'opération. Cette accélération de l'apparition des instabilités est due au fait que le lit de boue du montage pilote se construit beaucoup plus rapidement que celui des décanteurs d'usine.

Pour permettre l'étude et le contrôle efficace du système, plusieurs appareils de mesure sont installés sur le montage. Des débitmètres massiques permettent de contrôler et de déterminer les débits et les densités du floculant et de la pulpe à l'entrée du système ainsi que de la boue, à sa sortie. Une cellule de charge est installée en permanence sur l'arbre du râteau pour en mesurer le couple, tandis que des cellules de charge et des thermocouples peuvent être installés sur les lames du râteau pour permettre de suivre le comportement et le déplacement de la boue.

## 1.2 Revue des travaux antérieurs

Durant le procédé Bayer, la liqueur Bayer est débarrassée des ses résidus solides à l'intérieur de grandes structures appelées, décanteurs. Cette séparation est une étape primordiale du procédé; c'est pourquoi les décanteurs sont l'objet de plusieurs travaux de recherche.

L'efficacité de la séparation solide-liquide à l'intérieur des décanteurs repose sur plusieurs facteurs tels; la flocculation et la sédimentation, le compactage et le déplacement

de la boue rouge ainsi que sur diverses améliorations techniques. Les travaux de recherche sur les décanteurs sont donc effectués suivant ces différents champs d'action. Bien que la revue des travaux suivante ne soit pas exhaustive, elle constitue néanmoins une survol représentatif de l'ensemble des travaux effectués pour améliorer l'efficacité des décanteurs.

Plusieurs travaux de recherche sont effectués sur la sédimentation et la flocculation des particules de boue rouge à l'intérieur des décanteurs.

Mentionnons en autres les travaux de Gagnon et Al. [13,14] qui portent sur l'étude et sur la caractérisation des populations de flocs, soumises à diverses contraintes de cisaillement, à l'aide d'un rhéomètre de Couette.

Citons aussi les travaux de Biggs et Al. [3,12] qui ont étudiés les effets du poids moléculaire des polymères et du brassage sur la compressibilité des flocs.

Dans le même ordre d'idée, mais suivant une approche différente, un modèle mathématique décrivant la décantation de la boue rouge a été réalisé par Péloquin G. [34] en 2003.

Toujours en ce qui concerne l'étude de la flocculation et de la sédimentation, notons aussi les travaux de Ferland et Al. [11] qui ont développé un appareil permettant d'étudier l'effet de différents paramètres tels : la flocculation et l'agitation sur les vitesses de sédimentation.

Les travaux effectués sur le compactage de la boue rouge sont aussi très nombreux.

Buscall et White [6] ont étudié le compactage d'une suspension de fines particules de boue rouge sous l'effet de la force de gravité. Pour ce faire, ils ont fait varier la force de gravité appliquée sur les échantillons à l'aide d'une centrifugeuse. Leurs travaux ont permis de déterminer l'équation de la force de compression solide. Cette force de compression solide correspond à la résistance de la suspension au compactage. Lorsque la force de compression est en équilibre avec la force de gravité, le compactage cesse.

Les travaux de Scales et de De Kretser [37] ont permis de déterminer la concentration limite d'une suspension avant qu'il y est compactage. Cette concentration limite appelée le «gel point» correspond à la concentration où il y a formation de liens entre les particules de solide pour ainsi former un réseau de particule.

Les travaux de recherche plus techniques, se concluant généralement par des modifications directes des décanteurs, s'imbriquent souvent dans des procédés de production privés et impliquent des sommes énormes, ils sont donc farouchement gardés et sont très souvent l'objet de brevets plutôt que de publications.

Mentionnons les travaux de Baggatto et al. [1,2] qui portent d'abord sur l'introduction de structures rotatives à l'intérieur des décanteurs. Leurs travaux démontrent que l'introduction d'une structure rotative, composée de tiges verticales, au fond des décanteurs permet d'augmenter le pourcentage de fraction solide à la sousverse. Leurs travaux portent aussi sur le développement de décanteurs cylindriques beaucoup plus hauts que larges, appelés décanteurs à haut rendement ou «DHR».

En 1995, Iida et al. [23] ont développé un décanteur sous pression permettant la décantation des résidus solides à des pressions et à des températures très élevées. L'augmentation de la pression et de la température favorise la solubilité de l'alumine à l'intérieur de la liqueur Bayer et augmente, par conséquent, l'efficacité du procédé.

Mentionnons aussi les travaux de Paradis et al. [32] qui décrivent l'ajout d'une boucle de recirculation à la sousverse des décanteurs ayant pour but de faciliter l'évacuation de la boue rouge en diminuant sa viscosité.

Citons enfin les travaux de modélisation mathématique effectués par Sutalo, Paterson et Rudman [42]. Ils ont utilisé un modèle CFD «Computational Fluid Dynamics» pour simuler l'écoulement de la boue rouge autour des lames des râteaux. Leur simulation a été effectuée avec des râteaux comportant deux ou quatre bras, avec des lames à 30 degrés et un polymère, appelé Carbopol 980, pour simuler la boue. Leurs conclusions générales sont que le point d'injection de la boue influence considérablement son comportement autour des lames et que des lames plus larges, pour un même angle, sont plus efficaces pour le compactage de la boue que des lames plus étroites.

## Techniques de séparation solide-liquide

### 2.1 Introduction

Les principales techniques de séparation solide/liquide utilisées lors du procédé Bayer sont la décantation et la filtration. Pour comprendre le choix de ces techniques, il faut connaître les différentes techniques de séparation existantes, de même que leur champ d'application respectif. Le présent chapitre fait un bref survol des différentes techniques employées lors de procédés de séparation solide/liquide. Une brève description de la séparation solide/liquide sera d'abord faite, les différentes techniques employées pour effectuer une séparation solide/liquide seront ensuite analysées. Finalement, il sera question de la caractérisation des particules en suspension.

### 2.2 La séparation solide-liquide

Les procédés de séparation solide-liquide impliquent la séparation des deux phases d'une suspension, soit la phase solide et la phase liquide. Ces procédés ont pour but la récupération, soit de la phase solide, soit de la phase liquide, soit des deux phases séparément ou d'aucune des deux phases (procédé de dépollution).

Une séparation solide-liquide parfaite exige que la totalité du solide suive une direction donnée et que la totalité du liquide suive une autre direction. Malheureusement, aucun équipement ne permet une séparation parfaite : de fait, quelques particules solides

se retrouveront dans l'écoulement liquide et une certaine quantité de liquide sera évacuée avec la masse solide. L'imperfection d'une séparation solide-liquide se caractérise ainsi : soit par la fraction massique de solide se retrouvant dans le liquide, soit par l'humidité, correspondant à la quantité de liquide se retrouvant dans le solide. L'efficacité de la séparation est généralement exprimée en pourcentage du poids de solide sec par recueilli rapport au poids total (solide + liquide).

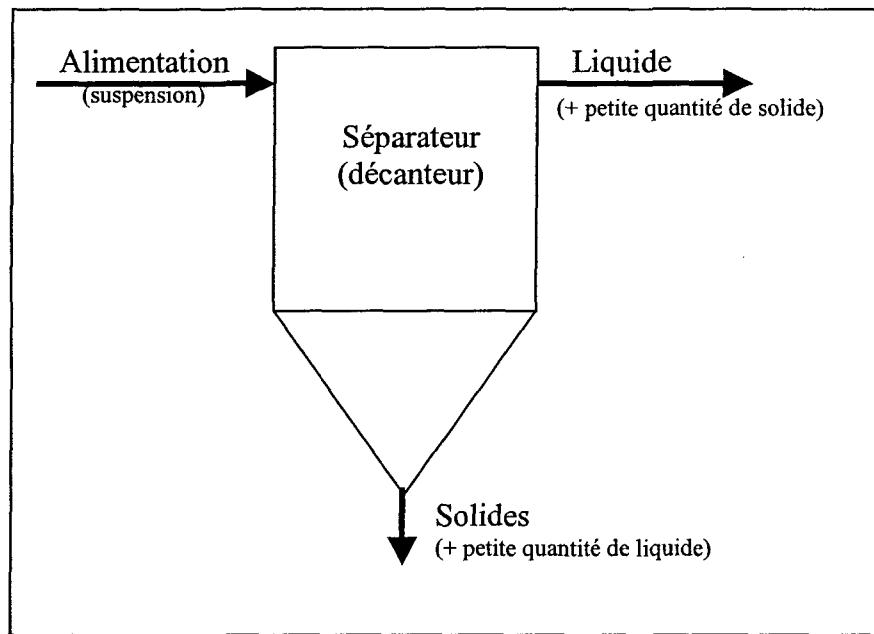
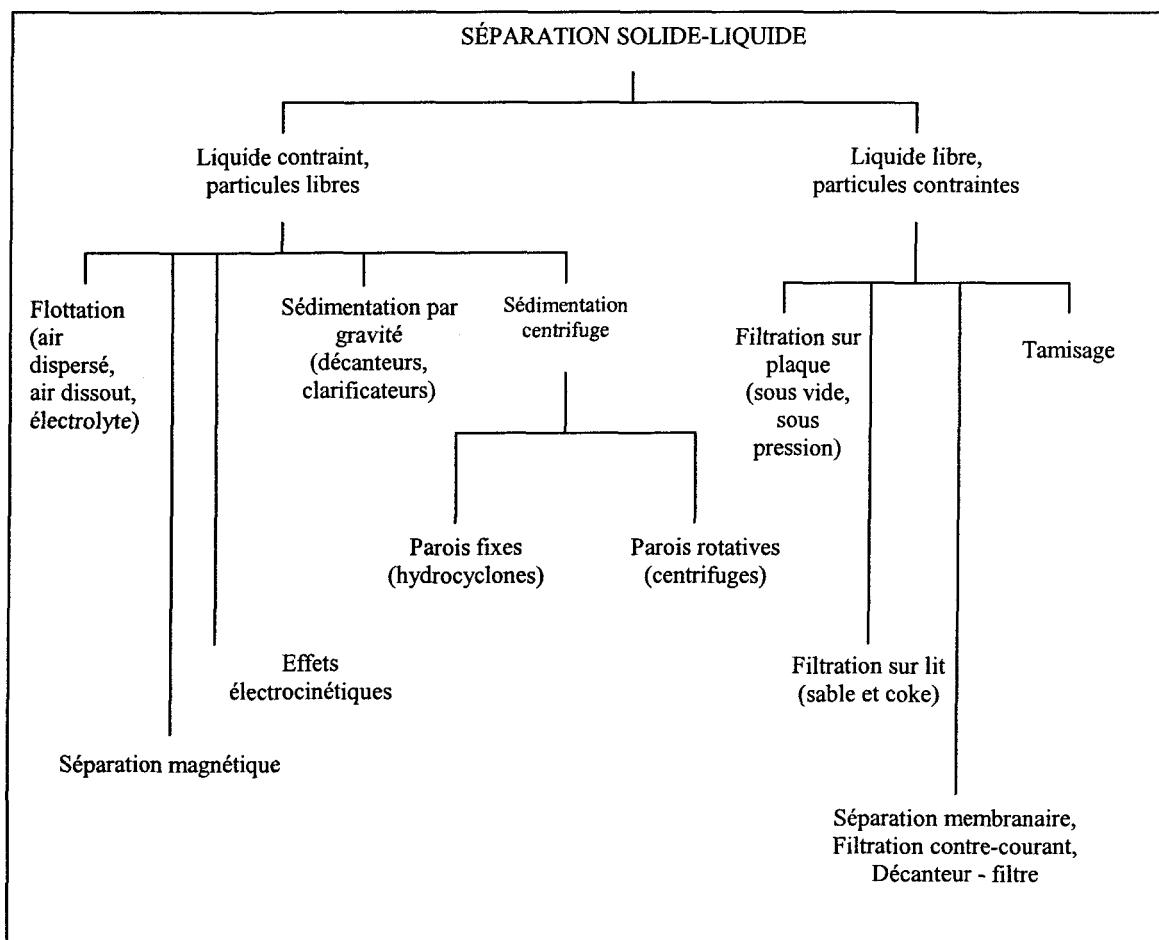


Figure 2. 1 Schéma d'un séparateur.

## 2.3 Les procédés de séparation solide-liquide

Les différents procédés de séparation solide-liquide sont classifiés en fonction des principes impliqués (voir figure 2.2). Si le liquide est contraint et que les particules solides se déplacent librement à l'intérieur, il s'agit de sédimentation ou de flottation. Pour la sédimentation, une différence de densité entre les particules solides et le liquide est nécessaire. Et lorsque les particules solides subissent certaines contraintes et que le liquide peut les traverser, il s'agit de filtration ou de tamisage.



**Figure 2. 2 Classification des procédés de séparation solide-liquide [41].**

### **2.3.1 La flottation**

La flottation consiste à faire passer des bulles d'air à l'intérieur d'une suspension de fines particules dans laquelle des agents moussants et surfactants ont été ajoutés. Les bulles de gaz adsorbent ou absorbent les particules de solides, les entraînant à la surface où elles peuvent facilement être éliminées.

### **2.3.2 La sédimentation par gravité**

La sédimentation de solide par gravité est un procédé employé dans les bassins de sédimentation utilisés pour effectuer la décantation. Les décanteurs sont construits et opérés de façon à obtenir un solide aussi dense que possible et un surnageant aussi propre que possible. Cette technique peut être améliorée par l'ajout de substances appelées floculants.

Cette partie sera vue plus en détail ultérieurement.

### **2.3.3 La sédimentation centrifuge**

#### **2.3.3.1 Les hydrocyclones**

Dans un hydrocyclone, il n'y a pas de partie en rotation. Un vortex est produit en introduisant la suspension par une entrée tangentielle dans l'hydrocyclone de forme conique. La force centrifuge permet la séparation et la classification des particules en suspension.

### **2.3.3.2 Les centrifuges**

Dans le cas des centrifuges, la suspension est placée dans un contenant soumis à une très haute vitesse. La force centrifuge favorise la séparation des différents constituants, mais peut aussi permettre une certaine classification.

### **2.3.4 La filtration**

La filtration consiste à faire passer une suspension à travers un médium poreux pour y retenir les particules solides tout en laissant passer la fraction liquide. Les forces utilisées pour entraîner le liquide à travers le solide sont produites, soit par pression positive en amont du filtre, soit par création d'un vide en aval.

### **2.3.5 Le tamisage**

Le tamisage utilise le même principe que la filtration sauf que le liquide traverse le médium par gravité. Cette opération peut-être améliorée en faisant vibrer légèrement le médium.

## 2.4 La caractérisation des particules en suspension

La caractérisation des particules en suspension est une étape essentielle dans le choix de la technique permettant d'atteindre une séparation optimale. Cette caractérisation des particules permet de déterminer les propriétés fondamentales de la suspension : la distribution de la taille, la forme, la densité et les propriétés de surface des particules, ajoutée à la viscosité du liquide, sa densité et sa concentration. La détermination de ces propriétés est importante puisque ces facteurs régissent les comportements des particules en solution tels que la vitesse de sédimentation, la perméabilité du lit de solide et la résistance spécifique pour un filtre donné.

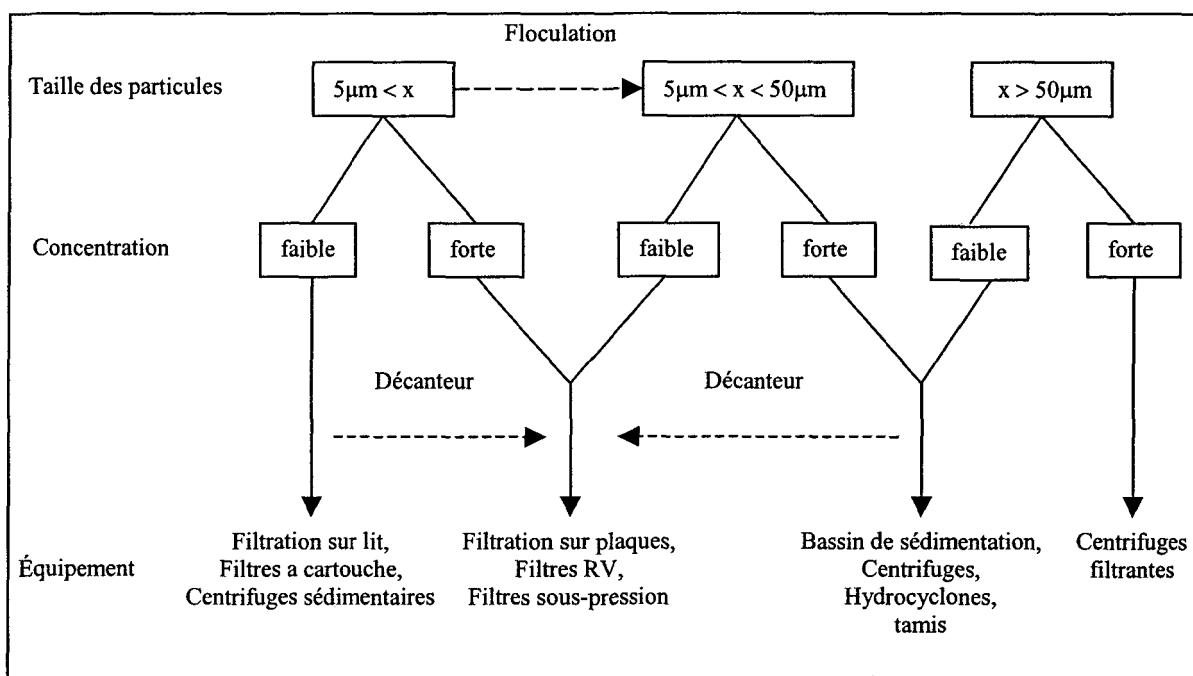


Figure 2. 3 Guide de sélection des équipements de séparation solide-liquide [41].

### 2.4.1 La définition du concept de taille des particules

Le concept de taille des particules découle d'un besoin de comparer des particules de formes différentes et irrégulières. Une particule de forme irrégulière peut être décrite par un nombre dimensionnel dépendant de la dimension et de la propriété mesurée. Il existe trois groupes de base pour une telle classification : le diamètre équivalent sphérique, le diamètre équivalent circulaire et le diamètre statistique. Le premier groupe reporte en équivalent sphérique les propriétés de la particule elle-même (son volume, son aire, sa vitesse de sédimentation, etc.). Le second groupe permet de comparer les propriétés des particules qui possèdent un contour équivalent (diamètre). Le troisième groupe est obtenu lorsqu'une dimension linéaire est mesurée parallèlement à une direction préalablement déterminée.

**Tableau 2. 1 Définitions s'appliquant au diamètre sphérique équivalent [41].**

Symbol	Nom	Propriété équivalente d'une sphère
$x_v$	Diamètre volumique	Volume
$x_s$	Diamètre surfacique	Surface
$x_{sv}$	Diamètre surfacique-volumique	Rapport entre la surface et le volume
$x_d$	Diamètre d' entraînement	Résistance au mouvement dans un même fluide et à une même vitesse
$x_f$	Diamètre de chute libre	Vitesse de chute libre dans un même fluide et avec une densité particulaire égale
$x_{St}$	Diamètre de Stokes	Vitesse de chute libre sous la loi de Stokes ( $Re < 0.2$ )
$x_A$	Diamètre de tamisage	Propriété de traverser un tamis de même maillage

**Tableau 2. 2 Définitions s'appliquant au diamètre circulaire équivalent [41].**

Symbole	Nom	Propriété équivalente d'une sphère
$x_a$	Projection de la surface du diamètre	Surface projetée si la particule reste en position stable
$x_p$	Projection de la surface du diamètre	Surface projetée si la particule est orientée de façon aléatoire
$x_c$	Périmètre du diamètre	Périmètre du contour de la particule

**Tableau 2. 3 Définitions s'appliquant au diamètre statistique [43].**

Symbole	Nom	Propriété équivalente d'une sphère
$x_F$	Diamètre de Feret	Distance entre deux lignes tangentes aux surfaces opposées de la particule
$x_M$	Diamètre de Martin	Longueur de la ligne qui sépare l'image de la particule en deux
$x_{SH}$	Diamètre de cisaillement	Largeur de la particule obtenue en cisaillant la particule
$x_{CH}$	Diamètre de la corde maximum	Longueur maximum d'une ligne limitée par le contour de la particule

La sélection des paramètres permettant la caractérisation des particules dépend de la méthode de séparation employée. Par exemple, lorsque le déplacement relatif des particules dans un liquide constitue le mécanisme principal (sédimentation par gravité ou par centrifugation et les hydrocyclones), les paramètres les plus significatifs sont le diamètre de chute libre ou le diamètre de Stokes. Tandis que pour la filtration, par exemple, c'est le diamètre volumique qui sera le plus important.

### 2.4.2 Les types de distribution des particules

Pour la caractérisation d'une solution, il faut en plus de la taille des particules, tenir compte de leur distribution. Pour des particules de même nature, il existe quatre différents types de distribution :

1. La distribution de la taille des particules par rapport au nombre  $f_N(x)$  ;
2. La distribution de la taille des particules par rapport à la longueur  $f_L(x)$  ;
3. La distribution de la taille des particules par rapport à la surface  $f_S(x)$  ;
4. La distribution de la taille des particules par rapport à la masse ou au volume  $f_M(x)$ .

Ces distributions sont relatives, mais il est possible de les convertir lorsque le facteur de forme est constant, c'est-à-dire lorsque la forme de la particule est indépendante de sa taille.

La forme et l'effet de la concentration seront discutés au chapitre 4. La caractérisation de la taille des particules, de leur forme et de leur distribution est vue en détail dans les ouvrages de Murphy et de Svarovsky [26,43].

La réalisation d'un procédé de séparation solide/liquide rapide et efficace peut nécessiter une combinaison de différentes techniques. Dans le cas de la boue rouge, par exemple, il y a une combinaison de la sédimentation et de la filtration. La taille des particules composant la suspension varie entre 1 et 10 microns. La sédimentation est un procédé rapide qui permet d'éliminer la majeure partie des particules de boue. Pour

augmenter l'efficacité de la sédimentation, un pré-traitement ayant pour but d'agglomérer les particules peut être effectué. Comme le montre la figure 2.3, la sédimentation, même combinée à la floculation, reste limitée par la taille et la concentration des particules. Pour compléter la séparation, il faut donc utiliser la filtration.

## **La floculation et la coagulation**

### **3.1 Introduction**

Les différentes suspensions peuvent être classifiées selon la taille des particules qui les composent. Lorsqu'elles sont formées de particules de moins de 1  $\mu\text{m}$ , ce sont des colloïdes; formées de particules inférieures à 0.2  $\mu\text{m}$ , se sont des « super colloïdes »; un mélange composé de particules de taille supérieure à 1  $\mu\text{m}$  est simplement appelé, suspension. Les suspensions colloïdales sont généralement très stables. Les particules qui les composent montrent une telle stabilité dans le liquide qu'elles manifestent peu ou pas de vitesse de sédimentation malgré la différence de densité entre les phases. La séparation de telles suspensions est donc très difficile. Afin de résoudre ce problème, il faut utiliser des techniques qui modifient le comportement du système pour permettre l'agglomération des petites particules.

Les propriétés des suspensions colloïdales peuvent être altérées par l'addition d'électrolytes ou d'agents à surface active qui agissent sur l'interface solide-liquide, ou simplement par la modification des conditions physiques pouvant mener à une cristallisation et ainsi, à une augmentation de la taille des particules. Les deux principaux moyens pour modifier les propriétés physico-chimiques d'une solution colloïdale sont la coagulation et la floculation.

### 3.2 Les interactions entre les particules et la stabilité

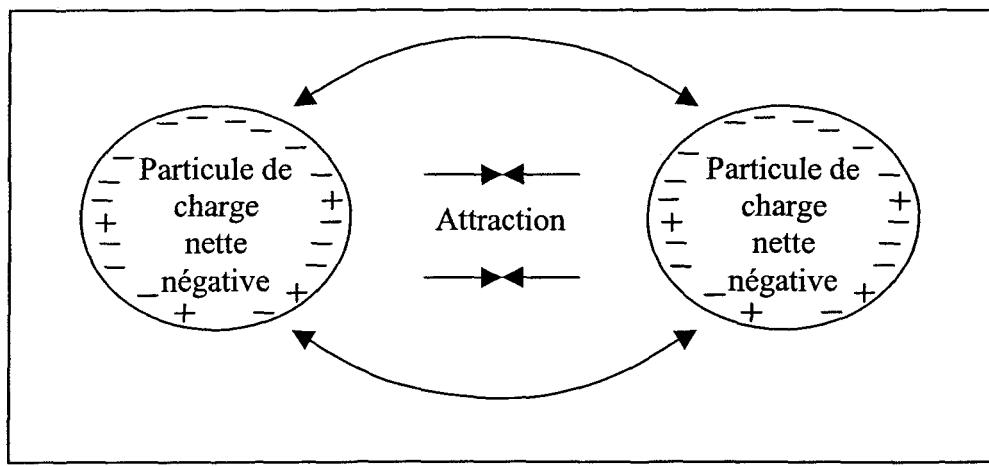
Les colloïdes sont des particules impossibles à décanter naturellement, et pour lesquels les phénomènes de surface sont primordiaux. Ces phénomènes régissent la stabilité des suspensions colloïdales. En effet, les colloïdes sont soumis à deux grands types de forces [12]:

- force d'attraction de Van der Waals, liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu ( $E_A$ );
- force de répulsion électrostatique, liée aux charges superficielles des colloïdes ( $E_R$ ).

La stabilité d'une suspension colloïdale dépend du bilan des forces d'attraction et de répulsion, dont le niveau énergétique est donné par l'équation 3.1 [12]:

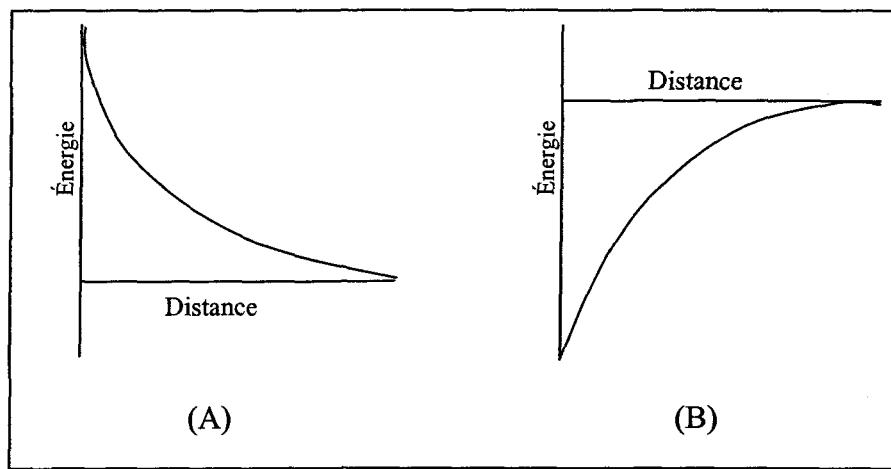
$$E = E_A + E_R \quad (3.1)$$

Les particules en suspension possèdent toujours une charge résiduelle, qui va à l'encontre des forces d'attractions telles les forces de London ou de Van der Waals ( $E_A$ ). Pour permettre aux particules de se rapprocher les unes des autres, il faut donc diminuer les charges résiduelles. Une illustration de l'interaction entre deux particules chargées négativement est donnée à la figure 3.1.



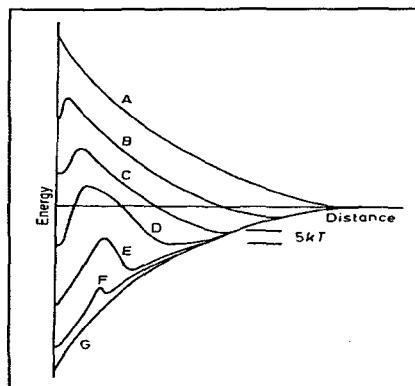
**Figure 3.1 Rapprochement de deux particules de même charge [43].**

Les interactions entre les particules colloïdales sont discutées de façon plus complète dans les ouvrages de Verwey et Overbeek et de Osipow [29,44]. Pour illustrer plus simplement, considérons les courbes d'énergie potentielle en fonction de la distance séparant deux particules.



**Figure 3.2 (A) Courbes de répulsion. (B) Courbe d'attraction entre deux particules de même charge [41].**

Les deux courbes d'énergie peuvent être combinées pour former la courbe d'énergie potentielle résultante, comme montrée à la figure 3.3 :



**Figure 3. 3 Courbes d'énergie potentielle pour deux particules se rapprochant [41].**

Les courbes A, B, C et D de la figure 3.3 représentent une suspension colloïdale stable, c'est-à-dire que les particules ressentent une répulsion nette; les courbes E, F et G illustrent un cas où les particules ressentent une attraction nette. L'amplitude maximale de sur la courbe de l'énergie potentielle est un indicateur du taux d'agglomération et ce maximum dépend des caractéristiques des particules, lesquelles sont discutées de façon plus exhaustive par Gouy et Chapman [8, 16,17].

### 3.3 La coagulation

La coagulation est l'adhésion de particules colloïdales par des forces d'origine moléculaire et atomique. L'adhésion des particules est fonction de l'équilibre entre les forces d'attraction de London-Van der Waals ( $E_A$ ) et les forces de répulsion de la double couche électrique ( $E_R$ ).

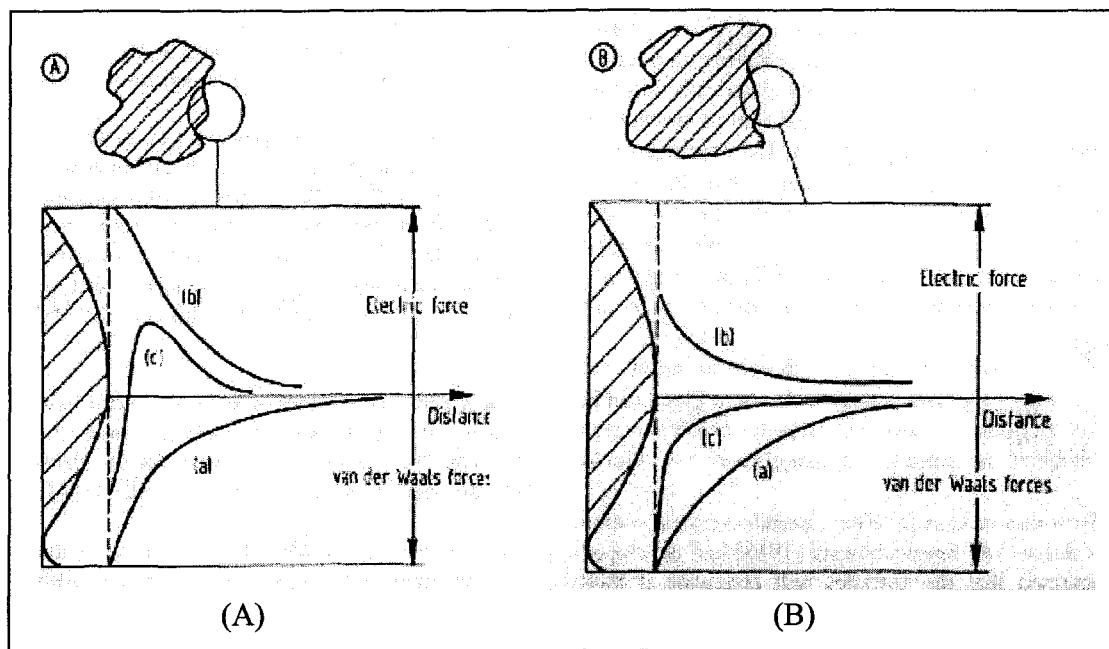
Les particules colloïdales sont sujettes à des collisions avec les molécules du liquide, ce qui leur donne un mouvement irrégulier et aléatoire. La diffusion aléatoire des particules est appelée, le mouvement Brownien. Ce phénomène fait en sorte que deux particules peuvent entrer en contact ou passer assez près l'une de l'autre pour permettre aux forces d'attractions de les agglomérer. Toutefois, c'est la résultante entre les forces de répulsion et les forces d'attraction qui joue un rôle primordial; de fait, le contact entre deux particules n'implique pas toujours une agglomération.

Les forces d'attraction proviennent des forces de dispersion de London; elles viennent aussi des forces de Keesom, dues à l'interaction entre les dipôles et les pôles induits de la particule; et elles viennent finalement des forces de Debye, dues aux interactions entre les dipôles. Les forces de répulsions, quant à elles, proviennent de la double couche électrique. Les forces de répulsion ne font pas qu'empêcher la coagulation des particules : elles ajoutent aussi de l'énergie au mouvement des particules qui entrent en collision (signes opposés). Cet effet s'accentue pour les particules de plus petite taille.

La figure 3.4 illustre l'interaction entre les forces d'attraction et les forces de répulsion agissant sur une particule. La courbe (a) représente l'énergie de Van der Waals, une force attractive de plus en plus négative avec la diminution de la distance inter-

particulaire. La courbe (b) représente la force électrique répulsive; la courbe (c), quant à elle, représente la résultante exposant la barrière d'énergie qui résulte de la stabilisation du système.

La figure 3.4 (A) illustre l'énergie entre deux particules stables, tandis que la figure 3.4 (B) illustre l'énergie potentielle entre deux particules lors d'une addition de sels ou d'agents coagulants. L'addition de sels permet d'abaisser sous zéro le niveau de la courbe résultante; cette addition permet aussi la coagulation des particules qui s'approchent suffisamment l'une de l'autre.



**Figure 3.4**Courbes d'énergie potentielle : (A) particules stabilisés. (B) particules coagulées [40].

Les coagulants sont des électrolytes dont la charge est opposée à celle des particules. Leur addition permet la neutralisation du système, ce qui augmente les probabilités de collision et d'agglomération des particules. Pour obtenir cette coagulation, les sels inorganiques ont longtemps été utilisés. Les principaux sels que l'on retrouve sont :  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . L'utilisation de l'acide sulfurique, selon la charge des particules, peut également être faite. Par ailleurs, des coagulations plus prononcées surviennent lorsque les particules n'ont aucune charge en relation avec le médium dans lequel elles sont ; cela survient lorsque le potentiel  $\zeta$  (zeta) est de zéro.

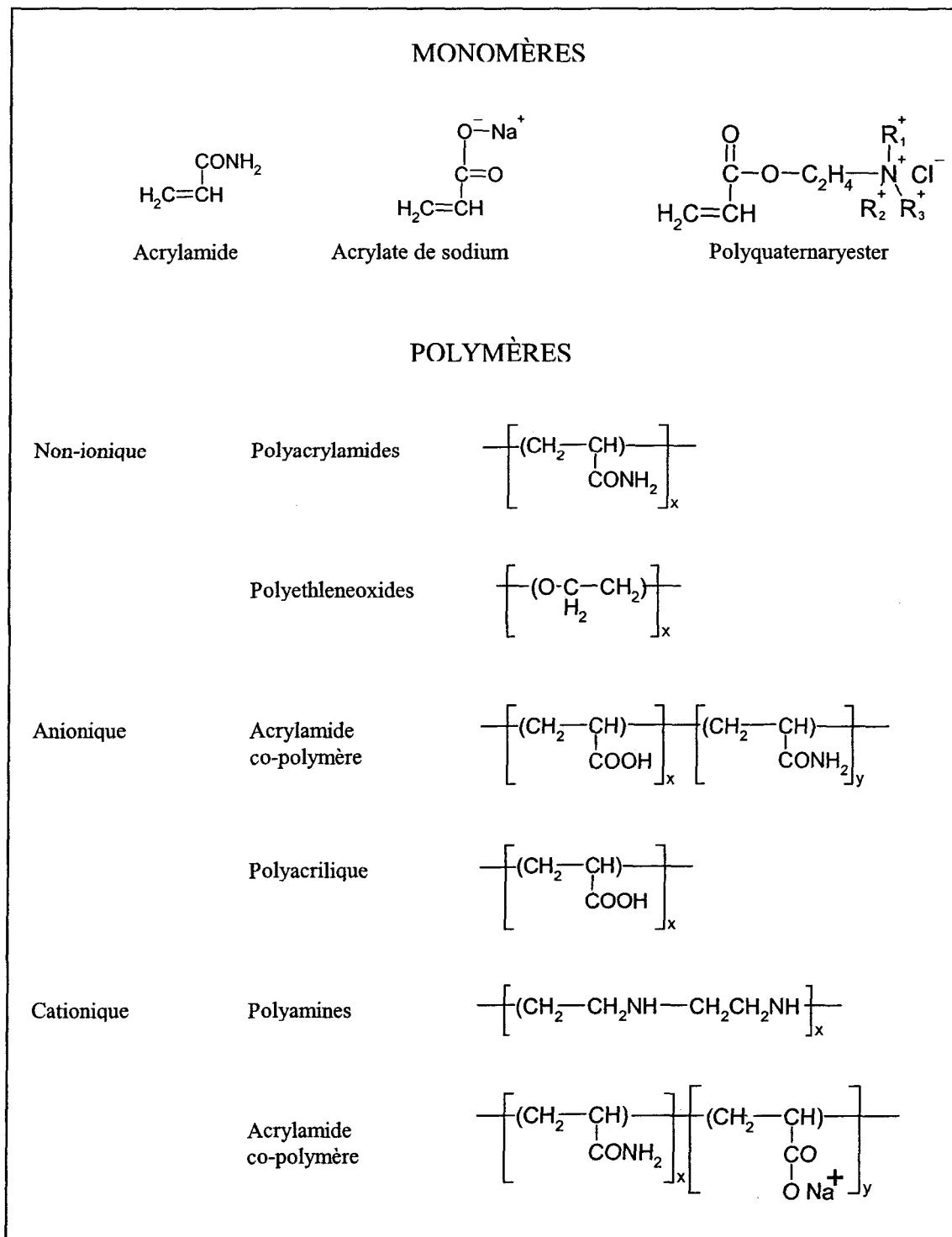
Le potentiel Zéta régit le déplacement des colloïdes et leurs interactions. L'électrophorèse permet de l'observer : lorsqu'une particule est soumise à un champ électrique, elle atteint presque instantanément une vitesse telle qu'un équilibre s'établit entre la force électrique d'attraction et la force de frottement due à la viscosité du milieu [20].

### 3.4 La flocculation

Le mécanisme de la flocculation est légèrement différent de celui de la coagulation. La flocculation est un procédé utilisé pour agglomérer les fines particules initiales, qui deviennent ainsi plus lourdes et sédimentent beaucoup plus rapidement. Cette agglomération dépend de longues chaînes de polymères qui créent des ponts entre les particules, pour ensuite former des flocs. Le degré de flocculation est contrôlé par la probabilité des collisions entre les particules et la probabilité de leur adhésion après la

collision. Le degré de floculation dépend donc du poids moléculaire du poly-électrolyte et de la concentration de particules.

Une des plus grandes percées technologiques relative à la séparation solide-liquide, a été le développement de polymères possédant la capacité de floculer les suspensions colloïdales lorsqu'ils sont injectés en très petites quantités. La figure 3.5 qui suit présente quelques exemples des polymères synthétiques les plus utilisés. Dans la présente étude, c'est le polyacrylamide qui est utilisé.

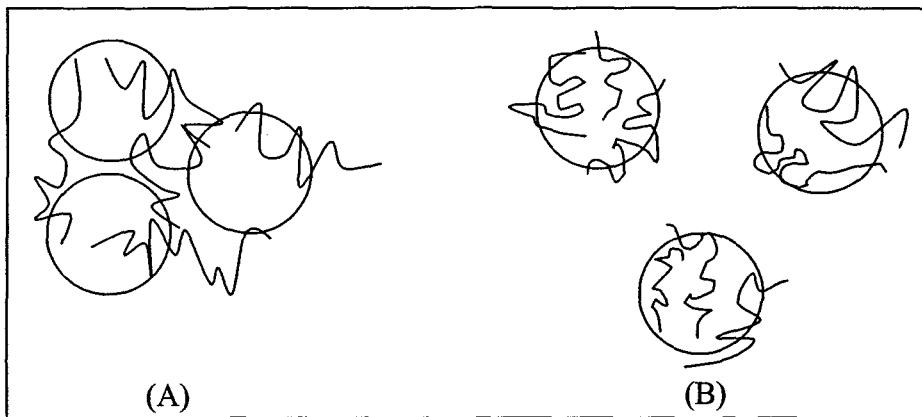


**Figure 3.5 Exemples de monomères et de poly-électrolytes [43].**

Cette figure montre que les polymères synthétiques se divisent en trois grandes classes : les non ioniques, les anioniques et les cationiques. Il est cependant évident que le caractère ionique des polymères peut être altéré par co-polymérisation de divers monomères. Les principaux facteurs caractérisant une solution de polymères sont le poids moléculaire moyen et la distribution de la densité de charge sur les molécules mêmes de polymère.

### **3.4.1 Le mécanisme de la flocculation**

Le mécanisme de la flocculation débute par l'adsorption d'une chaîne de polymère de la solution sur une particule; lorsque d'autres particules sont suffisamment près, la chaîne allongée est adsorbée à leurs surfaces (figure 3.6). Les flocs élémentaires grandissent en se pontant avec d'autres particules, jusqu'à ce que la taille optimale des flocs soit atteinte. Le mécanisme de la flocculation par pontage se fait donc en deux étapes distinctes : l'agrégation primaire, qui permet la formation de flocs élémentaires de petite taille; et l'agrégation secondaire, qui se produit grâce à l'étape primaire et qui résulte en la formation des flocons de grande taille [3].



**Figure 3.6(A) Polymères formant des ponts entre les particules. (B) Particules stables par adsorption de polymères [43].**

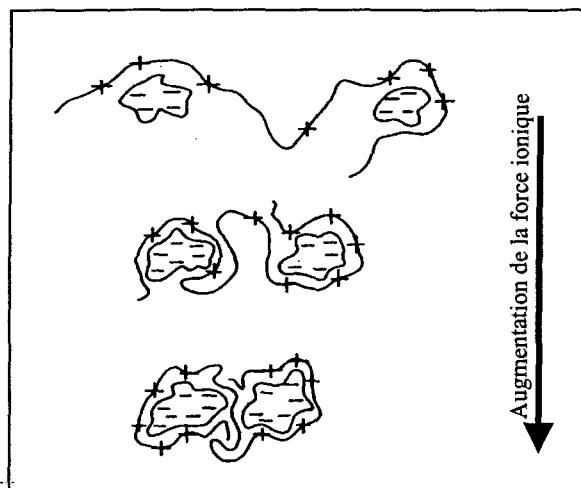
En plus du poids moléculaire du floculant et de la concentration de particules, un des facteurs déterminants liés à la capacité de formation des ponts est la concentration d'ions dans la solution. Les polymères anioniques de faible poids moléculaire, ne pouvant créer des chaînes assez longues, agissent seulement comme dispersant. La densité de charge du polymère est aussi un facteur important : plus les charges sur le polymère augmentent, plus la répulsion mutuelle entre les groupes chargés négativement le long de la chaîne augmente. L'augmentation de la répulsion entre les groupes chargés force la molécule à adopter une structure plus étendue, favorisant ainsi la formation de ponts. Toutefois, de fortes charges sur le polymère auront comme effet de repousser les molécules de même charge que celui-ci et empêcheront, par conséquent, l'adsorption du polymère sur les particules. Une augmentation de la concentration d'ions dans le médium (liquide) favorise également l'adsorption mais ces ions isolent les groupes chargés (négativement /

positivement) le long de la chaîne, ce qui empêche la formation d'une structure plus allongée.

Ce dernier principe se retrouve dans le procédé Bayer. Les résidus de la digestion de la bauxite sont successivement floculés et repulpés en solution avec une concentration en ions décroissante. Avec la diminution de la concentration ionique, la charge optimale, en terme de taux de sédimentation du polymère anionique, diminue.

Les polymères cationiques peuvent également former des ponts entre les particules si leur poids moléculaire est assez élevé. Si le substrat a une charge hautement négative, le polymère cationique tend à s'adsorber horizontalement, comparativement aux polymères anioniques, il y donc moins de boucles qui s'étendent pour la formation de ponts.

Dans la majorité des cas, les flocs formés par ce genre de mécanisme sont constitués de particules de compositions chimiques similaires.



**Figure 3. 7 Flocculation par neutralisation de la charge et formation de ponts [43].**

### 3.4.2 Les types de mécanismes de floculation

Deux principaux mécanismes induisent l'agrégation des particules en suspension : la floculation péricinétique et la floculation orthocinétique

La floculation péricinétique dépend de la probabilité de rencontre entre des particules déstabilisées, qui ont commencé à s'agréger grâce au mouvement "Brownien ". Lorsqu'un mouvement est induit dans d'une suspension floquée, il s'agit de floculation orthocinétique. La dispersion des particules de solide et des molécules de floculant est alors favorisée par l'agitation.

Une théorie simple de la cinétique de la floculation peut être dérivée pour un gradient de vitesse constant. Mais en pratique, ces conditions sont difficiles à obtenir.

L'équation décrivant le taux de floculation pour une floculation orthocinétique, lorsqu'il n'y a aucune répulsion de surface entre les particules se lit comme suit :

$$\frac{dN_v}{dt} = \frac{4N_v^2 Gr^3}{3} \quad (3.2)$$

où

$N$  = nombre de particule agrégées par unité de volume ( $\text{m}^{-3}$ )

$G$  = gradient de vitesse ( $\text{s}^{-1}$ )

$r$  = rayon de la particule (m)

Cette équation de Smoluchowski démontre que le taux de floculation est de deuxième ordre par rapport à la concentration et qu'il dépend linéairement du gradient de vitesse, et qu'il est proportionnel au rayon à la puissance trois.

Selon cette théorie, le taux de floculation peut être augmenté grâce aux opérations suivantes :

1. Augmentation du rayon de collision des particules; la floculation augmente d'elle-même lorsqu'il y a présence de grosses particules et lorsque de gros flocons sont produits.
2. Augmentation de la concentration des particules présentes; la floculation diminue d'elle-même lorsque la concentration de particules diminue avec la formation de flocons.
3. Augmentation du gradient de vitesse; mais comme mentionné à quelques reprises, il y a un gradient limite supporté par les flocons, particulièrement les gros flocons.

Le taux de floculation péricinétique, causé par le mouvement Brownien, se traduit par une équation analogue à celle de la floculation orthocinétique:

$$\frac{dN_v}{dt} = -4\pi D r N_v^2 \quad (3.3)$$

où

$N_v$  = nombre de particules par unité de volume ( $\text{m}^{-3}$ )

$D$  = coefficient de diffusion ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

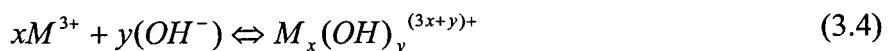
$r$  = rayon de la particule (m)

Dans plusieurs cas de fluide en mouvement (turbulent; orthocinétique) le taux péricinétique domine pour les particules de moins de  $1\mu\text{m}$  et le taux orthocinétique pour les particules de plus de  $1\mu\text{m}$ .

### **3.4.3 Agents de coagulation et de floculation**

#### **3.4.3.1 Inorganiques**

Les coagulants inorganiques sont des sels dont les ions vont s'hydrolyser et qui auront une interaction spécifique avec le substrat. Une description adéquate de la réaction d'hydrolyse d'un cation implique des ions hydroxyde comme ligands explicites, les autres ligands étant implicites, comme dans la réaction générale 3.4 :



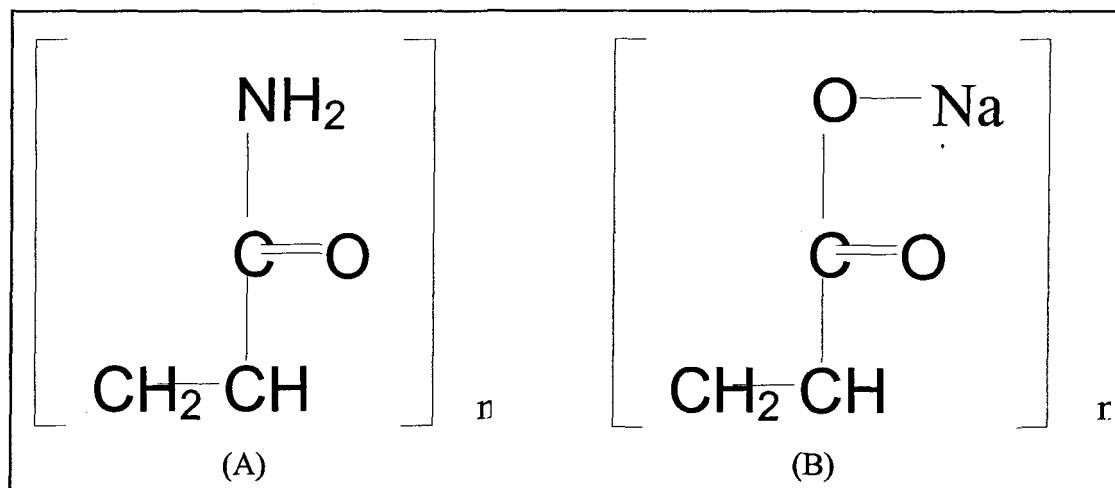
La grande majorité des sels utilisés sont composés d'un métal M trivalent :  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{3+}$ ... Les plus utilisés sont ceux dérivés du fer et de l'aluminium. Mais celui qui est le plus grandement utilisé est l'alun. En 1978, on en utilisait  $3.5 \times 10^5$  tonnes et en 1990, les ventes étaient estimées à 115.2 millions de dollars. La principale utilisation de ce genre de coagulants se pratique dans les usines de traitement des eaux usées. Le rapport OH/M correspond au nombre moyen de ligand  $n$ , qui est un des paramètres importants de la solution. Les produits d'hydrolyse présents dans une solution sont fonction de la concentration de M, du pH, de la température et du rapport  $n$ .

### 3.4.3.2 Synthétiques organiques

Les floculants synthétiques organiques sont des polymères solubles dans l'eau dont le poids moléculaire varie de  $10^3$  à  $20 \times 10^6$ . Lorsque des parties de la chaîne sont chargées, il s'agit de polyélectrolyte. Les polyélectrolytes qui possèdent à la fois une charge négative et positive et sont appelés, polyampholytes. Certains polymères ne contiennent aucune charge. La poly(oxyde d'éthylène) et certains agencements de la polyacrylamide sont des polymères de la sorte, ils sont dits : non ioniques. Dans la littérature, on tend cependant à les inclure comme polyélectrolyte.

La molécule de polyacrylamide peut varier beaucoup en poids moléculaire et en densité de charge, c'est pourquoi elle est souvent utilisée. La densité de charge fait référence au pourcentage du monomère acrylique qui porte une charge; si le polymère ne porte pas de charge, il est homopolymère-polyacrylamide.

Si le polymère est hydrolysé complètement avec du NaOH, le produit comprend « n » segments d'acrylate de sodium, qui est un polyélectrolyte anionique ayant une densité de charge de 100%. La densité de charge peut être contrôlée de 0 à 100% par le manufacturier.



**Figure 3. 8 (A) Homopolymère-polyacrylamide. (B) Monomère acrylique hydrolysé complètement avec du NaOH.**

Par des réactions semblables, la production de polymère cationique peut également être faite. Il serait à prévoir, étant donné la plus grande présence d'ions chargés négativement, que l'utilisation de ce genre de polymère soit faite. Toutefois, la production de polymères cationiques demeure moins économique que celle de polymères anioniques.

Les floculants synthétiques organiques sont vendus sous plusieurs formes : poudre, granule, solution aqueuse, gel. Plusieurs polymères de faible poids moléculaire sont commercialisés sous forme de solution aqueuse relativement concentrée, facile à manipuler. Mais, plus le poids moléculaire augmente, plus la viscosité augmente; la concentration, par le fait même, doit être diminuée pour faciliter les manipulations. Ainsi pour une même quantité de floculant, une concentration plus faible signifie des coûts supplémentaires en transport et en entreposage, étant donné la plus grande quantité de solution.

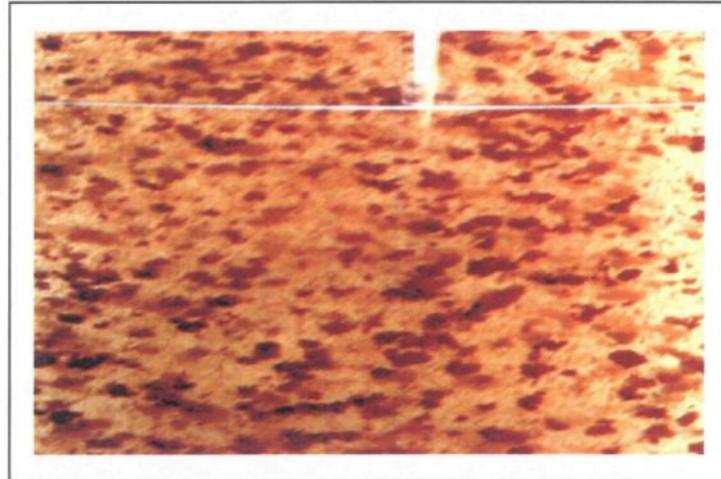
### 3.4.4 Facteurs influençant la floculation

Dans la pratique, certains facteurs doivent être pris en considération pour augmenter l'efficacité de la floculation. Ces facteurs sont les suivants [43] :

- 1- Diluer considérablement le floculant ajouté dans la pulpe (<0.1%);
- 2- ajouter le floculant le plus près possible de l'endroit où la floculation est désirée;
- 3- ajouter le floculant dans un endroit relativement turbulent;
- 4- ajouter le floculant en différents endroits;
- 5- ajouter le floculant de façon à ce qu'il entre en contact avec le plus grand volume possible de la substance à floculer;
- 6- éliminer la turbulence une fois que les flocons sont formés;
- 7- ajouter un peu de solide recyclé, à basse concentration en solide;
- 8- diluer le solide avec le liquide recyclé, à haute concentration en solide.

**Tableau 3. 1 Choix du poids moléculaire des floculants en fonction de la technique de séparation utilisée.**

Types de procédé	poids moléculaire
Sédimentation et centrifugation	Élevé
Filtration sous vide	Élevé à moyen
Filtration sous pression	Moyen à faible
Clarification (faible concentration solide)	Très faible à élevé



**Figure 3. 9 Boue floculée à l'intérieur de la liqueur Bayer (flocs).**

La figure 3.9 montre la sédimentation de la boue après flocculation. Cette flocculation a été effectuée en laboratoire avec du polyacrylamide, dans des conditions optimales.

### **3.4.5 Implication pratique**

C'est l'emploi de floculants synthétiques qui permet d'utiliser des décanteurs plutôt qu'un nombre imposant de filtres. La flocculation est donc d'une importance capitale pour obtenir un rendement élevé des décanteurs.

Les agents floculants diffèrent de tous les autres produits de l'industrie chimique en ce qu'ils ne dépendent pas uniquement de la quantité ajoutée, mais aussi de la concentration de la solution et de la façon dont le floculant est ajouté.

Dans le cas du procédé Bayer, le floculant, sous forme de poudre, est dissout pour obtenir une solution de faible concentration (de l'ordre de 0.1%). Cette solution est ensuite ajoutée en amont, à même la conduite d'alimentation du décanteur dans lequel la flocculation s'opère. Le point d'addition du floculant est d'une importance primordiale car il a un effet significatif sur la performance directe du floculant. La turbulence dans la conduite et dans le puits d'alimentation permet un mélange plus uniforme du floculant et de la solution, ce qui favorise la formation de flocs. Cette turbulence peut cependant causer l'effet contraire et briser les flocs. Dans la conception d'un appareil de séparation solide/liquide, tel un épaississeur, l'ajout de floculant en plusieurs points est recommandé. Dans le cas présent, il y a addition de floculant dans la conduite et directement dans le puits d'alimentation.

## **La décantation des particules de boue rouge**

### **4.1 Introduction**

À cette étape du procédé Bayer, la liqueur caustique renfermant l'alumine en solution forme un colloïde appelé pulpe de boue rouge, composée de la liqueur même et des particules insolubles lors de la digestion de la bauxite. Avant de passer à l'étape suivante, la liqueur doit être débarrassée des particules solides qu'elle contient. La technique utilisée pour purifier la liqueur Bayer est la décantation continue à l'intérieur d'immenses réservoirs appelés, décanteurs.

La séparation des phases solides et liquides d'une suspension comprend généralement deux étapes. La première étape physico-chimique implique la conversion des petites particules non floculées du colloïde en de plus grosses particules afin d'obtenir deux phases distinctes : un surnageant clair et propre, et une phase solide composée de particules plus grosses et plus facile à décanter. Cette opération est effectuée par l'ajout d'agents floculants, une étape importante puisqu'elle permet d'établir les conditions requises pour que la seconde étape soit efficace. Cette deuxième étape, la plus importante du procédé de séparation, correspond au compactage des agglomérats dans le but d'obtenir une masse solide compacte ne contenant qu'un minimum de liquide.

Dans cette section seront décrits dans l'ordre, le phénomène de la sédimentation à trois phases, les différentes forces agissant sur les particules et le calcul des vitesses de sédimentation des particules de boue fine et de sable durant le procédé de décantation.

## 4.2 La sédimentation des particules

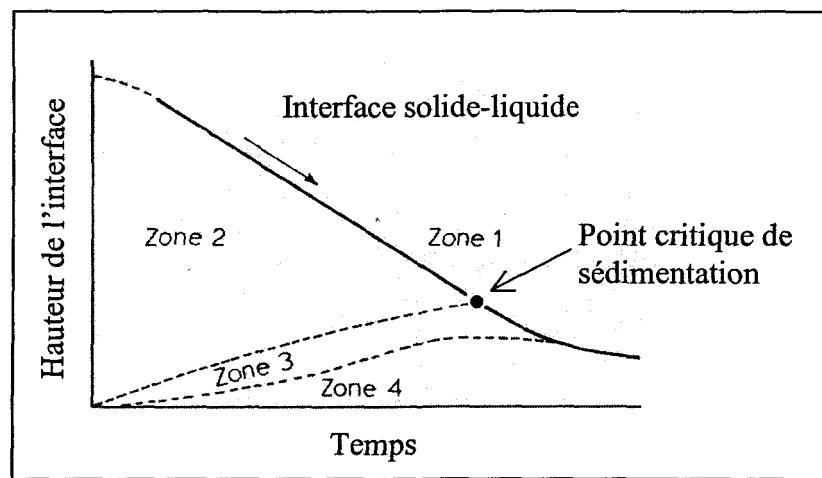
La sédimentation est la formation lente d'un dépôt; elle est basée sur le déplacement de particules solides dans un fluide.

### 4.2.1 Phénomène de la sédimentation à trois phases

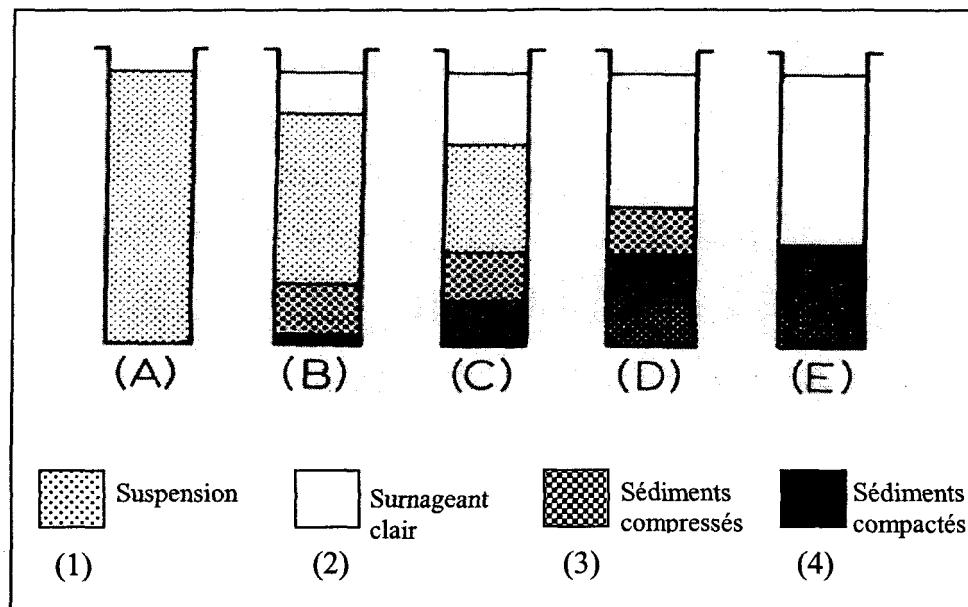
La sédimentation des particules floculées est un procédé complexe qui implique le réarrangement des sédiments, longtemps après que les flocons eux-mêmes aient sédimenté. Les flocons situés au fond du récipient sont compressés par le poids des sédiments qui s'ajoutent au-dessus d'eux. Puisque les flocons sont des amas de particules liées entre elles par de faibles forces et qu'ils contiennent dans leurs structures une quantité de liquide non négligeable, il en résulte des variations de la densité des sédiments.

La figure 4.1 représente un graphique continu des quatre phases observées durant la sédimentation d'une solution floculée. La figure 4.2 illustre les différentes étapes survenant lors de la sédimentation. Le cylindre A contient une suspension uniforme mais floculée. Le cylindre B montre la situation quelques instants plus tard, lorsque les sédiments floculés commencent à s'accumuler au fond du cylindre. La zone noircie (4) est composée de gros flocons qui commencent à se compresser sous le poids des autres flocons qui s'accumulent. La partie située immédiatement au-dessus est une zone de transition entre la suspension et les

sédiments; elle possède une densité plus faible que la zone (4). Cette zone (3) est appelée, zone de compression, et c'est à l'intérieur de cette zone que la majeure partie du liquide emprisonné dans les flocs est évacué. La zone supérieure (2) est idéalement constituée de liquide clair exempt de suspension. Cette partie contient l'alumine en solution qui doit être récupérée dans le procédé Bayer. Le cylindre C illustre les effets de la sédimentation continue; à ce stade-ci, le volume de suspension diminue tandis que le volume de la zone supérieure et de la zone inférieure augmente pendant que le volume de la zone de transition reste relativement stable. Le cylindre D montre le point critique de la sédimentation. À ce stade, il n'y a plus de suspension; les trois phases toujours existantes sont le surnageant clair, la zone de transition et les sédiments. Jusqu'à ce point, le graphique montre que l'interface solide-liquide varie de façon quasi linéaire en fonction du temps. À partir de ce point, une zone de transition est observée. La sédimentation se poursuit mais à un rythme de plus en plus lent, jusqu'au stade E qui constitue l'état final. La période nécessaire à cette compression représente la majeure partie du temps impliqué dans le procédé complet. Le liquide contenu à l'intérieur des flocs, lors de leur sédimentation, est exsudé très lentement sous le poids des sédiments des couches supérieures. Cette exsudation se continue jusqu'à l'obtention d'un équilibre caractéristique du corps.



**Figure 4. 1** Graphique continu des phases observées durant la sédimentation [43].



**Figure 4. 2** Sédimentation d'une suspension floculée [43].

### 4.2.2 Les forces agissant sur une particule

Pour expliquer la sédimentation, il faut tout d'abord faire un survol des forces agissant sur la particule qui sédimente. Le déplacement d'une particule dans un fluide est régi par l'influence de trois grandes forces : la force d'inertie  $F_i$ , la force de corps  $F_b$  et la force de surface nette  $F_s$ . Avec comme équation résultante à l'équilibre:

$$F_i + F_b + F_s = 0 \quad (4.1)$$

La force de corps est une force résultante qui inclue la force de traînée  $F_D$ , la force de Magnus  $F_L$ , l'inertie du fluide (la masse ajoutée et la force de Basset  $F_{Bh}$ ) ainsi que la diffusion Brownienne. Elle est causée par des champs extérieurs de sources diverses telles que; la gravité, le magnétisme, l'électrostatisme, etc. Pour leur part, les forces de surface et d'inertie sont relativement faciles à comprendre dans le cas d'une particule seule [40, 43].

#### 4.2.2.1 La force de traînée $F_D$

Si  $V_r$  est la vitesse d'un fluide par rapport à une particule projetée à travers un plan  $A_p$ , alors la force de traînée calculée dans le sens de  $V_r$  est donnée par une expression définie par le coefficient de traînée  $C_D$ :

$$F_D = 0.5C_D A_p \rho_L |v_r| \quad (4.2)$$

où  $C_D$  = coefficient de traînée

$\rho_L$  = densité du liquide ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  = aire du plan ( $\text{m}^2$ )

$v_r$  = vitesse relative du fluide par rapport à une particule ( $v_r = v_L - v_p$ ) ( $\text{m/s}$ )

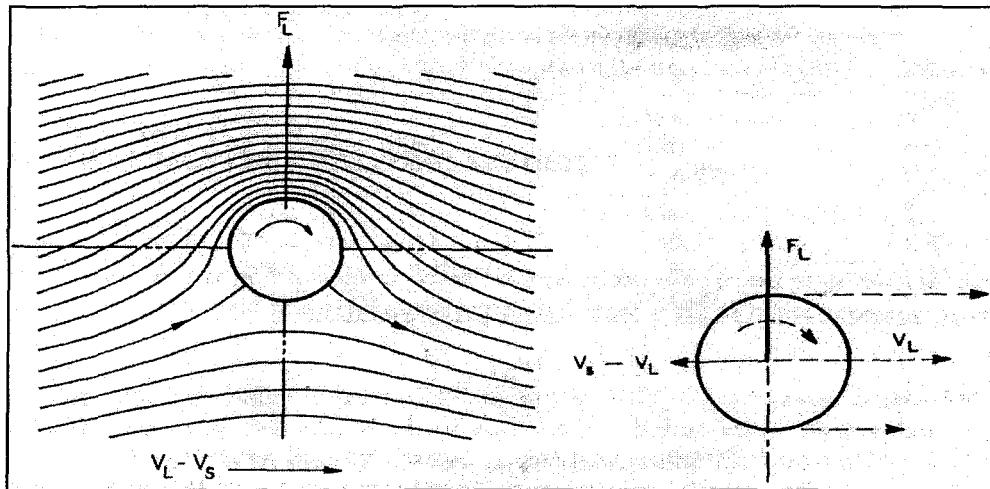
et où  $C_D$  dépend de la forme de la particule, du nombre de Reynolds pour la particule, de la densité caractéristique de la particule, du degré de turbulence, etc. Le coefficient de traînée peut être déterminé de différentes façons [40].

#### 4.2.2.2 La force de Magnus « lift force »

Lorsqu'une vitesse relative existe entre le solide et le liquide, elle induit une vitesse de rotation à la particule. L'intensité de la force produite par cette différence de vitesse s'exprime en terme de coefficient de poussée :

$$C_L = F_L / 0.5 \rho_L v_r^2 (\pi^2/4) \quad (4.3)$$

où le terme entre parenthèses indique la projection de l'aire d'une sphère.



**Figure 4. 3 (A) Circulation et force de Magnus ( $F_L$ ) appliquée sur un cylindre. [40].**

#### 4.2.2.3 L'inertie du fluide

L'effet de la masse ajoutée résulte du gradient de pression induit à l'intérieur du fluide lorsqu'il y a une accélération relative des particules à l'intérieur de ce dernier. Cet effet peut être estimé à partir de la théorie du potentiel d'écoulement, dont l'effet de la viscosité est négligé. La force dépend aussi de la taille et de la forme de la particule :

$$F_{am} = C_s(\pi d^3/6)\rho_L(dV/dt) \quad (4.4)$$

où  $C_s$  est un facteur de forme adimensionnel. La masse ajoutée  $C_s(\pi d^3/6)\rho_L$  correspond à la masse de fluide, dont l'effet d'inertie est le même que celui du solide accéléré.

#### 4.2.2.4 La diffusion Brownienne

La diffusion de très fines particules dans un liquide résulte de leurs collisions avec les molécules du liquide. La composante de ce flux dans la direction x peut être décrite par la première loi de Fick :

$$J_x = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (4.5)$$

où  $c$  = la concentration de particule et  $D$  le coefficient de diffusion ( $m^2/s$ ).

#### 4.2.2.5 Les forces de corps électromagnétiques

Lorsqu'une particule de charge  $q$  (Coulomb) et de vitesse  $v_p$ , se déplace dans un champ électrique d'intensité  $E$  ( $V/m$ ) et d'induction magnétique  $B$  (Teslas), l'expérience montre que la force  $F$  (Newton) égale :

$$F = q(E + v_p \times B) \quad (4.6)$$

Le courant transporté par la particule est  $qv_p$  (Ampère).

Pour ce qui est des forces de surfaces entre les particules dispersées, elles sont discutées de façon plus exhaustive dans le livre de Shook and Roco [40].

#### 4.2.3 La vitesse de sédimentation

Pour illustrer la sédimentation, considérons les cas idéaux dans lesquels les particules sont de mêmes tailles et non agglomérées. Bien que ce cas ne soit que théorique, il peut être appliqué à des solutions contenant des particules de différentes tailles, agglomérées ou non.

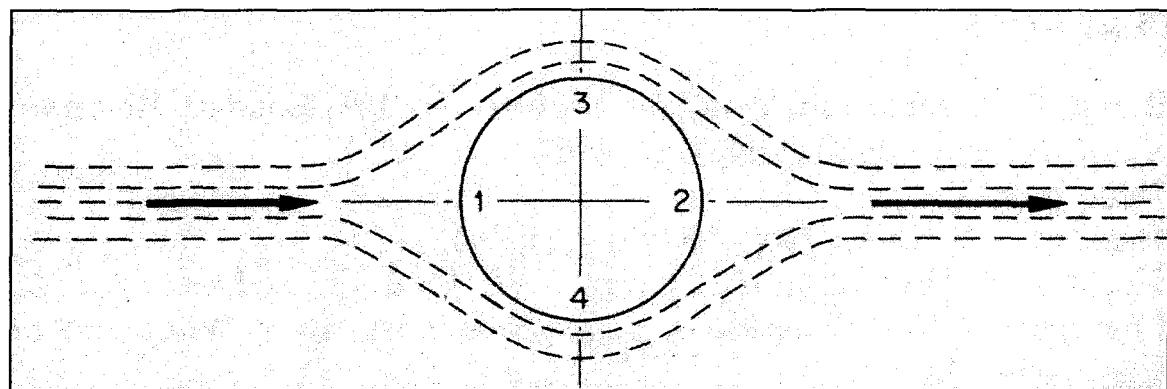
Considérons le déplacement relatif d'une particule dans un volume infiniment grand de liquide. En considérant le déplacement relatif entre une particule et le liquide, les cas suivants sont donc inclus :

- (1) une particule stationnaire dans un fluide se déplaçant;
- (2) une particule se déplaçant dans un fluide stationnaire;
- (3) une particule et un fluide se déplaçant en sens inverse;
- (4) une particule et un fluide se déplaçant dans un même sens, mais a des vitesses différentes.

Lorsqu'une particule se déplace dans un fluide (figure 4.4), ce fluide est amené à l'état de repos dans les zones 1 et 2. L'équation de Bernoulli démontre qu'en ces points, les pressions atteignent des maximums. De la même façon, les vitesses sont maximales au

point 3 et 4 et, par conséquent, les pressions sont minimales [20]. Plus la vitesse relative augmente, plus la pression au point 2 augmente. Ceci découle du fait que la pression force le fluide à se scinder en deux couches à la surface de la particule. La formation de ces tourbillons à l'intérieur du fluide entraîne une dissipation de l'énergie. La force alors exercée sur la particule correspond à la force de contrainte.

À très faible vitesse, il n'y a pas de séparation du liquide à la surface de la particule; seule la force de friction s'exerce sur elle (régime laminaire). À haute vitesse, les forces appliquées sur la particule sont donc une combinaison de la force de contrainte et de la force de friction [20].



**Figure 4. 4 Particule en mouvement dans un fluide [20].**

Considérons une particule sphérique de diamètre  $d_p$  et de densité  $\rho_p$ , sédimentant de façon constante avec une vitesse linéaire  $v_p$ , sous l'influence de la gravité, dans un fluide de densité  $\rho_L$ . La force de gravité exercée sur la particule sera donnée par l'équation 4.7 :

$$F_g = (\pi d_p^3/6)(\rho_p - \rho_L)g \quad (4.7)$$

où ( $\pi d_p^3/6$ ) = volume d'une particule sphérique.

La force de traînée appliquée sur la particule par le fluide  $F_D$  est donnée par l'équation 4.8 :

$$F_D = C_D S_p (\rho v_p^2/2) \quad (4.8)$$

où  $C_D$  est le coefficient de traîné et  $S_p$ , la projection de l'aire de la particule dans un plan perpendiculaire à la direction de son propre déplacement.

À débit constant, les forces  $F_D$  et  $F_g$  sont équivalentes et de sens contraires ; en les combinant, l'équation 4.9 est obtenue :

$$(\pi d_p^3/6)(\rho_p - \rho_L)g = C_D S_p (\rho v_p^2/2) \quad (4.9)$$

Pour une particule sphérique  $S_p = \pi d_p^2/4$ , l'équation 4.9 peut s'écrire de cette façon :

$$v_f = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_p - \rho_L)g}{3C_d\rho_L}} \quad (4.10)$$

où  $v_f$  correspond à la vitesse de sédimentation terminale ou « falling velocity ».

Le coefficient de contrainte adimensionnel est une fonction du nombre de Reynolds, défini comme suit :

$$(N_{Re})_p = \rho_L v_p d_p / \mu_L \quad (4.11A)$$

$$(N_{Re})_p = v_p d_p / \nu_L \quad (4.11B)$$

où  $\rho_L$ ,  $\mu_L$  et  $\nu_L$  sont respectivement la densité, la viscosité moléculaire et la viscosité cinématique du fluide avec  $\nu_L = \mu_L / \rho_L$ .

Si la valeur du nombre de Reynolds est inférieure à 0.2, la particule se trouve dans un régime de Stokes et le coefficient de traînée est défini comme suit :

$$C_D = 24/(N_{Re})_p \quad (4.12)$$

Cette équation peut être appliquée à des particules dont le diamètre maximal est donné par l'équation 4.13 :

$$d_{p(\max)} = \left( \frac{3.6 \mu^2}{(\rho_p - \rho_f) \rho_f g} \right)^{1/3} \quad (4.13)$$

En combinant 4.12 et 4.11 cela donne l'équation de Stokes qui définit la vitesse de sédimentation terminale d'une particule sphérique comme suit :

$$v_p = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_L) g}{18 \mu} \quad (4.14)$$

Si le nombre de Reynolds se situe entre 0.2 et 500, la particule se trouve dans un régime transitoire ; il faut, par conséquent, tenir compte de la correction de Oseen et le coefficient de traînée devient alors [5,40] :

$$C_D = \frac{24}{(N_{Re})_p} \left[ 1 + \frac{3}{16} (N_{Re})_p \right] \quad (4.15)$$

Il faut noter que trois différents facteurs de correction, plus ou moins équivalents, ont été développées pour le régime transitoire [36,40].

Si le nombre de Reynolds est supérieur à 500, la particule se trouve dans un système Newtoniens et le coefficient devient :

$$C_D = 0.44 \quad (4.16)$$

Pour une particule non sphérique, il faut appliquer un facteur de correction et l'équation 4.10 devient :

$$v_f = \sqrt{\frac{4d_p \psi (\rho_p - \rho_L) g}{3C_d \rho_L}} \quad (4.17)$$

où  $\psi$  est un facteur de correction adimensionnel.

Pour la majorité des particules solides dans un fluide, le nombre de Reynolds se situe sous la valeur de 500 et leur vitesse de sédimentation peut être estimées par itération. Le traitement des équations précédentes est donné de façon plus exhaustive dans les ouvrages de Brodkey, de Murphy, de Holland et de Rousseau [5,20,26,35].

À l'intérieur d'un décanteur, plusieurs cas de sédimentation sont observés : la pulpe avant la flocculation, le sable à l'intérieur de la pulpe, le sable dans la boue et la pulpe flokulée.

#### 4.2.4.1 La pulpe non flokulée

À son arrivée à l'intérieur du décanteur, la pulpe est composée principalement de liquide Bayer et de particules en suspension. La taille des ces particules dépend de la provenance de la bauxite et du type de broyage appliqué. La taille moyenne des particules contenues dans la pulpe, pour les expériences effectuées, se situait aux environs de 1 à 10 microns. Cette pulpe provenait de l'usine Vaudreuil, sous un broyage sec<sup>1</sup>. À cette taille, il s'agit d'une suspension qui se rapproche du type colloïdal et son apparence ressemble à celle de la teinture. Pour ce type de suspension, les particules sont régies par la diffusion Brownienne autant que par la force de gravité. Cela signifie que l'énergie résultante des collisions entre les particules de solide et les particules du liquide suffit à maintenir la suspension. La sédimentation des particules solides est donc extrêmement lente ; l'ajout d'un agent flocculant est nécessaire pour favoriser l'agglomération des particules et en augmenter la vitesse de sédimentation (voir chapitre 3).

---

<sup>1</sup> La taille moyenne des particules a été déterminée selon une courbe de distribution de la granulométrie de la boue rouge calculée au Centre de Recherche et de Développement d'Arvida (Alcan).

#### 4.2.4.2 Le sable à l'intérieur de la pulpe

Pour estimer la vitesse de sédimentation d'une particule de sable dans la liqueur Bayer, il faut d'abord calculer le diamètre maximum des particules auxquels la loi de Stokes s'applique. Puisque la densité et la viscosité de la liqueur Bayer, à 10 g/L de NaOH, sont respectivement d'environ  $1030 \text{ kg/m}^3$  et  $1.01 \times 10^{-6} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ , et que la densité du sable utilisé durant les expériences est d'environ<sup>2</sup>  $3000 \text{ kg/m}^3$ , le diamètre maximum permettant une estimation relativement exacte de la vitesse de sédimentation avec l'équation de Stokes (4.14) est :

$$d_{p(\max)} = \left( \frac{3.6 \times (0.00101 \text{ kg/m}\cdot\text{s})^2}{(3000 \text{ Kg/m}^3 - 1030 \text{ Kg/m}^3) \times 1030 \text{ Kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right)^{1/3} = 57 \mu\text{m} \quad (4.18)$$

Pour une particule de sable de 400 microns, qui correspond au diamètre moyen des particules de sable présentes dans la boue, l'estimation obtenue avec l'équation de Stokes n'est pas valide. Il faut, par conséquent, appliquer le coefficient de correction de Oseen (équation 4.15) à l'équation de Stokes (équation 4.14) et procéder par itération.

La vitesse de sédimentation de la particule est d'abord estimée avec l'équation de Stokes.

$$v_p = \frac{(4 \times 10^{-4} \text{ m})^2 \times (3000 \text{ Kg/m}^3 - 1030 \text{ Kg/m}^3) \times 9.8 \text{ m/s}^2}{18 \times 1.01 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}\cdot\text{sec}} = 0.17 \text{ m/s} \quad (4.19)$$

---

<sup>2</sup> La densité du sable peut varier selon la provenance de la bauxite.

Le nombre de Reynolds est ensuite calculé à partir de cette vitesse :

$$(N_{Re})_p = \frac{1030 \text{ Kg/m}^3 \times 0.17 \text{ m/s} \times 0.0004 \text{ m}}{0.00101 \text{ Kg/m} \cdot \text{s}} = 69 \quad (4.20)$$

Le coefficient de traînée est calculé à partir de l'équation de Oseen et du nombre de Reynolds obtenu avec l'équation 4.20.

$$C_D = \frac{24}{(69)_p} \left[ 1 + \frac{3}{16} (69)_p \right] = 4.84 \quad (4.21)$$

La vitesse est enfin calculée de l'équation de Newton (4.10) :

$$v_f = \sqrt{\frac{4 \times 0.0004 \text{ m} (3000 \text{ Kg/m}^3 - 1030 \text{ Kg/m}^3) \times 9.81 \text{ m/s}^2}{3 \times 4.84 \times 1030 \text{ Kg/m}^3}} = 164 \text{ m/s} \quad (4.22)$$

Le nombre de Reynolds peut ensuite être recalculée à partir de cette vitesse et ainsi de suite jusqu'à ce que les valeurs obtenues convergent.

Le tableau 4.1 montre les valeurs de la vitesse de sédimentation, du nombre de Reynolds et du coefficient de traînée en fonction du nombre d'itérations effectuées. Les vitesses de sédimentation convergent après 4 itérations.

**Tableau 4. 1 Vitesses de sédimentation, ( $N_{Re}$ ) et coefficient de traînée en fonction du nombre d'itération pour une particule de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre.**

Itération #	Vitesse de sédimentation (m/s)	Vitesse de sédimentation (m/h)	Nombre de Reynolds ( $N_{Re}$ )	Coefficient de traînée $C_D$
1	$1.70 \times 10^{-1}$	612	69	4.85
2	$4.54 \times 10^{-2}$	164	19	5.79
3	$4.16 \times 10^{-2}$	150	17	5.92
4	$4.11 \times 10^{-2}$	148	17	5.93
5	$4.11 \times 10^{-2}$	147	17	5.93
6	$4.11 \times 10^{-2}$	147	17	5.93

Le diamètre des particules de sable peut varier selon la provenance de la bauxite : entre 100 et 600 microns ; le tableau 4.2 montre les vitesses de sédimentation calculées pour ces différentes diamètres.

**Tableau 4. 2 Vitesses de sédimentation des particules de sable dans la pulpe floculée.**

Diamètre $\mu\text{m}$	Nombre de Reynolds	Coefficient de traînée $C_d$	Vitesse de sédimentation des particules solides m/h
100	0.9	30	33
200	5	9.7	82
300	10	6.7	119
400	17	5.9	148
500	24	5.5	172
600	33	5.23	193

Par comparaison, des tests effectués en laboratoire ont montré que les particules de sable de 400 microns sédimentent à une vitesse<sup>3</sup> d'environ 100 mètres par heure. Bien que les vitesses de sédimentation estimées par cette méthode soient légèrement plus élevées que les vitesses mesurées, elles sont du même ordre de grandeur. Les vitesses de sédimentation du sable permettent de conclure qu'il coule littéralement sous le puits d'alimentation.

#### **4.2.4.3 Le sable à l'intérieur de la boue**

La vitesse de sédimentation du sable dans la boue se calcule de la même façon que dans la liqueur Bayer. Pour calculer le diamètre maximum des particules auxquels la loi de Stokes s'applique, il faut utiliser la densité de la boue qui est obtenue par le débitmètre massique placé à la sousverse. Les valeurs de densité de la boue à la sousverse varient entre 1650 kg/m<sup>3</sup> et 1980 kg/m<sup>3</sup>. Pour ces cas limites, la viscosité de la boue, déterminé à l'aide d'un rhéomètre, varie entre 4 kg/m·s et 30 kg/m·s.

Ainsi, le diamètre maximum permettant une estimation relativement exacte de la vitesse de sédimentation avec l'équation de Stokes devient :

$$d_{p(\max)} = \left( \frac{3.6 \times (4 \text{ kg/m} \cdot \text{s})^2}{(3000 \text{ Kg/m}^3 - 1650 \text{ Kg/m}^3) \times 1650 \text{ Kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right)^{1/3} = 13800 \mu\text{m} \quad (4.23)$$

pour le premier cas et,

$$d_{p(\max)} = \left( \frac{3.6 \times (30 \text{ kg/m} \cdot \text{s})^2}{(3000 \text{ Kg/m}^3 - 1850 \text{ Kg/m}^3) \times 1850 \text{ Kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right)^{1/3} = 54000 \mu\text{m} \quad (4.24)$$

pour le second.

---

<sup>3</sup> Données provenant de Centre de Recherche et de développement d'Arvida (CRDA).

Pour une particule de sable de 400 microns, qui correspond au diamètre moyen des particules de sable présentes dans la boue, l'estimation obtenue avec l'équation de Stokes est valide pour les deux cas et devient.

$$v_p = \frac{(4 \times 10^{-4} \text{ m})^2 \times (3000 \text{ Kg/m}^3 - 1650 \text{ Kg/m}^3) \times 9.8 \text{ m/s}^2}{18 \times 4 \text{ Kg/m} \cdot \text{sec}} = 2.94 \times 10^{-5} \text{ m/s} \quad (4.25)$$

et

$$v_p = \frac{(4 \times 10^{-4} \text{ m})^2 \times (3000 \text{ Kg/m}^3 - 1850 \text{ Kg/m}^3) \times 9.8 \text{ m/s}^2}{18 \times 30 \text{ Kg/m} \cdot \text{sec}} = 3.34 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad (4.26)$$

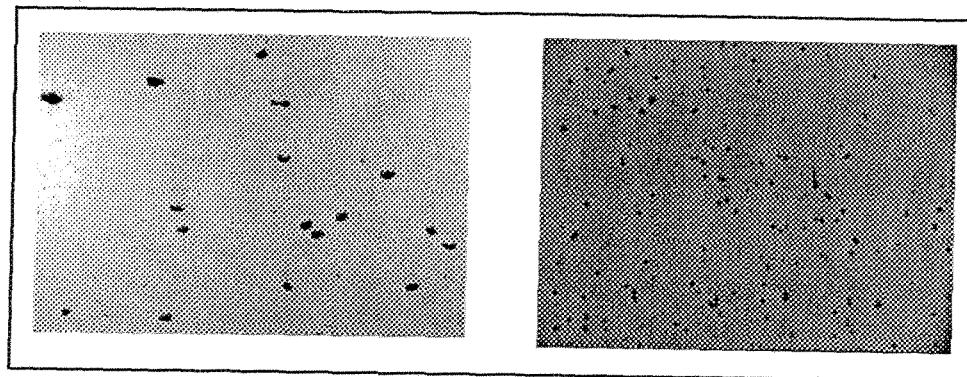
Les vitesses de sédimentation du sable dans la boue compactée peuvent donc varier selon le tableau 4.3 :

**Tableau 4. 3 Vitesses de sédimentation des particules de sable dans la boue compactée.**

Diamètre de la particule de sable μm	Densité du sable kg/m <sup>3</sup>	Vitesse de sédimentation des particules de sable			
		$\rho_{\text{boue}} = 1650 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ m/s	$\rho_{\text{boue}} = 1650 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ m/h	$\rho_{\text{boue}} = 1850 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ m/s	$\rho_{\text{boue}} = 1850 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ m/h
100	3000	$2 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-7}$	$7 \times 10^{-4}$
200	3000	$7 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-3}$
300	3000	$2 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-3}$
400	3000	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-2}$
500	3000	$5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-2}$
600	3000	$7 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-1}$	$8 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-2}$

#### 4.2.4.4 La pulpe floculée

Il est très difficile d'estimer ou de calculer la vitesse de sédimentation d'une seule particule de boue floculée à l'intérieur d'un décanteur. En effet, cette vitesse dépend de plusieurs facteurs tels la concentration, l'interaction entre les particules, la turbulence, la quantité de floculant, le débit d'alimentation, la forme et la densité des flocs, etc. En usine comme en laboratoire, la vitesse de sédimentation des particules de boue floculée est déterminée pour une population, et cette vitesse de sédimentation s'appelle : vitesse de sédimentation entravée ou «*hindered velocity*». La figure 4.5 montre deux exemples de particules de boue obtenues après flocculation.



**Figure 4. 5 Flocs.**

Faute d'équation permettant de calculer cette vitesse de sédimentation il faut la déterminer, de façon expérimentale, en mesurant la vitesse de la ligne de boue ou «*mud line*» qui correspond à l'interface entre la boue et la liqueur (figure 4.6).

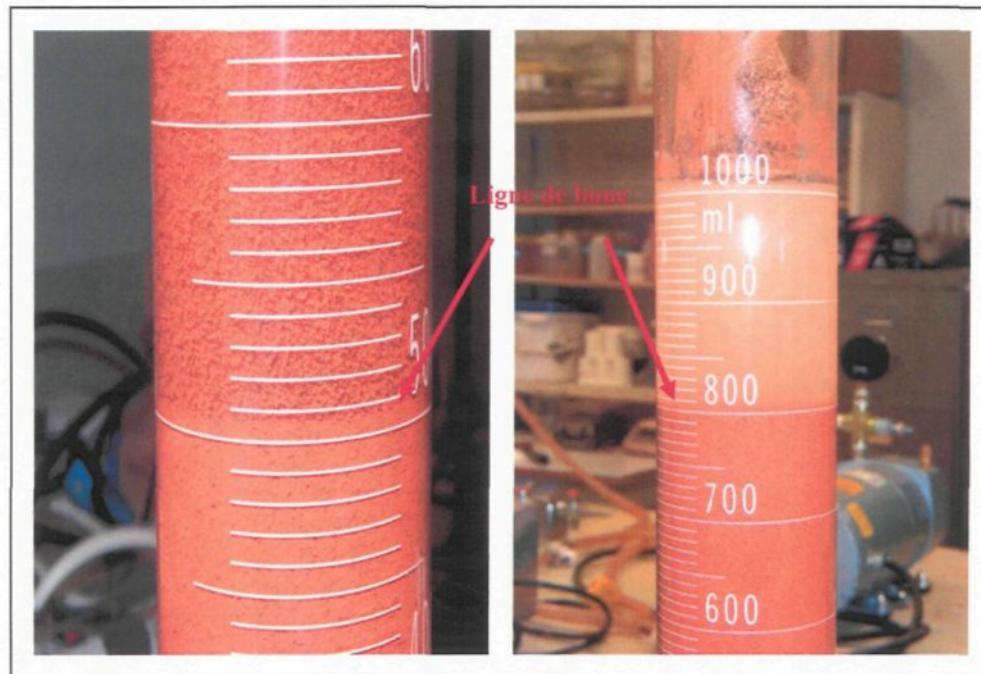
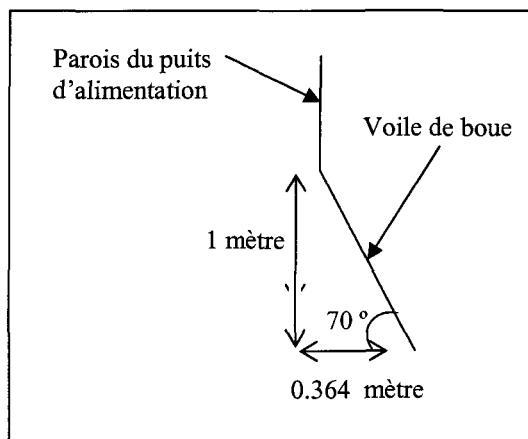


Figure 4.6 Ligne de boue ou «mud line» à l'intérieur d'un cylindre gradué.

En usine, certains facteurs de rentabilité, de contrôle, de temps de résidence et autres font en sorte que la vitesse de sédimentation entravée «hindered» est fixée aux alentours de 20 mètres à l'heure. Pour ce faire, les opérateurs fixent les ratios des débits de floculant et de pulpe.

Pour déterminer la distribution des particules de boue flokulée sous le puits d'alimentation, à 20 m/h, des échantillons sont prélevés à l'aide d'une tige de plexiglas transparente de deux mètres, marquée à chaque centimètre et reliée à une petite pompe. Cette tige, plongée à différents endroits et à différentes profondeurs, permet de repérer précisément où se trouvent les flocs. Ces données indiquent que les particules de boue

descendent selon un angle maximal d'environ  $70^\circ$ . Ces mesures signifient qu'à chaque déplacement verticale d'un mètre de la boue correspond un déplacement horizontale ou étalement de 0.364 mètre de chaque côté du puits d'alimentation.



**Figure 4. 7 Représentation du voile de boue.**

Les calculs de voile de boue laissent supposer qu'une grande partie de la boue sédimente directement sous le puits d'alimentation et, par conséquent, que plus les flocons sont gros, plus ils sédimentent près du centre. Puisque les gros flocons contiennent plus de floculant, il faut s'attendre à ce que la boue qui se retrouve directement sous le puits d'alimentation ou en sa périphérie soit plus visqueuse que celle dans le reste du cône. Si l'on ajoute à cela le sable qui coule directement au fond et qui remplace lentement la boue, il faut s'attendre à retrouver au centre du cône une masse solide très compacte, composée en majeure partie de sable et de floculant.

#### **4.2.5 Facteurs influençant la sédimentation**

Les principaux facteurs influençant la vitesse et la nature de la sédimentation sont

[21,39] :

- 1- La nature de la particule : taille, forme, propriétés chimiques et minéralogiques, etc.
- 2- Le ratio de la concentration de la phase solide versus la phase liquide.
- 3- La nature du pré-traitement (floculation-coagulation).
- 4- La nature des infrastructures contenant la solution.
- 5- La différence de densité entre la phase liquide et la phase solide.
- 6- La viscosité du liquide.

##### **4.2.5.1 La nature des particules**

La forme des particules et leur niveau d'agglomération influencent grandement leur vitesse de sédimentation. Une particule sphérique sémente beaucoup plus rapidement qu'une particule de forme quelconque [19,40,43]. Les propriétés chimiques et minéralogiques peuvent elles aussi avoir un effet sur la vitesse de sédimentation, car elles peuvent provoquer une auto-coagulation des particules ou former des liens avec le fluide, etc. [19,41,43].

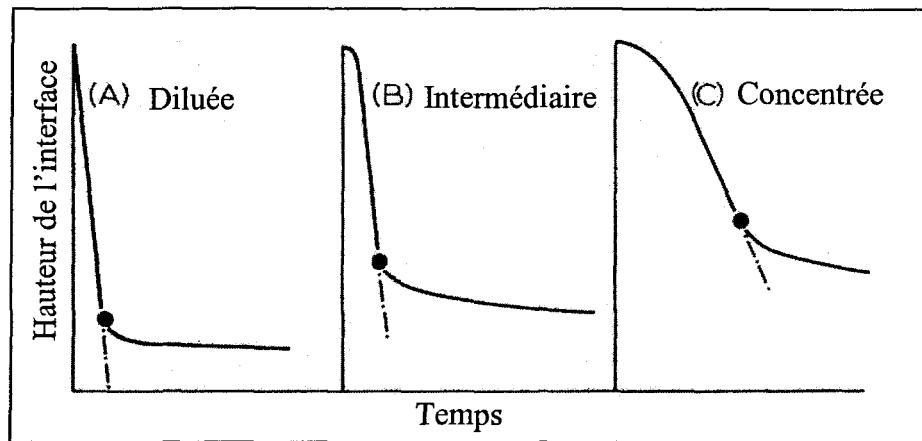
#### 4.2.5.2 L'effet de la concentration des particules

Dans la partie 4.2, il a été question de la sédimentation libre d'une particule « free settling ». Dans un bassin, lorsqu'un fluide contient une certaine concentration de particules, la sédimentation de chaque particule est influencée par les autres particules et par la présence des parois du bassin. Dans ce cas, il ne s'agit plus de « free settling » mais de sédimentation entravée « hindered ». L'interférence entre deux particules est négligeable si elles se trouvent à une distance d'au moins 10 fois leur diamètre ou si elles sont éloignées des parois du bassin selon cette même proportion; dans ces deux derniers cas, il s'agit encore de sédimentation libre ou « free settling ».

La sédimentation entravée « hindered » résulte de la collision des particules entre elles et avec les parois du bassin. L'ajout d'une forte concentration de particules réduit l'espace de déplacement, ce qui augmente la vitesse du fluide de façon linéaire, avec pour conséquence une diminution du taux de sédimentation. De plus, une concentration élevée de particules augmente la densité et la viscosité apparente du fluide [20].

Dans des conditions de sédimentation en fournée ou « batch settling », le comportement d'une suspension floculée, dont on varie la concentration initiale de solide, a été observé sous trois modes différents. Ainsi ces trois modes coïncident avec la séparation de la suspension sous trois concentrations différentes : diluée, intermédiaire et concentrée, comme montré à la figure 4.6 [43]. Dans la solution diluée, les grains individuels ou floculés se comportent de façon discrète et sédimentent librement en retournant, au-dessus

d'eux et sans contrainte, le liquide qu'ils déplacent en sédimentant. Dans de la solution intermédiaire, les flocs sont en contact mutuel mais libre; ils sédimentent par canaux, ce qui implique que la hauteur du bassin doit être suffisamment grande. Les canaux formés sont proportionnels au diamètre des flocs. Dans le cas d'une pulpe concentrée, la formation de canaux, qui a pour effet de faciliter le retour du liquide vers le dessus du floc, est impossible parce qu'il n'y a pas suffisamment d'espace autour du floc ou parce qu'il n'y a pas suffisamment de liquide immédiatement sous le floc. Le seul débit de liquide possible pour remplacer l'espace occupé par le floc descendant provient des interstices entourant les flocs; ce débit étant extrêmement lent, il ralentit de façon considérable le taux de sédimentation [43].



**Figure 4.8 Effet de la concentration sur la sédimentation [43].**

Le point critique de sédimentation, mentionné précédemment, est facilement identifiable dans les trois comportements de sédimentation. Il correspond à une baisse

marquée du taux de sédimentation. Plus la concentration est élevée, et plus le bassin de sédimentation doit être de grand diamètre.

Les trois courbes de concentration différente comportent les trois mêmes étapes de sédimentation :

1. une zone de sédimentation, plus évidente dans la suspension diluée;
2. la formation de canaux, plus évidents dans la solution intermédiaire;
3. la compression, plus évidente dans la suspension concentrée.

Les travaux de Scott [38,39] présentent des équations mathématiques permettant de décrire les trois phases de façon satisfaisante.

#### **4.2.5.3 La nature du pré-traitement**

Ce facteur consiste essentiellement à altérer les propriétés initiales de la suspension, telle l'introduction d'agents flocculant, coagulant, neutralisant, etc. [43].

#### **4.2.5.4 La différence de densité entre le fluide et les particules**

L'influence de ces caractères est donnée par l'équation de la vitesse de sédimentation 4.13. [20,26,43].

#### 4.2.5.5 Infrastructures servant à la décantation

Plusieurs facteurs doivent être pris en considération lors de la construction des infrastructures servant à la décantation, car ils ont une influence directe et non négligeable sur cette dernière. Ces facteurs sont : la hauteur, le diamètre, la capacité de sédimentation du bassin, l'alimentation en pulpe et en floculant, la forme des râteaux, le couple disponible, etc. Dans cette partie, seul les râteaux seront discutés la partie description des infrastructures est traitée de façon très explicite dans les ouvrages de Svarovsky et du groupe Péchiney [24,43].

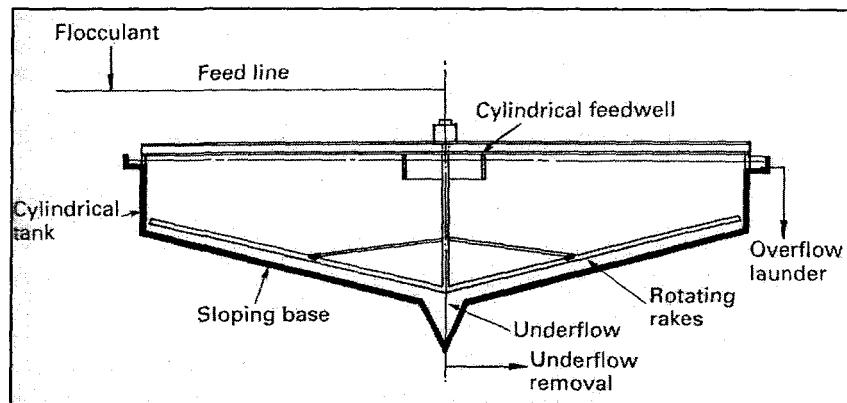


Figure 4. 9 Schéma simplifié d'un décanteur [43].

## La rhéologie de la boue rouge

### 5.1 Introduction

Pour comprendre le comportement de la boue rouge à l'intérieur d'un décanteur, sous l'action des râteaux, il faut d'abord faire une étude rhéologique<sup>4</sup> de notre matériel : la boue rouge.

Dans ce chapitre, il sera question de quelques généralités concernant les déformations, les vitesses de cisaillement et la viscosité. Puis il sera question des différentes propriétés du mode d'écoulement de la boue rouge. Finalement, l'influence de certains facteurs sur la viscosité de la boue sera abordée.

### 5.2 Généralités

Avant d'aborder les différents types d'écoulements et leurs caractéristiques, il est nécessaire d'introduire certaines généralités [13].

---

<sup>4</sup> La rhéologie est la partie de la physique qui étudie les relations entre l'écoulement de la matière sous l'influence des pressions, et les phénomènes de viscosité, de plasticité, etc.

### 5.2.1 Déformation et vitesse de cisaillement

#### 5.2.1.1 Les déformations de cisaillement

Pour définir la déformation de cisaillement, il est souhaitable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement présentant une symétrie plane, c'est-à-dire le cas où le matériau est cisaillé entre plans parallèles, l'un immobile, l'autre mobile (voir figure 5.1).

Considérons les particules de matière qui se trouvent dans une certaine section droite, au temps  $t=0$ . À un instant  $t=t_1$ , chaque particule de matière aura parcouru la distance  $u(x, t_1)$ , où  $x$  est la distance séparant la particule de matière de son point de départ. La variable  $x$  permet de se situer par rapport aux différentes couches planes du matériau.

La déformation de cisaillement, dans le cas de la symétrie plane, est définie par la relation :

$$\varepsilon(x, t) = \frac{du(x, t)}{dx} \quad (5.1)$$

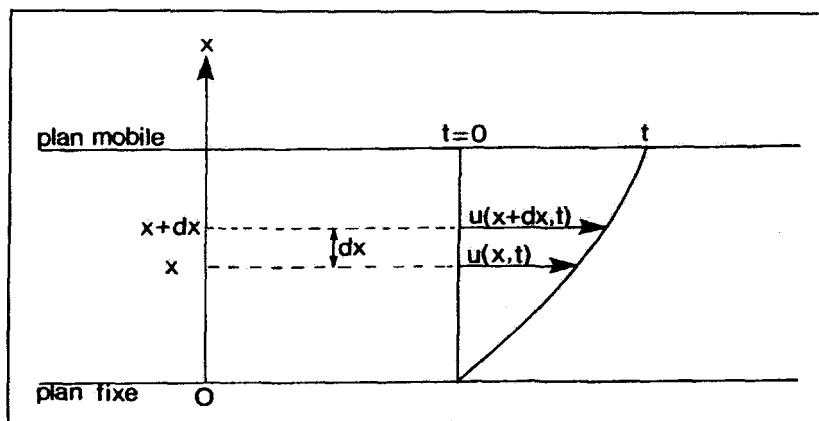


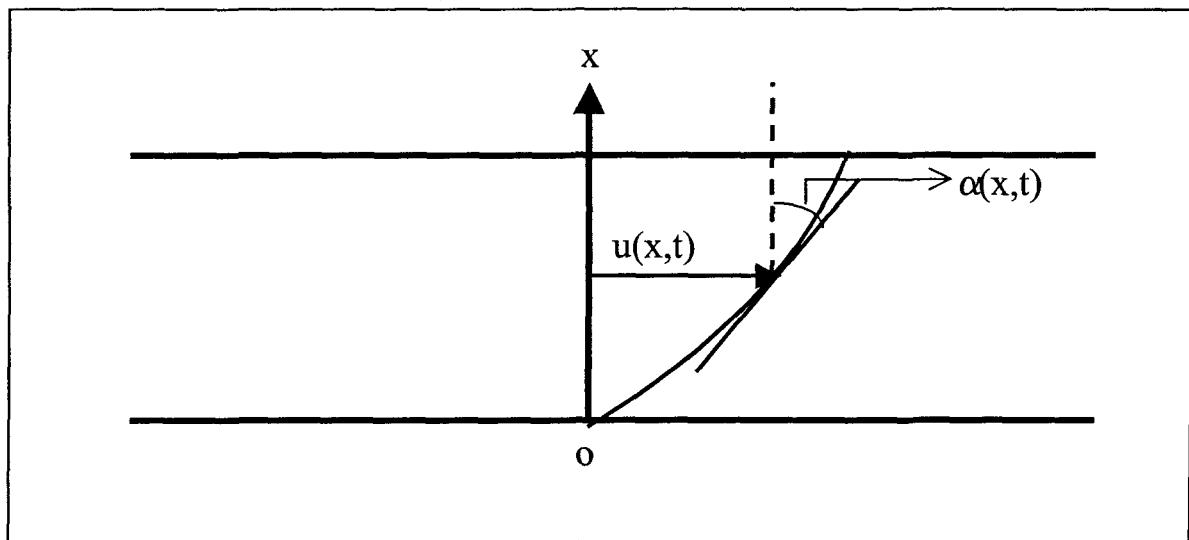
Figure 5. 1 Plan de cisaillement [18].

Précisons que cette grandeur ne dépend pas du déplacement lui-même (selon  $u$ ), mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment voisine (selon  $x$ ) : c'est en effet cette variation qui caractérise un mouvement de cisaillement.

La déformation de cisaillement  $\epsilon(x,t)$ , ainsi définie, est susceptible d'une interprétation géométrique simple :

$$\epsilon(x,t) = \operatorname{tg} \alpha(x,t) \quad (5.2)$$

où  $\alpha(x,t)$  représente l'angle que fait la tangente en  $x$ , à la courbe, joignant les extrémités des vecteurs de déplacement  $u(x,t)$  et l'axe des  $x$  (figure 5.2).



**Figure 5. 2 Représentation de l'angle  $\alpha$ . [18].**

En général,  $\epsilon(x,t)$  dépend non seulement du temps  $t$  mais encore de  $x$ , c'est-à-dire de la couche considérée.

### 5.2.1.2 Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$  est la dérivée, par rapport au temps, de la déformation de cisaillement  $\varepsilon$ ; c'est une vitesse de déformation :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (5.3)$$

$\dot{\varepsilon}$  a, par conséquent, les dimensions de l'inverse d'un temps et s'exprime en  $s^{-1}$ .

Dans le cas de la symétrie plane envisagé précédemment, il devient, en utilisant l'équation 5.1 :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt} \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{du}{dt} \quad (5.4)$$

Et puisque  $[du(x,t)/dt]$  représente la vitesse  $v(x,t)$  de la couche  $x$  à l'instant  $t$ , dans le cas de la symétrie plane, l'équation 5.5 qui exprime le gradient de vitesse est aussi vrai :

$$\dot{\varepsilon}(x,t) = \frac{dv(x,t)}{dx} \quad (5.5)$$

Notons que les équations présentées ici ne s'appliquent que dans le cas d'une symétrie plane; les cas généraux, beaucoup plus complexes, sont discutés dans des ouvrages spécialisés sur le sujet.

### 5.2.2 Équation rhéologique d'état et rhéogramme

Tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables du mouvement et les grandeurs cinématiques décrivant ce mouvement. Il en est de même en rhéologie, où existe une relation entre la

déformation de cisaillement  $\epsilon$  et la contrainte de cisaillement  $\tau$ , relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau. Cette relation sera notée :

$$\epsilon = f(\tau) \quad (5.6)$$

Cette équation est l'équation rhéologique de la substance; elle détermine toutes les propriétés rhéologiques du matériau. C'est pourquoi le but de la rhéologie est la détermination expérimentale de cette équation.

Les courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état sont appelées rhéogrammes.

### 5.2.3 Les viscosités

Les coefficients de viscosité sont des grandeurs physiques qui jouent un rôle essentiel en rhéologie; ils suffisent parfois à caractériser précisément le comportement rhéologique du matériau. La viscosité peut être définie selon plusieurs coefficients de viscosité.

#### 5.2.3.1 La viscosité dynamique ou viscosité apparente

Elle est définie par la relation :

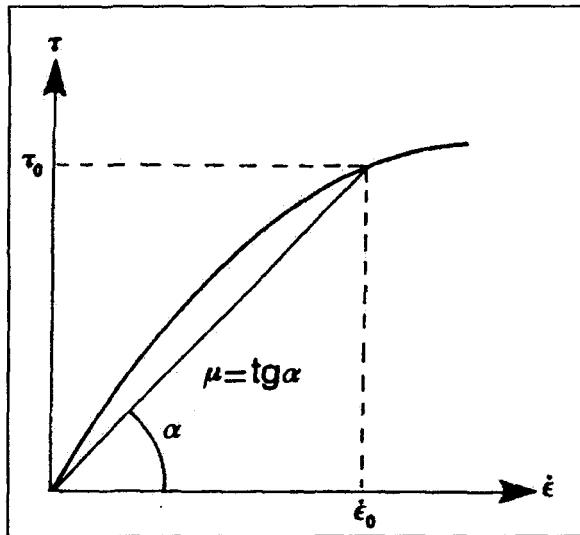
$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\epsilon}} \quad (5.7)$$

L'équation dimensionnelle de  $\mu$  est :

$$[\mu] = [M][L]^{-1} [T]^{-1} \quad (5.8)$$

et son unité est la poise. Il est clair que  $\mu$  est une fonction de la température  $T$  et de la pression extérieure  $P$  mais aussi, en général, de la contrainte de cisaillement  $\tau$  ou encore,

d'un point de vue équivalent, de la vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$ . Ce qui donne:  $\mu = F[T, P, \tau]$  ou  $\mu = G[T, P, \dot{\varepsilon}]$ .



**Figure 5.3 Représentation d'un rhéogramme [18].**

Le rhéogramme de la figure 5.3 permet d'observer, que pour une valeur de  $\tau$  donnée,  $\mu$  est égal à la pente de la droite joignant l'origine au point représentatif considéré. Il existe certaines substances pour lesquelles  $\mu$  ne dépend pas de la contrainte de cisaillement : ces corps sont dits, newtoniens. Leur coefficient de viscosité dynamique est alors appelé, viscosité absolue, et est noté  $\eta$ . L'équation rhéologique d'un corps newtonien s'écrit ainsi :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\tau}{\eta} \quad (5.9)$$

où  $\eta$  n'est fonction que de la température et de la pression extérieure. Le rhéogramme de l'équation de Newton est une droite de pente  $\eta$ .

### 5.2.3.2 La viscosité cinématique

Elle est définie par la relation :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.10)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du matériau (densité); l'équation dimensionnelle de  $\nu$  s'écrit de la façon 5.11 :

$$[\nu] = [L]^2 [T]^{-1} \quad (5.11)$$

### 5.2.3.3 Les viscosités relative, spécifique et intrinsèque

Les coefficients de viscosité suivant sont utilisés fréquemment en rhéologie pour déterminer les influences respectives du soluté et du solvant à l'intérieur des solutions et des dispersions.

- Viscosité relative :

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_s} \quad (5.12)$$

- Viscosité spécifique :

$$\mu_{sp} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{rel} - 1 \quad (5.13)$$

- Viscosité intrinsèque :

$$\begin{array}{l} c \geq 0 \\ \vdots \\ \varepsilon \geq 0 \end{array} \quad [\mu] = \limite \left[ \frac{\mu_{sp}}{c} \right] \quad (5.14)$$

où  $\mu$  et  $\mu_s$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution et du solvant, et où  $c$  représente la concentration de la solution. Les viscosités relative et spécifique sont des grandeurs adimensionnelles, tandis que la viscosité intrinsèque s'exprime à l'inverse d'une concentration.

### 5.3 Les propriétés du mode d'écoulement de la boue rouge

#### 5.3.1 La viscosité, la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation

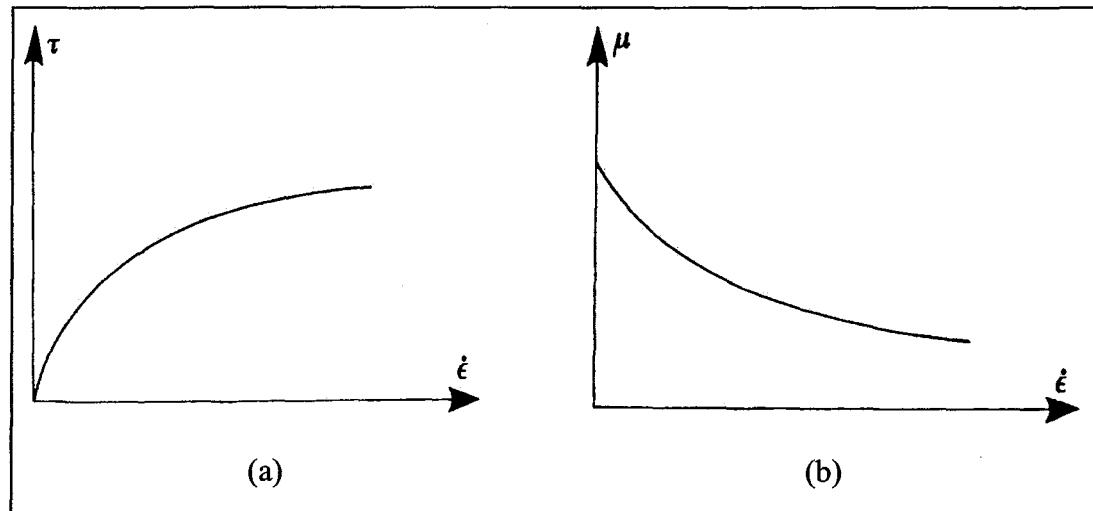
Il faut savoir d'abord que la boue rouge est un fluide non newtonien. Cela signifie que le rapport entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et la vitesse de déformation  $\dot{\varepsilon}$  varie avec  $\tau$  ou  $\dot{\varepsilon}$  et quelques fois avec le temps. Dans ces conditions il est impossible de définir une viscosité absolue. On parle néanmoins de viscosité apparente pour un  $\tau$  ou un  $\dot{\varepsilon}$  donné; elle est notée  $\mu$ :

$$\mu = \left[ \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}} \right]_{\tau=\tau_0} \quad (5.12)$$

Le choix arbitraire de  $\tau_0$  implique qu'un fluide non newtonien n'est pas caractérisé par sa viscosité apparente mais par l'ensemble de son rhéogramme [18].

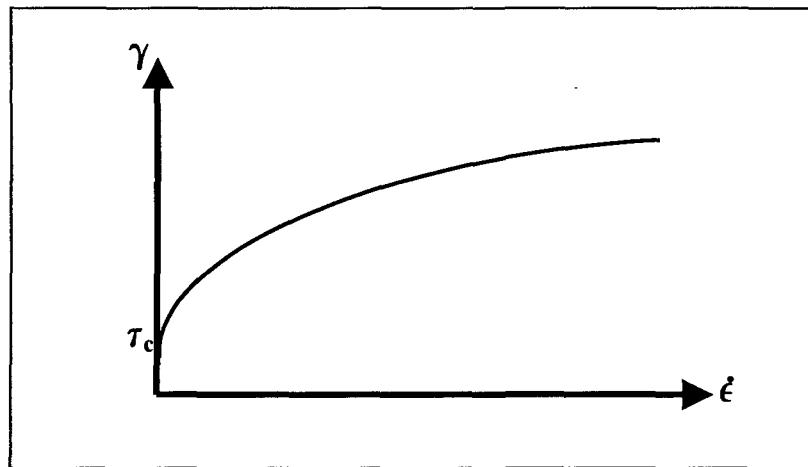
Les fluides non newtoniens se divisent en plusieurs catégories, selon leur rhéogramme respectif. La boue rouge se définit comme étant un fluide de Casson ou d'Oswald, selon les auteurs [5,18]. Cette définition signifie qu'elle appartient à la catégorie des fluides rhéofluidisants plastiques. Le terme rhéofluidisant inclus l'ensemble de tous les

corps dont les rhéogrammes sont des courbes passant par l'origine et dont la concavité est dirigée vers le bas (figure 5.4(a)), si bien que le coefficient de viscosité apparente n'est pas constant mais diminue avec le cisaillement (figure 5.4(b)).



**Figure 5. 4 (a) Rhéogramme d'un corps fluidisant. (b) Variation de la viscosité d'un corps fluidisant [18].**

Le terme plastique signifie qu'il s'agit d'un fluide qui ne s'écoule qu'à partir d'une certaine valeur de la contrainte  $\tau_c$  appelée, seuil d'écoulement ou de cisaillement (*yield value*), et qui représente l'ordonnée à l'origine du rhéogramme de la figure 5.5.



**Figure 5. 5 Rhéogramme de la boue rouge (corps de Casson) [18].**

L'interprétation la plus communément admise d'un tel comportement revient à supposer que la boue rouge possède, au repos, une structure tridimensionnelle rigide représentée, par exemple, par un ensemble de particules emboîtées les unes dans les autres, ou floculées [18]. Le seuil d'écoulement correspond à la force nécessaire pour les séparer, pour vaincre les forces de cohésion du type Van der Waals, et pour provoquer l'écoulement<sup>5</sup>. Au-delà de ce seuil, la structure rigide est détruite et l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective  $\tau - \tau_c$ .

Pour décrire quantitativement un fluide de Casson, on utilise essentiellement deux équations :

---

<sup>5</sup> La notion de seuil d'écoulement n'est pas acceptée par tous les auteurs. Il faut cependant le considérer dans la mesure où il définit la limite entre deux régimes de déformation très distincts.

Équation de Casson[18]

Avec  $\tau < \tau_c$

$$\dot{\varepsilon} = 0 \quad (5.13A)$$

Et  $\tau > \tau_c$

$$(\tau)^{0.5} = (\tau_c)^{0.5} + (\beta \dot{\varepsilon})^{0.5} \quad (5.13B)$$

où  $\beta$  est une constante appelée également viscosité plastique.

Équation de Herschel-Bulkley [18]

Elle est de type loi de puissance avec seuil d'écoulement:

Avec  $\tau < \tau_c$

$$\dot{\varepsilon} = 0 \quad (5.14A)$$

Et  $\tau > \tau_c$

$$\tau = \tau_c + k \dot{\varepsilon}^n \quad (5.14B)$$

où  $n$  est un exposant à déterminer dont la valeur est le plus souvent inférieure à l'unité (comportement plastique fluidisant), et où  $k$  est une constante à déterminer qui dépend de la température, de la pression et de la viscosité dynamique du fluide.

En combinant les équations 5.7 et 5.14B, on obtient la loi qui régit la viscosité de la boue rouge :

$$\mu = \frac{\tau_c}{\dot{\epsilon}} + k \dot{\epsilon}^{n-1} \quad (5.15)$$

Précisons que ces deux équations peuvent fournir de bonnes corrélations, dans la mesure où les vitesses de cisaillement demeurent relativement faibles ; en effet, le rhéogramme de la figure 5.5 tend asymptotiquement vers une portion rectiligne qui joue le rôle de portion newtonienne, et qui ne peut être prise en compte par les équations 5.13 et 5.14.

### 5.3.2 Facteurs influençant la viscosité de la boue rouge

Bien que l'équation 5.15 donne la relation qui régit la viscosité de la boue rouge, il a été mentionné précédemment que la relation entre la déformation de cisaillement  $\epsilon$  et la contrainte de cisaillement  $\tau$ , est une relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau. Par conséquent, il est très important de connaître l'influence des différents paramètres pouvant modifier sa viscosité. En plus de la thixotropie, qui définit un état transitoire dépendant du temps, la viscosité dynamique  $\mu$  de la boue dépend de la température, de la concentration solide, de la flocculation et de la présence de particule de sable.

### 5.3.2.1 La concentration solide

L'observation expérimentale montre que la viscosité dynamique  $\mu$  de la boue varie proportionnellement à la concentration solide. Lors des expériences, des mesures de densité ont été effectuées à la sous verse. Les valeurs obtenues varient entre  $1600 \text{ kg/m}^3$  et  $1950 \text{ kg/m}^3$ . La boue recueillie à la sortie du décanteur ayant une densité supérieure à  $1750 \text{ kg/m}^3$  à tendance à s'empiler, tandis que la boue dont la densité est inférieure à  $1700 \text{ kg/m}^3$  est plus fluide et ne s'empile pas. Comme les mesures de densité effectuée par le débitmètre massique inclus aussi bien les particules de sable que les particules de boue, il a fallu comparer des échantillons dont le pourcentage de sable est semblable. Bien que le pourcentage de sable varie légèrement à la sous verse, il se situe toujours aux alentours de 20% pour les échantillons qui ont été analysés. Les observations, bien que qualitatives montrent, par conséquent, que la viscosité de la boue augmente en fonction de la concentration des particules de boue fine.

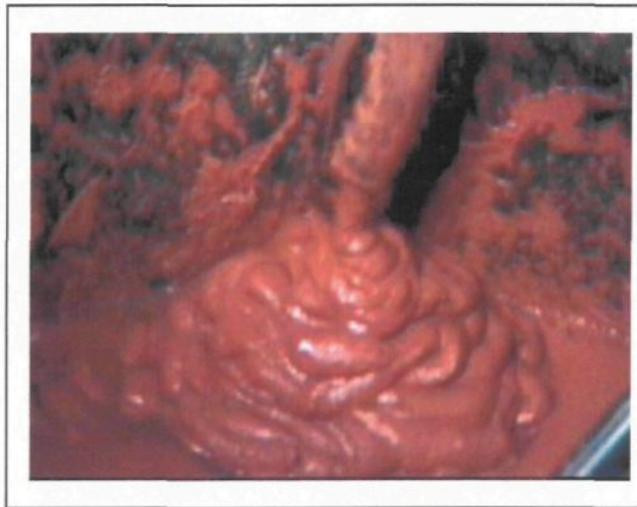


Figure 5. 6 Boue rouge à la sortie du décanteur pilote (densité  $\approx 1800 \text{ kg/m}^3$ ).

### 5.3.2.2 La floculation

La floculation permet aux particules de se regrouper partiellement et de former des liens plus ou moins forts. La force de ces liens influence beaucoup la viscosité de la boue puisqu'elle empêche les particules de se déplacer librement. Cela signifie qu'en plus d'avoir à déplacer les molécules, il faut briser les liens qui les unissent. Les premiers essais, qui avaient pour but l'étude du déplacement de la boue rouge grâce au traçage thermique, ont permis de constater que pour des concentrations solides équivalentes, la boue non floculée se déplace beaucoup plus librement que la boue floculée et qu'elle est, par conséquent, moins visqueuse (voir résultats). Les effets des floculants sur la viscosité de la boue sont donc indéniables.

### 5.3.2.3 Le sable

L'effet du sable sur la viscosité de la boue est difficilement quantifiable. Les observations montrent qu'à partir d'une certaine densité, la boue devient suffisamment visqueuse, et agit comme une matrice qui emprisonne les grains de sable. À faible concentration, l'effet du sable sur la viscosité est négligeable. À une concentration qualifiée de non négligeable, le sable dont la densité est supérieure à celle de la boue, augmente la densité de celle-ci. La boue servant encore de matrice au sable, les deux composants se comportent comme une seule et unique phase. La texture du mélange se rapproche alors sensiblement de la «pâte à modeler». Ce mélange assez riche en sable est plus lourd et plus dense que la boue floculée seule. Lorsque la concentration de sable devient très importante, la densité du matériel devient beaucoup plus élevée que celle de la boue seule. À forte

concentration, les grains de sable étant plus lourd que les particules de boue fine, prennent leurs places. Les grains de sable se retrouvent ensuite liés les uns aux autres grâce au floculant sans l'apport des particules de boue qui servaient, à plus faible concentration, de ciment ou de matrice. Le mélange, riche en sable et faible en boue, perd alors la plus grande partie de ses propriétés plastiques. Il se comporte alors sensiblement comme un solide et, lorsqu'il est soumis à une contrainte, a tendance à se séparer et à se fragmenter en petits morceaux (sable mouillé) plutôt qu'à se déformer ou à s'étirer.

Il semble, par conséquent, qu'il y ait un équilibre optimum entre les différents paramètres permettant d'obtenir une boue très dense et assez visqueuse.

Pour expliquer les comportements visqueux des fluides non newtoniens, plusieurs théories moléculaires ont été échafaudées. Ces théories prennent en considération plusieurs facteurs qui ne seront pas discutés ici, tels la forme, la taille et la distribution des particules dispersées [18,19].

### **5.3.3 Étude rhéologique de la boue rouge**

Pour déterminer le comportement rhéologique de la boue rouge, une étude rhéologique a été conduite au Centre de Recherche et de Développement d'Arvida. L'étude a été effectuée sur une boue rouge remaniée provenant de l'usine Vaudreuil et ne contenant pas de particule de sable. Le terme remanié signifie que la boue est fortement brassée, ce qui entraîne la destruction des chaînes de polymères qui relient les particules solides entre elles. Puisque l'action du floculant est annulé et qu'elle ne contient pas de particule de

sable, cette boue remaniée peut être considérée comme une simple suspension et par conséquent, sa viscosité ne dépend que de la fraction solide et de la contrainte de cisaillement.

L'équation qui permet de suivre l'évolution de la viscosité de la boue rouge remaniée en fonction de la contrainte de cisaillement a été déterminée de façon expérimentale. Il s'agit d'une équation semi empirique du même type que l'équation d'Hershell-Buckley pour laquelle les paramètres sont déterminés de façon expérimentale. Bien que la forme de l'équation soit générale, cela signifie que cette équation n'est valide que pour le type de boue étudiée et que les paramètres doivent être recalculés pour chaque type de boue. L'équation 5.16 donne l'évolution de la viscosité en fonction de la concentration solide sous différentes contraintes de cisaillement pour une boue remaniée provenant de l'usine Vaudreuil.

$$\mu = \left[ 0.1798e^{19.12A} - 0.1798 + 0.003e^{22.609A} \cdot \dot{\varepsilon}^{\left(0.465 + \frac{0.03}{(A+0.56)}\right)} \right] \quad (5.16)$$

où A = pourcentage volumique de la boue (%v/v).

$\dot{\varepsilon}$  = Contrainte de cisaillement ( $s^{-1}$ ).

Le pourcentage volumique A est déterminer grâce au pourcentage massique de la boue (%p/p) et aux densités respectives de la liqueur et de la boue.

Selon l'équation 5.16, pour une boue typique de l'usine Vaudreuil, soumise à une contrainte de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$  de  $1 \text{ s}^{-1}$ , la viscosité varie de  $3.23 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  à environ  $78.51 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  lorsque la fraction solide passe de 33,1 à 55.9 %p/p. Cette augmentation montre que la concentration solide (%p/p) a une grande influence sur la viscosité de la boue. En gardant les mêmes pourcentage de fraction solide (%p/p), mais soumise à une contrainte de cisaillement de  $10 \text{ s}^{-1}$ , les variations de viscosité passe de  $0.352 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  à  $8.796 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Les valeurs de viscosité obtenue illustre bien que la viscosité diminue de façon importante à mesure que la contrainte de cisaillement appliquée augmente. Bien que la viscosité diminue de façon importante en fonction de la contrainte de cisaillement, cette diminution semble proportionnelle en fonction de la fraction solide. Cela signifie que la contrainte de cisaillement influe sur la viscosité de la boue mais qu'elle ne modifie pas l'allure générale de la courbe de viscosité en fonction du pourcentage de fraction solide (%p/p).

Pour déterminer l'influence de l'ajout de floculants sur la viscosité de la boue, des tests ont été effectués sur des échantillons de boue flokulée à l'aide d'un rhéomètre. Ces tests ont permis de déterminer que pour un dosage d'environ 80 grammes de floculant par tonne de boue sèche, les résultats obtenus avec l'équation 5.16 doivent être augmenter d'un facteur 5 lorsqu'il s'agit de Hx-300 tandis que ce facteur passe à 10 lorsqu'il s'agit de Nalco 85029.

### 5.3.4 L'écoulement de la boue en fonction de la viscosité

Pour un fluide incompressible, circulant en régime stationnaire à l'intérieur d'un conduit réel ou imaginaire, l'énergie d'une particule est une combinaison stricte d'énergie potentielle, d'énergie cinétique et de pression. Suivant les loi de conservation, l'énergie d'une particule passant par un point 1, aura la même énergie lorsqu'elle passera au point 2 et par tout autre point du conduit [31].

Sous forme d'équation ce théorème peut s'écrire de la façon suivante :

$$\text{Énergie potentiel} + \text{énergie cinétique} + \text{pression} = \text{constante}$$

$$h + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} = \text{constante} \quad (5.17)$$

où  $h$  = élévation de la particule (m)

$P$  = pression (pa)

$\rho$  = poids volumique du fluide ( $\text{N/m}^3$ )

$V$  = vitesse de la particule (m/s)

$g$  = accélération gravitationnelle ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

Cette relation (équation 5.17) constitue la célèbre équation de Bernoulli, qu'il est possible d'appliquer à travers l'ensemble du domaine de l'écoulement. Cette relation permet de relier les propriétés d'un point de l'écoulement à un autre point par la formule 5.18 [31].

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (5.18)$$

En réalité, des pertes d'énergie par frottement se produisent tout le long du trajet et ces pertes d'énergie ou pertes de charge permettent d'écrire l'équation 5.19 [31]:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (5.19)$$

où  $h_f$  représente les pertes d'énergie ou pertes de charge dues aux frictions des particules sur les parois du conduit ou entre elles.

La perte de charge  $h_f$  est déterminée d'après l'équation de Darcy-Weisbach (équation 5.20) [31]:

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot V^2}{(2Dg)} \quad (5.20)$$

où  $h_f$  = perte de charge (m)

$L$  = longueur du conduit (m)

$D$  = diamètre du conduit (m)

$V$  = vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)

$g$  = accélération gravitationnelle ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$f$  = facteur de frottement sans dimension de Darcy-Weisbach.

Le facteur de frottement de Darcy-Weisbach  $f$  est une fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de parois du conduit [31]. Pour un écoulement laminaire, comme la boue rouge à l'intérieur d'un décanteur,  $f$  ne dépend que du nombre de Reynolds et est déterminé par la relation suivante (équation 5.21) [31]:

$$f = \frac{64\mu}{(\rho VD)} = \frac{64}{Re} \quad (5.21)$$

Le nombre de Reynolds est non dimensionnel et il combine trois caractéristiques importantes de l'écoulement : la vitesse, la densité et la viscosité. L'équation du nombre de Reynolds est donnée par l'équation 5.22 :

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (5.22)$$

En combinant 5.20, 5.21 et 5.22 la relation entre la perte de charge et la viscosité de la boue rouge devient :

$$h_f = \frac{64\mu}{PVD} \cdot \frac{L \cdot V^2}{(2Dg)} \quad (5.23)$$

L'équation 5.23 permet de conclure que les pertes charges et par conséquent, la résistance qu'oppose le fluide à l'écoulement, augmentent de façon proportionnelle avec la viscosité du fluide, la longueur du conduit et de la vitesse du fluide tandis qu'elle diminue à mesure que le diamètre du conduit augmente. En prenant pour exemple les variations de viscosité de la boue introduite dans l'étude rhéologique de la partie 5.3.3, il est clair que la viscosité de la a une très grande influence sur l'écoulement de cette dernière.

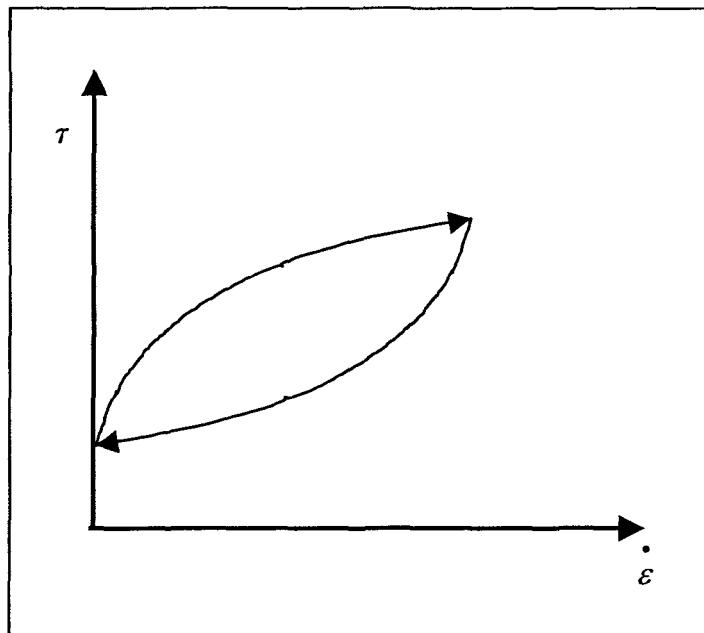
### 5.3.5 La thixotropie

En plus d'être un fluide non newtonien, c'est-à-dire un fluide dont le rapport entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et la vitesse de déformation  $\dot{\varepsilon}$  varie avec  $\tau$  ou  $\dot{\varepsilon}$ , la boue rouge est un fluide thixotrope<sup>6</sup>. Cela signifie que son écoulement varie aussi en fonction du temps. Dans ces conditions, la viscosité apparente n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de déformation, mais dépend également du temps. Le mode expérimental utilisé pour tracer les courbes d'écoulement revêt donc une grande importance. Il existe trois procédés différents pour déterminer un rhéogramme point par point [18].

Les fluides dits thixotropes, comme la boue rouge, possèdent des rhéogrammes qui présentent de l'hystérésis. Cela signifie que l'écoulement de ces fluides possède une histoire et que les mesures dépendent de la manière dont on fait croître ou décroître la contrainte. Pour tracer les rhéogrammes de ces corps, il faut inclure une troisième dimension : une variable temporelle. La thixotropie signifie donc que l'excitation et la relaxation, le retour à l'état initial, ne s'effectuent pas sur la même droite (figure 5.6).

---

<sup>6</sup> Tout corps dont la viscosité apparente a tendance à décroître dans le temps lorsqu'une contrainte ou une vitesse de cisaillement constante lui est appliquée, pourvu qu'après suppression du cisaillement et un temps de repos suffisant, sa structure initiale se régénère.



**Figure 5. 7 Rhéogramme de la boue rouge (fluide de Casson, thixotrope).**

Ce qu'il faut retenir de la thixotropie, c'est qu'elle rend les mesures difficiles et que, par exemple, la viscosité apparente mesurée pour  $\dot{\varepsilon}_0$  donné peut avoir une valeur quelconque dépendamment de l'expérience. Cela signifie qu'il est impossible de prédire de façon exacte, la viscosité de la boue durant une expérience, et que cette dernière, peut varier, de façon plus ou moins grande d'une expérience à l'autre. C'est pourquoi, pour connaître la viscosité de la boue durant une expérience, il faut l'observer.

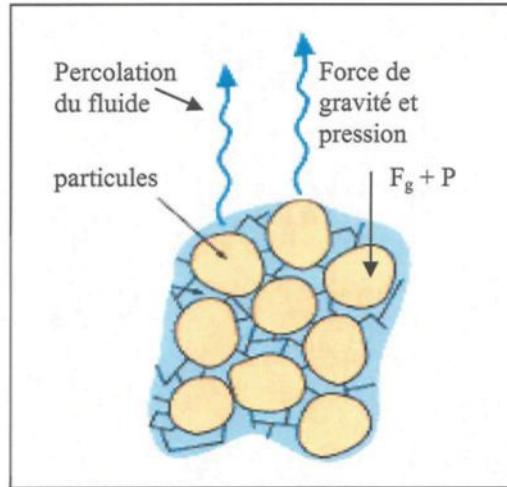
## **Le compactage de la boue et les râteaux**

À l'intérieur d'un décanteur en opération, à mesure que les particules de boue floculées sédimentent, leur concentration augmente. La sédimentation se poursuit jusqu'à l'atteinte d'une certaine concentration limite appelée, «gel point». Au-delà de cette concentration la sédimentation fait place au compactage.

### **6.1 Le compactage de la boue**

#### **6.1.1 Le compactage**

Lorsque les particules de boue floculées sédimentent, elles entraînent et emprisonnent avec elles une certaine quantité de fluide. Le dépôt successif de sédiments de boue rouge entraîne une surcharge progressive, faiblement compensée par une augmentation de la pression du fluide interstitiel. Le compactage de la boue consiste en une réduction du niveau de boue initial et en une augmentation de sa densité. Il se traduit donc par une perte de porosité associée à l'expulsion de fluide par réarrangement des grains sédimentaires. La figure 6.1 illustre le phénomène de percolation du fluide entre les particules de solide.



**Figure 6. 1 Percolation du fluide à travers les particules de boue.**

Le pourcentage solide ou fraction massique représente le rapport entre le poids de la boue et le poids total, pour un volume donné; il est exprimé par l'équation 6.1. Le compactage (C) est défini comme étant la différence entre la fraction solide finale et la fraction solide initiale (équation 6.2); tandis que le taux de compactage (Tc) peut être défini comme la différence entre le pourcentage de fraction solide finale et le pourcentage de fraction initiale rapporté au temps t (équation 6.3).

$$F_s = \frac{P_{bs}}{(P_{bs} + P_l)} \times 100 \quad (6.1)$$

$$C = (F_{s_f} - F_{s_i}) \quad (6.2)$$

$$Tc = C/\Delta t \quad (6.3)$$

où  $F_s$  = fraction solide ou fraction massique (%)

$P_{bs}$  = poids de boue sèche (g)

$P_f$  = poids du fluide (g)

$C$  = compactage (%)

$F_{sf}$  = fraction solide final (%)

$F_{si}$  = fraction solide initiale (%)

$T_c$  = taux de compactage (% par unité de temps)

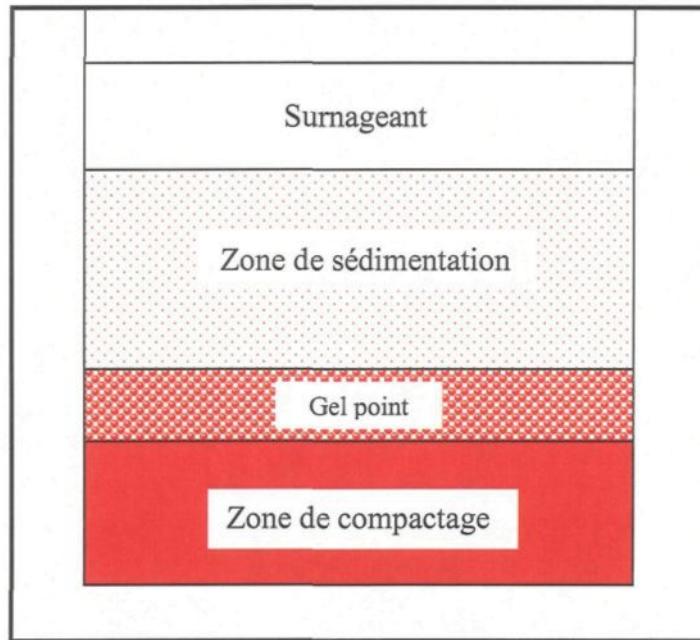
$t$  = temps (unité de temps)

Le compactage hydrostatique résulte uniquement de la force de gravité. Le compactage dépend donc de l'équilibre entre trois forces: la force de gravité, la force de traînée associée à l'écoulement et à la viscosité du fluide qui se déplace entre les sédiments, et la force de compression solide associé au réseau formé par les interactions interparticulaires.

### 6.1.2 Le «gel point»

Le «gel point» correspond à la concentration critique suite à laquelle une structure de réseau continue se forme à l'intérieur du milieu. La structure formée peut ainsi se soutenir, et des forces compressives peuvent alors être transmises à travers tout le réseau. Ce réseau de liens est formé par les flocons qui entrent en contact les uns avec les autres.

Cette concentration limite atteinte, la suspension passe d'un comportement proche de celui d'un liquide à un comportement proche de celui d'un solide. Le «gel point» correspond donc à un état limite, qui permet de faire la transition entre les phénomènes de sédimentation et de compactage. La figure 6.2 illustre les différentes zones observées lors de la sédimentation des particules de boue rouge.



**Figure 6. 2 Illustration et localisation du «gel point».**

Le «gel point»  $\phi_g$  est obtenu par l'équation 6.4 de Glover et al. [11]. Pour ce faire, cette équation est appliquée à un échantillon d'une suspension floculée, placé à l'intérieur d'un cylindre gradué, au repos pendant une semaine.

$$\phi_g = \frac{\phi_i \cdot h_i}{h_f} \quad (6.4)$$

où  $\phi_g$  = gel point (%)

$\phi_i$  = fraction volumique initiale (%)

$h_i$  = hauteur initiale (cm)

$h_f$  = hauteur finale (cm)

La fraction volumique représente le rapport entre le volume du solide et le volume total de l'échantillon, et est exprimé en pourcentage.

Cette formule ne donne qu'une estimation du «gel point»  $\phi_g$ , car il est très difficile de connaître exactement la hauteur initiale du lit de sédiment en compactage. Les valeurs obtenues par ce test ont pour effet de surestimer légèrement la valeur du «gel point» [11].

### 6.1.3 La force de compression solide ou «Compressive yield stress»

À mesure que les couches de sédiments s'accumulent, la pression exercée sur le réseau de particules sédimentées augmente jusqu'à un point critique. Dès lors, le réseau de particule subit un changement de structure irréversible causé, soit par des réarrangements ou des bris de liens interparticulaires, soit par la formation de nouveaux liens renforçant la structure du réseau. Ce processus de changement d'état peut être modélisé par l'introduction du concept de force de compression solide ou «compressive yield stress»  $P_y(\phi)$ , qui est une fonction de la fraction volumique [11]. Cette force de compression

correspond à la résistance du réseau face à une force appliquée sur une particule suivant un plan normal, telle la force de gravité.

L'introduction de ce concept est nécessaire dans l'étude du compactage des suspensions puisqu'en son absence, toute suspension qui sédimente atteindrait une valeur de fraction volumique se rapprochant de l'unité, ce qui est évidemment faux.

La détermination de la force de compression solide des suspensions floculées est très importante dans les procédés industriels puisqu'elle permet de mieux connaître les paramètres de compactage.

Pour illustrer le concept de force de compression solide, des expérimentations ont été effectuées avec de la boue rouge. Elles consistaient, principalement, à remplir le cône du décanteur pilote avec un volume de boue rouge et de laisser reposer le système environ 168 heures. Les expériences ont été effectuées avec des volumes de boue de même fraction solide, ayant subit la même homogénéisation. La seule différence marquée entre les deux expériences est l'ajout de floculant à l'intérieur de la seconde expérience. La fraction solide obtenue avec la boue non floculée a été d'environ 68%, tandis que la valeur de fraction solide obtenue avec la boue floculée s'est avérée beaucoup plus faible, environ 39%. La différence de 29% entre les fractions massiques obtenues lors des tests s'explique par la différence entre la force de compression solide de la boue floculée et celles de la boue non floculée. Les forces de cohésion qui lient les particules de boue floculée sont beaucoup plus élevées parce qu'elles sont constituées de polymère (voir chapitre 3). Ce sont ces mêmes liens interparticulaires qui permettent au réseau de particules sédimentées de contrer la force de gravité  $F_g$ .

### 6.1.3.1 Détermination de la force de compression solide

Les travaux de Buscall et al. ont permis de déterminer l'équation empirique 6.5 , qui régit la force de compression solide pour une suspension flokulée [6] :

$$P(0) = \Delta\rho g \phi_0 H_0 \left( \frac{H_{eq}}{2R_c} - 1 \right) \quad (6.5)$$

où

P = force de compression solide (kPa)

g = accélération ( $\text{m/s}^2$ )

$\phi_0$  = fraction volumique initiale (%)

$\Delta\rho$  = différence de densité entre les particules solides et le fluide ( $\text{kg/m}^3$ )

$H_0$  = hauteur initiale de la suspension (m)

$H_{eq}$  = hauteur des sédiments à l'équilibre (m)

$R_c$  = distance entre le centre et le fond du tube de centrifugation (m)

Pour y arriver, ils ont observé une suspension de particules sédimentant à une vitesse donnée, jusqu'à ce que les sédiments atteignent une hauteur d'équilibre  $H_{eq}$ . Ils ont ensuite répété plusieurs fois l'expérience en augmentant l'accélération g par centrifugation, ce qui a permis de déterminer la hauteur d'équilibre des sédiments en fonction de l'accélération g. Puis ils ont combiné les courbes obtenues avec la hauteur initiale de la suspension, la fraction solide initiale et la différence de densité entre le solide et le liquide.

Plus spécifiquement, Scales et De krester [30] ont étudié la force de compression solide de la boue rouge, de façon qualitative et expérimentale, en utilisant divers systèmes ayant une fraction solide similaire. Ils ont déterminé l'équation décrivant la force de compression solide de la boue rouge :

$$P_y(\phi) = k \left( \left( \frac{\phi}{\phi_g} \right)^n - 1 \right) \quad (6.6)$$

où  $P_y$  = force de compression solide (kPa)

$\phi$  = fraction volumique (%)

$\phi_g$  = fraction volumique correspondant au «gel point» (%)

k = constante expérimentale (kPa)

n = données empirique qui dépend de la nature du médium.

La valeur de la force de compression augmente en fonction de la fraction volumique. Elle est de zéro lorsque la fraction volumique est inférieure à la valeur du «gel point», et elle tend vers un maximum à mesure que le réseau s'approche des limites de compactage dues à la taille des particules.

#### 6.1.4 Facteurs influençant le compactage

Plusieurs facteurs influencent le compactage de la boue. Il y a d'abord la taille et la forme des particules. Plus les particules sont petites, plus les interstices interparticulaires sont petits, ce qui laisse moins d'espace pour le fluide. Il y a aussi les forces de cohésion interparticulaires. Ces forces peuvent dépendre de plusieurs facteurs, comme la présence de

liants tels le floculant. Plus les forces de cohésion sont élevées, plus les particules retiennent le fluide prisonnier. Il est clair, par conséquent, qu'une boue non floquée deviendra, après un temps infini, plus compacte qu'une boue floquée. La pression de la colonne joue elle aussi un rôle : plus il y a de pression sur les particules, plus elles ont tendance à se compacter. La différence de densité entre le fluide et les particules influence également le compactage. Plus cette différence est grande, plus les particules auront de la facilité à remplacer le liquide emprisonné. La présence de sable affecte aussi le taux de compactage. Le sable, dont la masse supérieure à celle des grains de boue, a tendance à compacter la boue sous son poids et à la déplacer jusqu'à ce qu'il atteigne le fond de la structure. En effet, peu importe la viscosité de la boue, le sable coulera, de façon plus ou moins lente, vers le fond. Retenons aussi l'importance du temps de résidence. Avant d'atteindre un équilibre entre les différentes forces, c'est-à-dire avant d'atteindre le compactage maximal, cela peut prendre un certain temps ( $t$ ) : la durée du repos des sédiments a donc aussi un effet sur le compactage.

### **6.1.5 Le seuil de cisaillement ou «shear yield stress»**

Lorsque la force de compression solide est en équilibre avec la pression exercée sur le réseau de particules, le compactage cesse. Cela signifie que plus la force de compression solide à l'intérieur des sédiments est élevée, plus la compacité des particules est faible.

Les procédés de sédimentation industriels nécessitent souvent l'ajout de flocaulants synthétiques à l'intérieur du système pour permettre d'augmenter la vitesse de

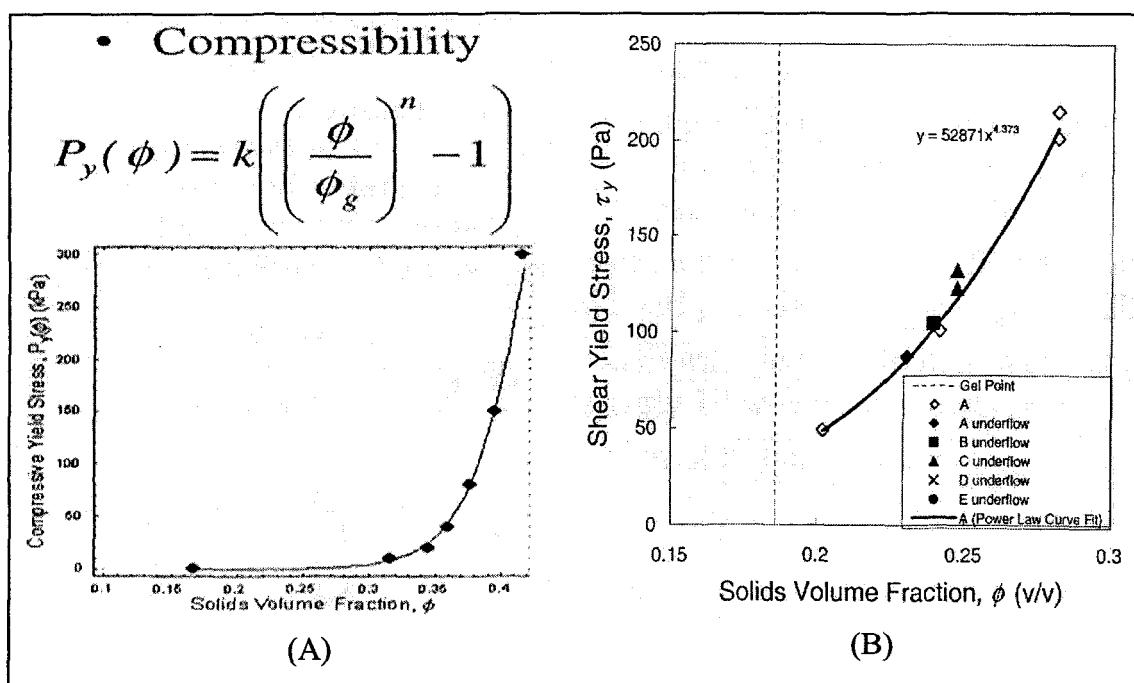
sédimentation des particules. L'ajout de floculant a cependant pour effet d'augmenter la force de compression solide des sédiments et, par conséquent, d'en limiter le compactage.

Lorsque le lit de boue se forme et se compacte, les différents grains adoptent une configuration qui dépend de l'historique de la sédimentation, et l'absence d'énergie nouvelle empêchera le système d'explorer d'autres configurations. Il s'agit là d'un milieu non ergodique qui se fige dans un état désordonné ne correspondant pas, en général, à celui de plus basse énergie, c'est-à-dire de plus forte densité [46]. Pour passer d'un état à un autre, il faut investir provisoirement un peu d'énergie dans le potentiel gravitationnel, ce qui aura pour effet de pousser les grains et ainsi permettre de vaincre les forces de cohésion interparticulaires.

Ainsi, on peut s'attendre à ce qu'une fois la force de compression solide atteinte, l'évolution du système ne soit pas simplement décrite par l'énergie gravitationnelle, mais surtout par l'énergie fournie pour passer d'une configuration à une autre.

La résistance des liens interparticulaires vis-à-vis une contrainte appliquée de façon tangentielle aux particules s'appelle, le seuil de cisaillement ou «shear yield stress», et est noté  $\tau_c$ . Ce seuil de cisaillement est de même nature que la force de compression solide, et il est exprimé en Pascal (Pa). La force nécessaire pour dépasser le seuil de cisaillement, et provoquer un réarrangement des particules de boue rouge sédimentées, est environ 80 fois inférieure à la force de compression solide (figure 6.3). L'application d'un cisaillement à l'intérieur du système de particules sédimentées permet d'atteindre un niveau d'énergie encore plus bas et, par conséquent, une configuration des sédiments plus compacte et plus dense. L'expérimentation montre que l'application d'une force de cisaillement à l'intérieur

des sédiments augmente substantiellement le taux de compactage et le maximum de compactage. Les tests ont aussi montré que le seuil de cisaillement est fonction de la concentration solide et de la nature du floculant. Cette relation se traduit par une diminution de l'efficacité du cisaillement à mesure que la fraction solide augmente, ce qui amène l'atteinte d'un compactage maximal. Les expériences ont aussi montré que pour des tests effectués avec le même floculant et soumis aux mêmes contraintes de cisaillement, le maximum de compactage est reproductible. Cependant, sous l'action des mêmes contraintes de cisaillement, l'emploi d'un floculant différent peut faire varier le maximum de compactage de façon significative.



**Figure 6. 3 (A) Force de compression solide. (B) Contrainte de cisaillement [30]**

À l'intérieur des décanteurs, l'énergie nécessaire pour provoquer le bris des liens interparticulaires est fournie sous forme de pression positive, grâce aux râteaux. En effet, les observations ont montré qu'en faisant passer une structure rigide à très basse vitesse à l'intérieur de la boue, cela a pour effet de libérer une certaine quantité de liquide resté prisonnier.

Le râteau, qui se déplace très lentement à l'intérieur du décanteur, force la boue à s'écouler autour de ses lames. En amont, il se crée une pression positive qui cisaille la boue, brisant les liens entre les particules et permettant au fluide de se déplacer. En aval des lames, de légères perturbations, ainsi qu'une pression négative permettent au fluide de se déplacer, ce dernier ce déplaçant plus librement que le solide. La figure 6.4 illustre ce phénomène.

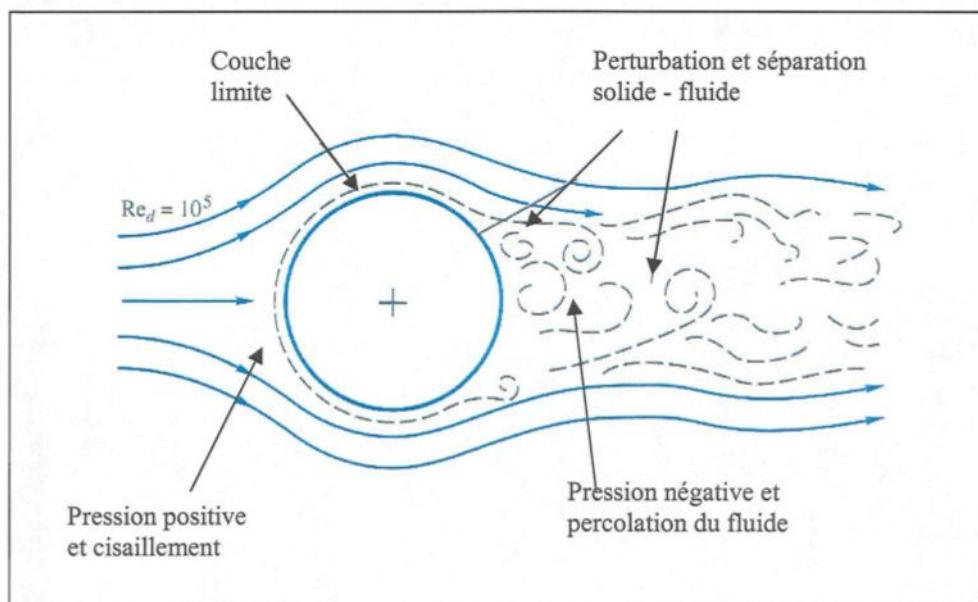


Figure 6. 4 Écoulement visqueux autour d'une structure ronde [45].

Bien qu'un apport d'énergie au système soit efficace, il faut respecter certaines limites : une trop grande vitesse transforme le régime de compactage en régime d'homogénéisation.

## 6.2 Les râteaux

Les râteaux placés à l'intérieur des décanteurs de boue rouge ont deux fonctions principales : ils permettent d'augmenter le compactage de la boue et ensuite et d'accélérer son déplacement vers le puits de décharge. Un râteau efficace permet d'obtenir un pourcentage de fraction solide élevé à la sousverse tout en conservant un couple aussi bas que possible.

Pour mesurer l'efficacité d'un râteau, il faut donc étudier deux paramètres qui sont le pourcentage de fraction solide à la sousverse et le couple. La figure 6.5 montre un exemple de râteau étudié dans le décanteur pilote.



Figure 6. 5 Bras d'un râteau étudié dans le décanteur pilote.

### 6.2.1 Le couple du râteau

Le couple correspond à la force appliquée dans un système en rotation. Pour évaluer un râteau il faut par conséquent, être en mesure de d'évaluer ou d'estimer son couple. Pour ce faire, il faut calculer le couple de cisaillement appliqué par la boue à la surface des lames du râteau durant le processus de séparation solide-liquide. Pour calculer le couple de cisaillement appliqué sur une lame par la boue, il faut procédé en trois étapes. Il faut tout d'abord déterminer l'expression du cisaillement  $\tau$  appliqué pour un point donné sur la lame, il faut ensuite déterminer l'équation de la force  $F$  appliquée sur la lame et enfin, il faut déterminer le couple total  $M$  appliqué sur une lame.

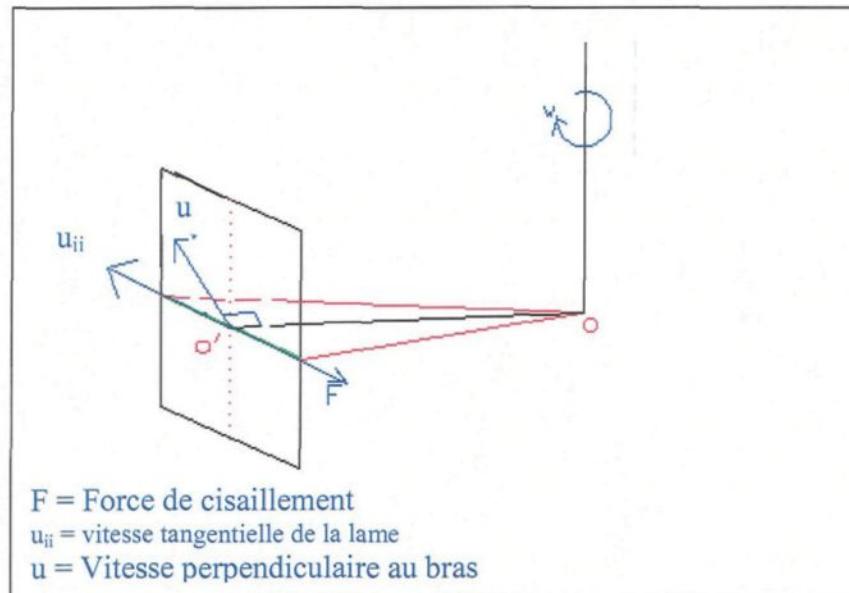
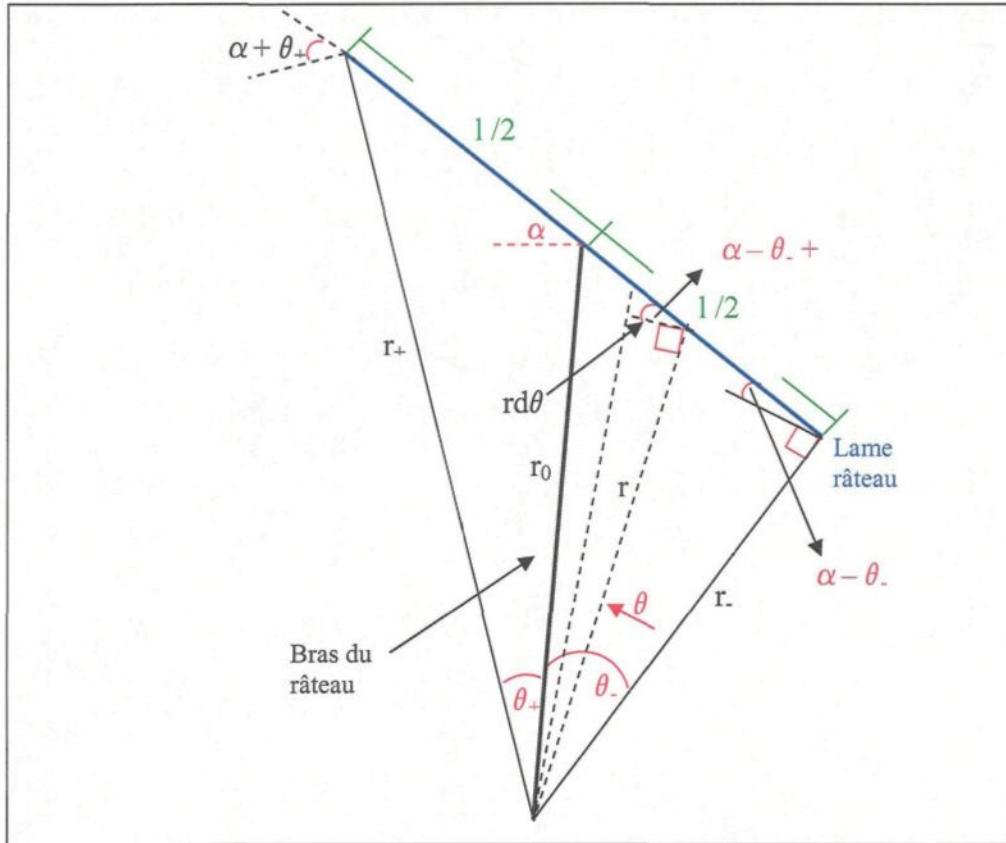


Figure 6. 6 Schéma simplifié d'un râteau à une lame.

### 6.2.1.1 Expression du cisaillement $\tau$ pour un point donné sur la lame



**Figure 6. 7 Illustration des différents angles et distances qui se retrouvent sur une lame et qui permettent le calcul du cisaillement.**

À tout moment, le cisaillement appliqué sur la lame du râteau est donné par l'équation 6.7 :

$$\tau = \frac{\mu}{\delta} u_{ii} \quad (6.7)$$

où  $\tau$  = cisaillement (Pa)

$\mu$  = viscosité de la boue (kg/m·s)

$\delta$  = épaisseur de la couche limite (m)

$u_{ii}$  = vitesse tangentielle à la lame (m/s)

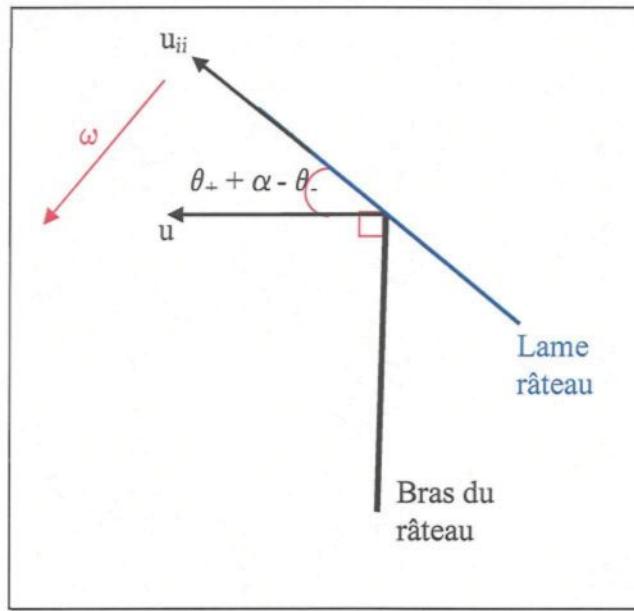


Figure 6. 8 Représentation des composantes de vitesse d'une lame d'un râteau.

De la figure 6.8, il est possible d'exprimer la vitesse tangentielle  $u_{ii}$  en fonction de la vitesse perpendiculaire à la lame  $u$  (équation 6.8) :

$$u_{ii} = u \cos (\theta_+ + \alpha - \theta_-) \quad (6.8)$$

où  $u$  = vitesse perpendiculaire au bras du râteau (m/s)

$\theta_+$  = angle formé par  $r_+$  et  $r_0$  (rad)

$\theta_-$  = angle formé par  $r_-$  et  $r_0$  (rad)

$\alpha$  = angle formé la lame et la droite perpendiculaire au bras (rad)

En remplaçant la vitesse tangentielle  $u_{ii}$  par l'équation 6.8, l'expression du cisaillement devient :

$$\tau = \frac{\mu}{\delta} u \cdot \cos(\theta + \alpha - \theta_-) \quad (6.9)$$

La vitesse  $u$  peut être définie par la relation suivante (équation 6.10) :

$$u = \omega r \quad 6.10$$

où  $\omega$  = vitesse angulaire (rad/s)

$r$  = rayon (m)

En introduisant l'équation 6.10 dans l'équation 6.9, l'expression du cisaillement devient alors :

$$\tau = \frac{\mu \omega r}{\delta} \cdot \cos(\theta + \alpha - \theta_-) \quad (6.11)$$

Selon la loi des sinus illustré à la figure 6.9 :

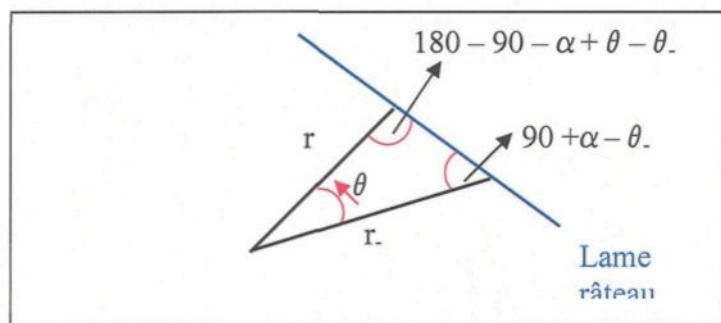


Figure 6.9 Illustration de la loi des sinus.

Il est possible d'appliquer l'égalité suivante (équation 6.12) :

$$\frac{r}{\sin(90 + \alpha - \theta_-)} = \frac{r_-}{\sin(90 - \alpha - \theta + \theta_-)} \quad (6.12)$$

Et l'expression finale du cisaillement devient donc :

$$\tau = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_- \cdot \frac{\sin(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin(90 - \alpha - \theta + \theta_-)} \cdot \cos(\theta + \alpha - \theta_-) \quad (6.13)$$

### 6.2.1.2 Expression de la force appliquée en un point sur la lame

La force est égale au cisaillement multiplié par la surface et cette relation est illustrée par l'équation 6.14

$$dF = \tau dA \quad (6.14)$$

où  $F$  = Force appliquée sur la lame par la boue ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$ )

$A$  = surface immergée de la lame (m)

Pour exprimer la force par rapport à la viscosité de la boue, à la vitesse angulaire et au rayon, il suffit de combiner les équations 6.13 et 6.14,

$$dF = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_- \cdot \frac{\sin(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin(90 - \alpha - \theta + \theta_-)} \cdot \cos(\theta + \alpha - \theta_-) dA \quad (6.15)$$

et de la figure 6.10,

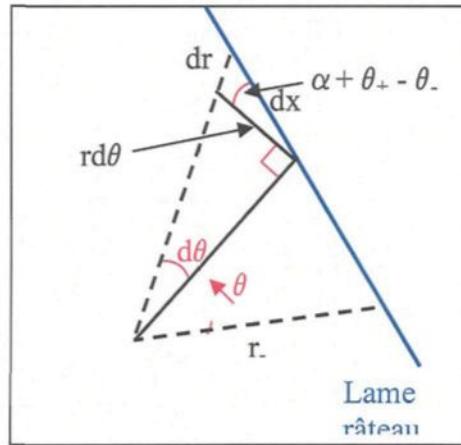


Figure 6.10 Illustration de l'égalité donnée par l'équation 6.16.

il est possible de tirer l'égalité donnée par l'équation 6.16 :

$$\cos(\theta + \alpha - \theta_-) = \frac{rd\theta}{dx} \quad (6.16)$$

En utilisant l'égalité donnée en 6.16, l'équation de la force devient alors :

$$dF = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_- \cdot \frac{\sin(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin(90 - \alpha - \theta + \theta_-)} \cdot \frac{rd\theta}{dx} \cdot dA \quad (6.17)$$

Et puisque l'aire de la lame peut s'exprimer de la manière suivante :

$$dA = h \cdot dx \quad (6.18)$$

où  $h$  = la hauteur de la lame immergée (m).

L'équation de la force devient enfin :

$$dF = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_- \cdot r_- \cdot h \frac{\sin(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin(90 - \alpha - \theta + \theta_-)} \cdot \frac{rd\theta}{dx} \cdot dA \quad (6.19)$$

Ou encore en simplifiant :

$$dF = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^2 \cdot \frac{\sin^2(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin^2(90 - \alpha - \theta + \theta_-)} \cdot \frac{rd\theta}{dx} \cdot dA \quad (6.20)$$

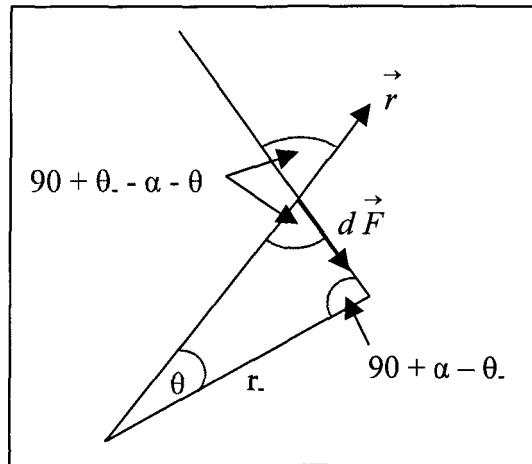
### 6.2.1.3 Expression du couple appliqué sur une lame

L'expression du couple  $M$  est donnée par l'équation 6.21 :

$$dM = \vec{r} \times d\vec{F} \quad (6.21)$$

le couple peut aussi s'exprimer suivant la relation 6.22 :

$$|dM| = |\vec{r} \times d\vec{F}| \quad (6.22)$$



**Figure 6. 11 Représentation des composantes du couple appliqué sur une lame.**

De la figure 6.11, il est possible de tirer l'égalité donnée par l'équation 6.23 :

$$|dM| = r \cdot dF \cdot \sin(90 + \theta_- - \alpha - \theta) \quad (6.23)$$

En remplaçant  $dF$  déterminée dans la section précédente et donné par l'équation 6.20, l'expression du couple en un point devient :

$$|dM| = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^2 \cdot r \cdot h \cdot \frac{\sin^2(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin(90 - \alpha + \theta_- - \theta)} \cdot d\theta \quad (6.24)$$

en simplifiant :

$$|dM| = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^3 \cdot h \cdot \frac{\sin^3(90 + \alpha - \theta_-)}{\sin^2(90 - \alpha + \theta_- - \theta)} \cdot d\theta \quad (6.25)$$

ou encore

$$|dM| = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^3 \cdot h \cdot \frac{\sin^3(90 + \alpha - \theta_-)}{\cos^2(\alpha + \theta - \theta_-)} \cdot d\theta \quad (6.26)$$

Pour obtenir le couple total appliqué sur une lame, il faut intégrer l'équation 6.26 entre  $(\theta = 0)$  et  $(\theta = \theta_+ + \theta_-)$  ce qui conduit à l'équation 6.27 :

$$M = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^3 \cdot h \cdot \cos^3(\theta_- - \alpha) \int_0^{\theta_+ + \theta_-} \frac{d\theta}{\cos^2(\alpha + \theta - \theta_-)} \quad (6.27)$$

Pour faciliter l'intégration, il est possible de simplifier l'équation en appliquant un remplacement de variable telle que  $(\phi = \alpha + \theta - \theta_-)$  et  $(d\phi = d\theta)$ . En terme de l'angle  $\phi$ , les bornes d'intégration deviennent donc de  $(\phi = \alpha + \theta_-)$  à  $(\phi = \alpha + \theta_+)$  et par conséquent l'équation 6.27 devient :

$$M = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^3 \cdot h \cdot \cos^3(\alpha - \theta_-) \int_{\alpha - \theta_-}^{\alpha + \theta_+} \frac{d\phi}{\cos^2 \phi} \quad (6.28)$$

En utilisant les équivalences géométriques, l'équation 6.28 est simplifiée et devient l'équation 6.29 donnée par l'expression suivante:

$$M = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^3 \cdot h \cdot \cos^3(\alpha - \theta_-) \cdot [\tan \varphi]_{\alpha-\theta_-}^{\alpha+\theta_+} \quad (6.29)$$

Et l'intégration mène à l'expression finale du couple total appliqué sur une lame qui est donnée par l'équation 6.30 :

$$M = \frac{\mu}{\delta} \omega \cdot r_-^3 \cdot h \cdot \cos^3(\alpha - \theta_-) \cdot [\tan(\alpha + \theta_+) - \tan(\alpha - \theta_-)] \quad (6.30)$$

Le couple de cisaillement total appliqué sur le râteau par la boue est obtenu en appliquant l'équation 6.30 sur l'ensemble des lames d'un râteau. Cette équation montre que le couple dépend directement de la viscosité de la boue, de la vitesse de rotation, de la hauteur immergée des lames, du rayon, des angles d'attaques. Le couple dépend aussi du nombre de lame, puisque le couple total correspond à la sommation des couples calculés pour chacune des lames. Bien que cette démarche permette un calcul du couple de cisaillement appliqué sur le râteau par la boue, le couple calculé sera toujours légèrement inférieur au couple réel mesuré car, le calcul du couple de cisaillement appliqué par la boue néglige la masse du râteau et le couple induit par les bras du râteau. Dans la grande majorité des configuration de râteau, la surface des lames est suffisamment grande pour permettre de négliger ces deux facteurs dans le calcul du couple total du râteau.

#### 6.2.1.4 Détermination des angles $\theta_+$ et $\theta_-$

À l'aide de la figure 6.7, il est possible de déterminer l'expression des angles  $\theta_+$  et  $\theta_-$ .

Pour l'angle  $\theta_-$ , la figure 6.7 permet de poser l'égalité suivante :

$$\frac{l/2}{\sin \theta_-} = \frac{r_-}{\sin(90 - \alpha)} = \frac{r_-}{\cos \alpha} = \frac{r_0}{\cos(\alpha - \theta_-)} \quad (6.31)$$

et

$$\frac{\cos(\alpha - \theta_-)}{\sin \theta_-} = \frac{2r_0}{l} \quad (6.32)$$

ce qui conduit à

$$\frac{\cos \alpha \cdot \cos \theta_- + \sin \alpha \cdot \sin \theta_-}{\sin \theta_-} = \cos \alpha \cdot \cot \theta_- + \sin \alpha = \frac{2r_0}{l} \quad (6.33)$$

les équivalences trigonométriques permettent de d'exprimer l'équation 6.33 suivant l'équation 6.34 :

$$\cot \theta_- = \left[ \frac{\frac{2r_0}{l} - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right] \quad (6.34)$$

et enfin, l'équation 6.35 illustre l'expression de l'angle  $\theta_-$ :

$$\theta_- = \cot^{-1} \left[ \frac{2r_0}{l \cos \alpha} - \tan \alpha \right] \quad (6.35)$$

Pour déterminer l'angle  $\theta_+$ , il faut procéder de la même façon que pour l'angle  $\theta_-$ , la figure 6.7 permet de tirer l'égalité suivante :

$$\frac{l/2}{\sin \theta_+} = \frac{r_-}{\sin(90 - \alpha - \theta_+)} = \frac{r_0}{\cos(\alpha + \theta_+)} \quad (6.36)$$

et

$$\frac{\cos(\alpha + \theta_+)}{\sin \theta_+} = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \theta_+ - \sin \alpha \cdot \sin \theta_+}{\sin \theta_+} = \frac{2r_0}{l} \quad (6.37)$$

encore une fois les équivalences trigonométriques permettent de d'exprimer l'équation 6.37 suivant l'équation 6.38 :

$$\cos \alpha \cdot \cot \theta_+ - \sin \alpha = \frac{2r_0}{l} \quad (6.38)$$

avec

$$\cot \theta_+ = \frac{\frac{2r_0}{l} + \sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{2r_0}{l \cos \alpha} + \tan \alpha \quad (6.39)$$

ce qui mène à l'équation 6.40, qui illustre l'expression de l'angle  $\theta_+$  :

$$\theta_+ = \cot^{-1} \left[ \frac{2r_0}{l \cos \alpha} + \tan \alpha \right] \quad (6.40)$$

En observant les équations 6.35 et 6.40, il est possible de tirer une équation générale permettant d'exprimer les angles  $\theta_+$  et  $\theta_-$  et cette expression est donnée par l'équation générale 6.41.

$$\theta_{\pm} = \cot^{-1} \left[ \frac{2r_0}{l \cos \alpha} \pm \tan \alpha \right] \quad (6.41)$$

### 6.2.2 Le déplacement de la boue rouge vers le puits de décharge

L'utilisation des râteaux dépend de la structure générale du décanteur. Les tests effectués avaient pour but de comparer différentes configurations de râteaux placés dans un décanteur possédant un cône d'environ 30°. À cet angle, la boue ne s'écoule pas de façon libre vers le centre; c'est pourquoi les configurations étudiées doivent, en plus de favoriser le compactage, déplacer la boue vers le centre. À cet effet, le débit de boue déplacé par les lames doit être déterminé.

Le débit de boue déplacée par une dent dépend de sa longueur, de sa hauteur, de son angle par rapport au plan et de sa vitesse. La formule du débit est donnée par l'équation 6.42 :

$$Q = A V \quad (6.42)$$

où  $Q$  = débit volumique ( $m^3/s$ )

$A$  = aire effective ( $m^2$ )

$V$  = vitesse ( $m/s$ )

donc

$$Q = (h \times L \times \sin \theta) \times \omega \quad (6.43)$$

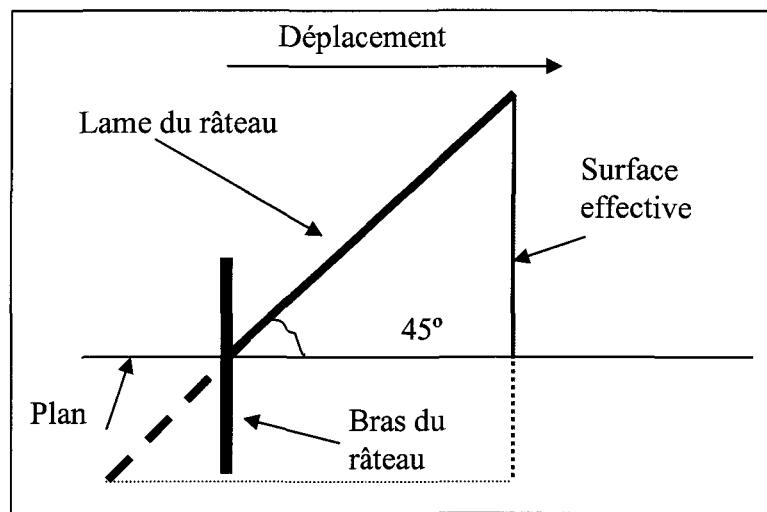
où  $L$  = longueur de la lame (m)

$h$  = hauteur de la lame (m)

$\theta$  = angle de la lame par rapport au plan (rad)

$\omega$  = vitesse angulaire (vitesse de rotation  $\times 2\pi \times$  rayon à partir du centre) (rad/s)

Puisque les lames traversent le bras du râteau de façon symétrique, la distance utilisée pour les calculs correspond au centre de la lame. Cette estimation revient à calculer le rayon en tous points de la lame par rapport au centre du décanteur. La figure 6.12 montre la surface effective d'une lame.



**Figure 6. 12 Surface effective d'une lame de râteau.**

En appliquant la formule à toutes les lames du râteau complémentaire (5 lames et 2 bras), on obtient les valeurs de débit volumique montré dans le tableau 6.1 :

**Tableau 6. 1 Débit volumique découlant des lames du râteau complémentaire.**

Lame	Bras	Vitesse de rotation (rpm)	Longueur (m)	Hauteur (m)	Rayon (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)
1 (centre)	A	0.3	0.15	0.05	0.15	0.0015
2	B	0.3	0.15	0.041	0.25	0.0021
3	A	0.3	0.15	0.032	0.35	0.0022
4	B	0.3	0.15	0.021	0.45	0.0019
5 (extérieure)	A	0.3	0.15	0.02	0.55	0.0022

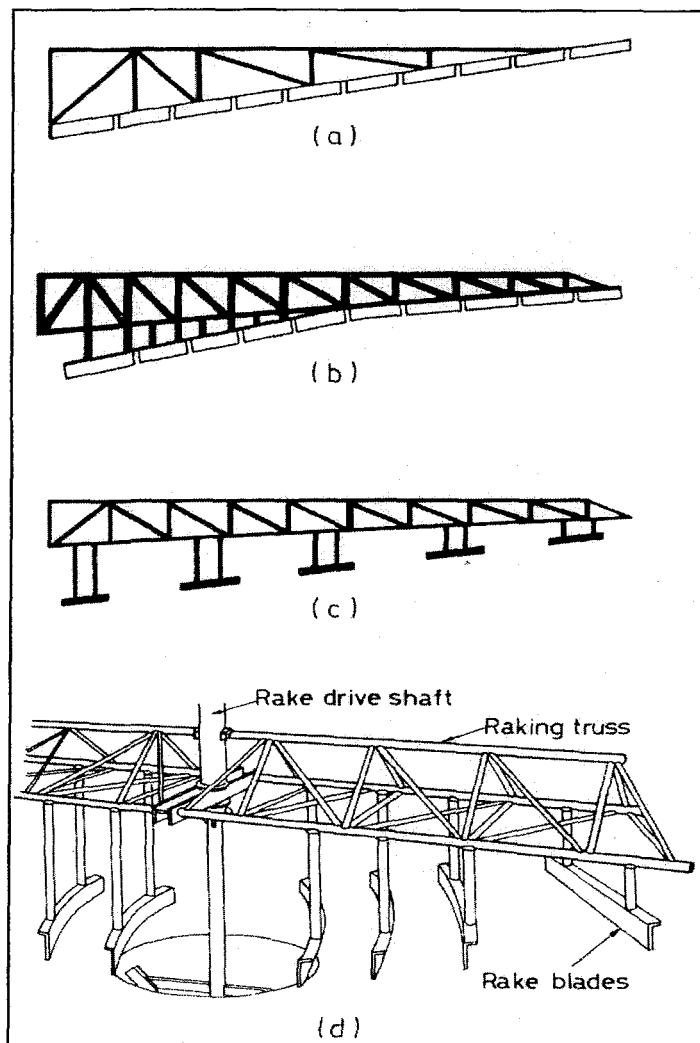
La notation A et B est employée pour identifier de façon arbitraire un bras par rapport à l'autre. Notons que les débits sont sensiblement les mêmes.

La structure des râteaux doit être très solide puisqu'elle doit supporter le couple induit par le solide qui sédimente et par le transport de ce dernier vers le puits de décharge. Le design nécessaire dépend aussi de la nature du solide compacté et pouvoir supporter un couple exceptionnellement élevé lors de situation d'urgence.

Il existe plusieurs types de configuration de râteau, qui varient du bras simple et rigide avec des lames fixées directement sur le bras principal, aux design possédant une armature plus complexe destinée aux bassins de 35 mètres de diamètre. Par exemple, pour éliminer les grandes structures en mouvement près de la zone de sédimentation, des bras d'extension ont été introduits entre les lames et le bras principal du râteau. Cette configuration est connue sous le nom de « bras Thixo », et a développée spécialement pour s'adapter aux tendances thixotropiques de la boue. La figure 6.6 montre différents types de râteaux.

Dans les décanteurs conventionnels, les bras du râteau sont reliés à la poutrelle centrale ou à un arrangement de poutres de renfort situé directement au-dessus du râteau. D'autres types de géométrie peuvent être envisagés.

L'action du râteau est de deux natures différentes : il peut être utilisé pour favoriser le déplacement de la boue vers le puits de décharge, ou bien pour augmenter la fraction solide à la sortie du décanteur en favorisant l'évacuation du liquide contenu dans les sédiments flocculés « dewatering » [24]. Enfin, il est possible de combiner ces deux actions, d'où l'intérêt d'étudier un design qui permettrait un déplacement efficace de la boue tout en obtenant une fraction solide optimale à la sortie.



**Figure 6.13** Différents design de râteau : (a) design conventionnel; (b) design utilisé pour les bassins à grand diamètre avec fond en double pente et bras « thixo » au centre; (c) bras « thixo » utilisés pour éviter la formation d'une beigne tournant avec la structure; (d) design de type Dorr-Oliver [24].

## Montage expérimental

### 7.1 Montage expérimental

Pour faciliter la description du montage, une image générale du laboratoire est introduite au tout début de cette partie (figure 7.1) :

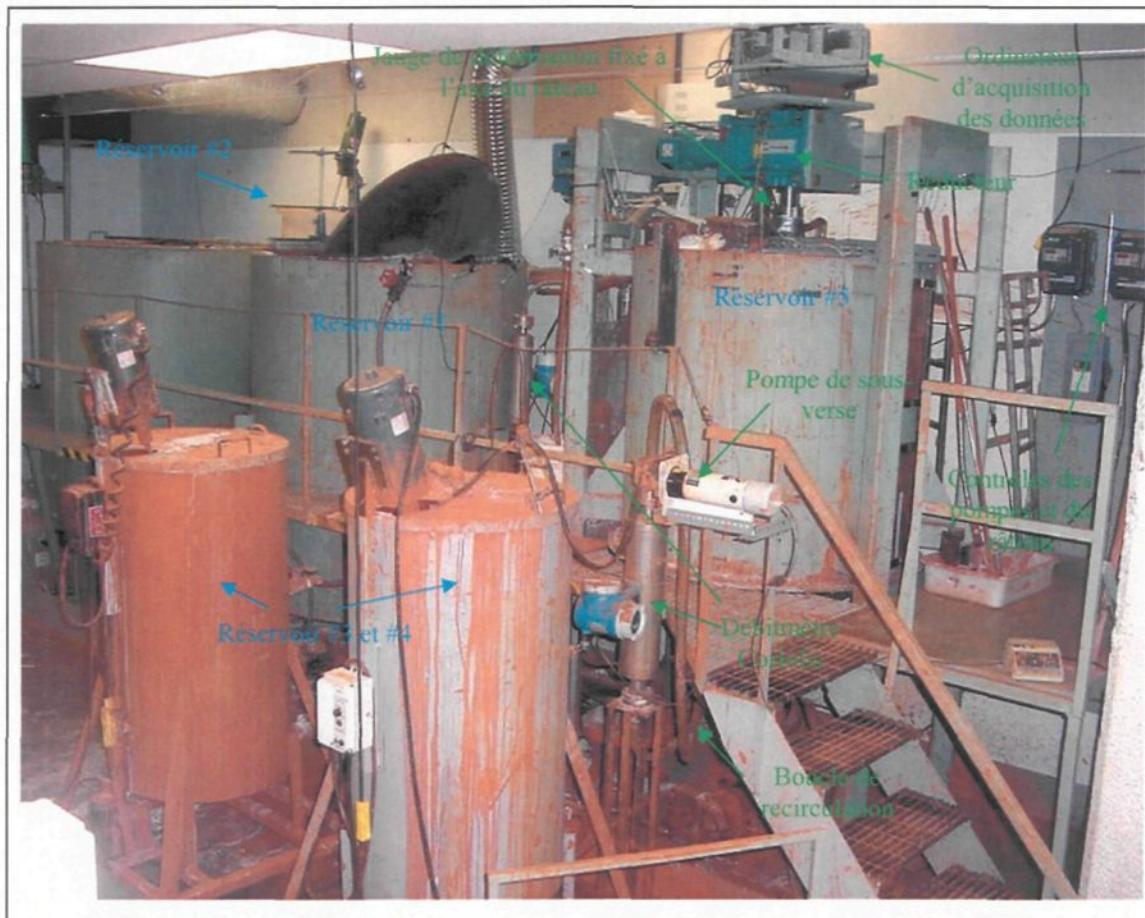


Figure 7.1 Photo du montage expérimental.

### 7.1.1 Description du montage

Le montage expérimental comprend quatre réservoirs en acier et un en polyéthylène (figure 7.1). Le premier réservoir en acier contient la liqueur Bayer, composée principalement d'hydrate d'alumine dissoute dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium. La liqueur doit être constamment agitée pour conserver son homogénéité. De plus, des chicanes sont fixées sur la paroi du cylindre afin de favoriser le mouvement vertical du fluide. La base du réservoir est conique afin de récupérer les particules de quartz plus lourdes contenues dans les sédiments. Ce réservoir a une capacité de 3176 litres (figure 7.2).

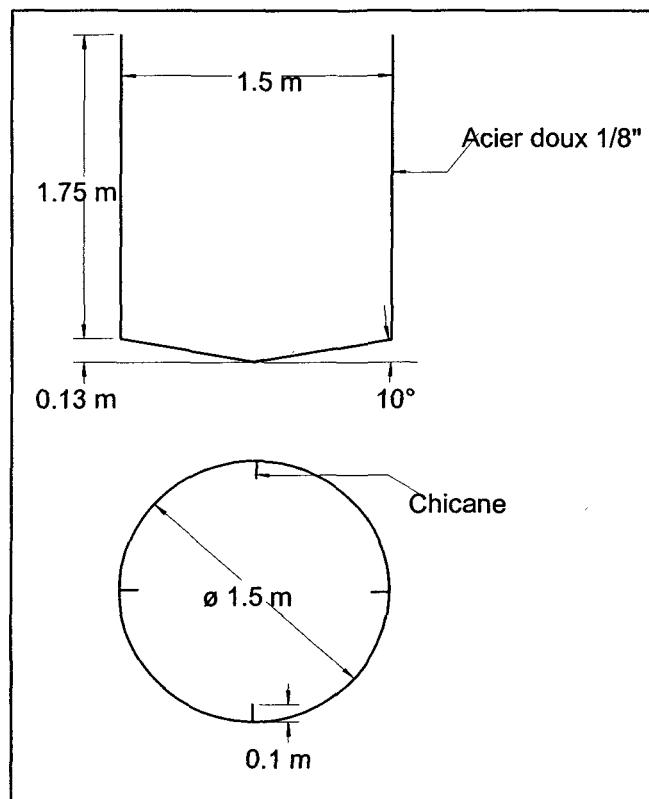
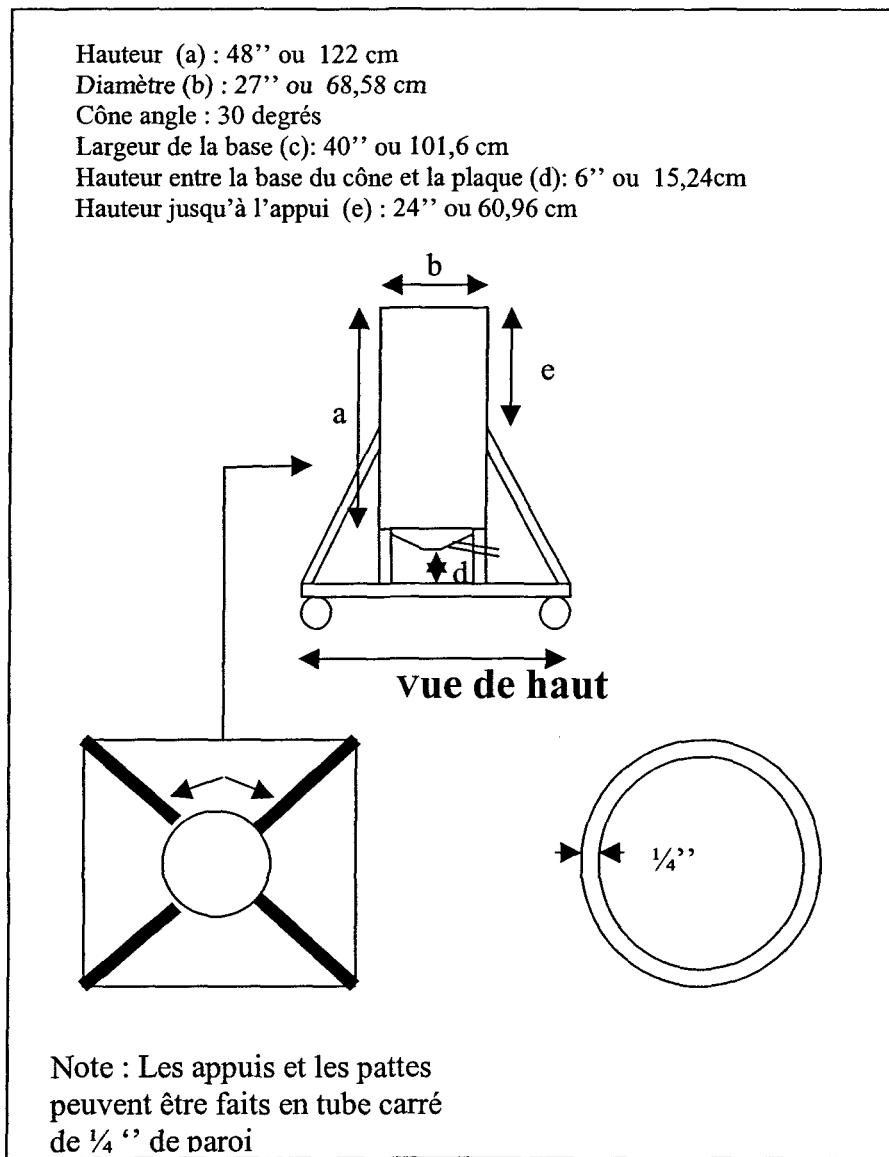


Figure 7. 2 Plan détaillé du réservoir de liqueur.

Le second réservoir en polyéthylène, d'une capacité de 120 litres, contient le floculant. Les réservoirs trois et quatre sont des homogénéisateurs. Ils sont de géométrie semblable et ils servent : à la préparation de la boue avant le début d'un test, à sa régénérescence pendant un test et à sa récupération à la fin d'un test. De plus, ils permettent un contrôle relativement précis de la concentration de la pulpe injectée dans le décanteur. Les homogénéisateurs possèdent une hauteur de 1,22 mètre et un diamètre de 0,686 mètre avec un cône de 30 degrés, pour un volume total d'environ 524 litres par homogénéisateur (figure 7.3). Les deux réservoirs sont munis d'une hélice permettant un brassage continu, qui maintient le sable en suspension et le mélange le plus homogène possible.



**Figure 7. 3 Plan et dimension d'un homogénéisateur.**

Le cinquième réservoir est le décanteur; il est d'échelle 1:11, par rapport au diamètre d'un décanteur typique de l'usine Vaudreuil (Alcan). Le cylindre du décanteur expérimental a une hauteur totale de 1.95 mètre et l'angle de cône est de 30 degrés. Ce décanteur a une capacité de 1473 litres, ce qui correspond à un ratio volumique de 1:1923

par rapport au volume d'un décanteur réel. Une série de fenêtres sont placées sur un de ses côtés pour faciliter l'observation de la décantation. Le cône est amovible, ce qui permet de le remplacer par un autre dont l'angle est différent. Une hauteur excédentaire de 0,25 mètre au-dessus du niveau du liquide est prévue pour faciliter l'installation du puits d'alimentation « feedwell » et la fixation de l'arbre du râteau (figure 7.4).

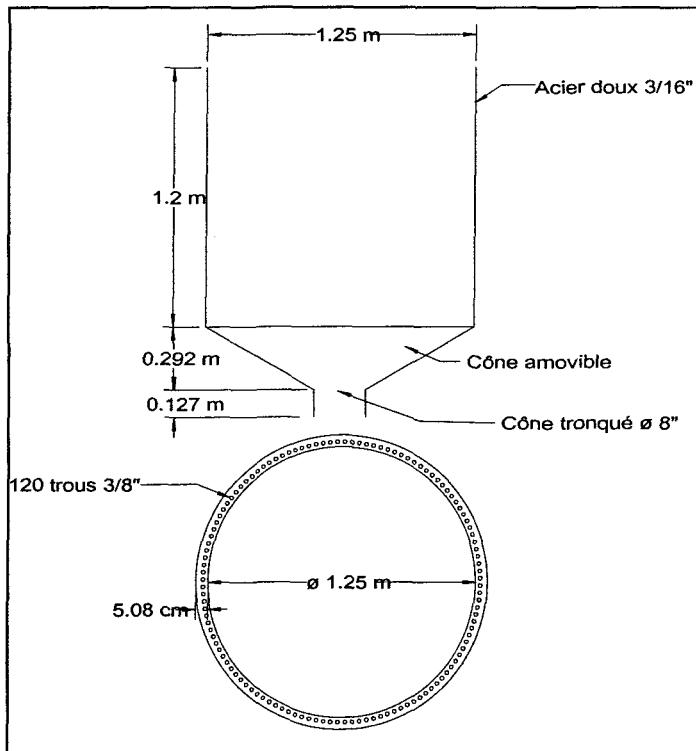
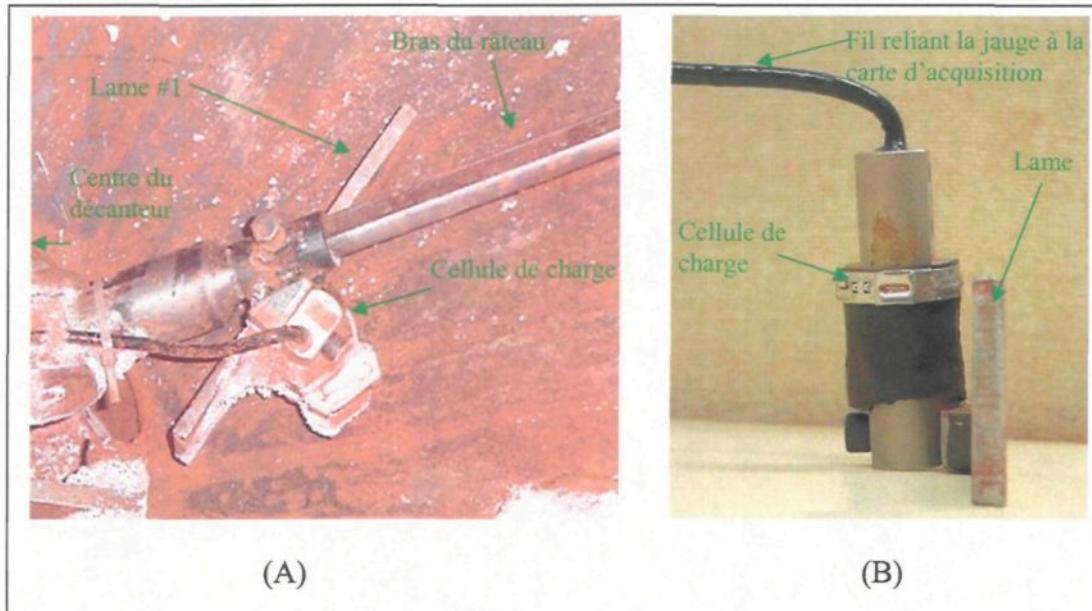


Figure 7. 4 Vue en plan du décanteur.

L'arbre du râteau a un diamètre de 6cm après réduction. L'entraînement de l'arbre est assuré par un moteur de 2hp à 3 phases dont la vitesse nominale est de 1680 rpm; il sera couplé à un réducteur du type WORM hélicoïdal dont le ratio est de 918.2 :1, avec un couple de torsion à la sortie de 5133 lbf pieds, à une vitesse de 1.94 rpm, pour une fraction solide allant jusqu'à 65% (figure 7.1). Dans le décanteur, la fraction solide varie généralement entre 45% et 60% ce qui donne un facteur de sécurité raisonnable. L'ajustement de la vitesse de rotation du râteau est obtenu avec un variateur 0,5-250 Hz. Sur le décanteur réel, le couple de rotation est d'environ 596 kNm. La vitesse de rotation du râteau pour le décanteur réel est d'environ 0,3 rpm ce qui correspond à une vitesse tangentielle de 0,12 m/s à l'extrémité du râteau. Des jauge de déformation qui mesurent le taux de déformation sont installées entre le bras du râteau et les deux premières dents. Ces jauge étant fixées entre le bras principal et les dents, permettent d'obtenir la force exercées sur chacune des dents individuellement. De plus, une jauge de déformation (torque sensor) est installée dans la partie supérieure de l'arbre, près du couplage avec l'axe du réducteur, de façon à obtenir le couple total exercé sur le râteau. Toutes les jauge sont reliées à un système d'acquisition de données. Une carte iNET-100 est utilisée pour l'acquisition sur PC (figure 7.5).



**Figure 7. 5 (A)** Photo d'une dent instrumentée fixée sur le bras du râteau. **(B)** Cellule de charge et lame.

Le décanteur est alimenté en pulpe par le biais de trois pompes péristaltiques : L/S 25 pour le floculant, I/P 89 pour la liqueur et B/T 92 avec réducteur de vitesse 1:5 pour la boue recyclée. Les alimentations de la boue et de la liqueur se rejoignent presque immédiatement après la sortie du deuxième homogénéisateur de façon à former la pulpe non flokulée. La concentration et le débit de la pulpe sont ajustés grâce à un débitmètre Coriolis de marque « Promass 63, Endress And Hauser », placé en aval du lieu de rencontre de la boue et de la liqueur. Cet appareil permet de connaître continuellement, le débit et la densité du mélange. Le débit d'opération moyen de la pulpe est d'environ 7,94 lpm. La viscosité dynamique de la pulpe est estimée à 2 centipoises à température ambiante. Le floculant est ajouté à la pulpe entre le débitmètre Coriolis et le mélangeur statique (figure

floculant est ajouté à la pulpe entre le débitmètre Coriolis et le mélangeur statique (figure 7.6 A). Le débit de floculant est lui aussi contrôlé par un débitmètre, Coriolis mais de marque « MicroMotion ». Son débit débit est contrôlé comme le débit de liquide et de boue, en fonction des différents paramètres d'opération. La viscosité dynamique du floculant est estimée à 100 centipoises à température ambiante. Le mélange de la pulpe et du floculant traverse ensuite un mélangeur statique (figure 7.6 B), sorte de gros tuyau faisant plusieurs boucles, de façon à obtenir une flocculation efficace. Le mélangeur est installé immédiatement en amont du puits d'alimentation « feedwell » (figure 7.7). Le mélange de la pulpe et du floculant est injecté de façon tangentielle au puits d'alimentation.

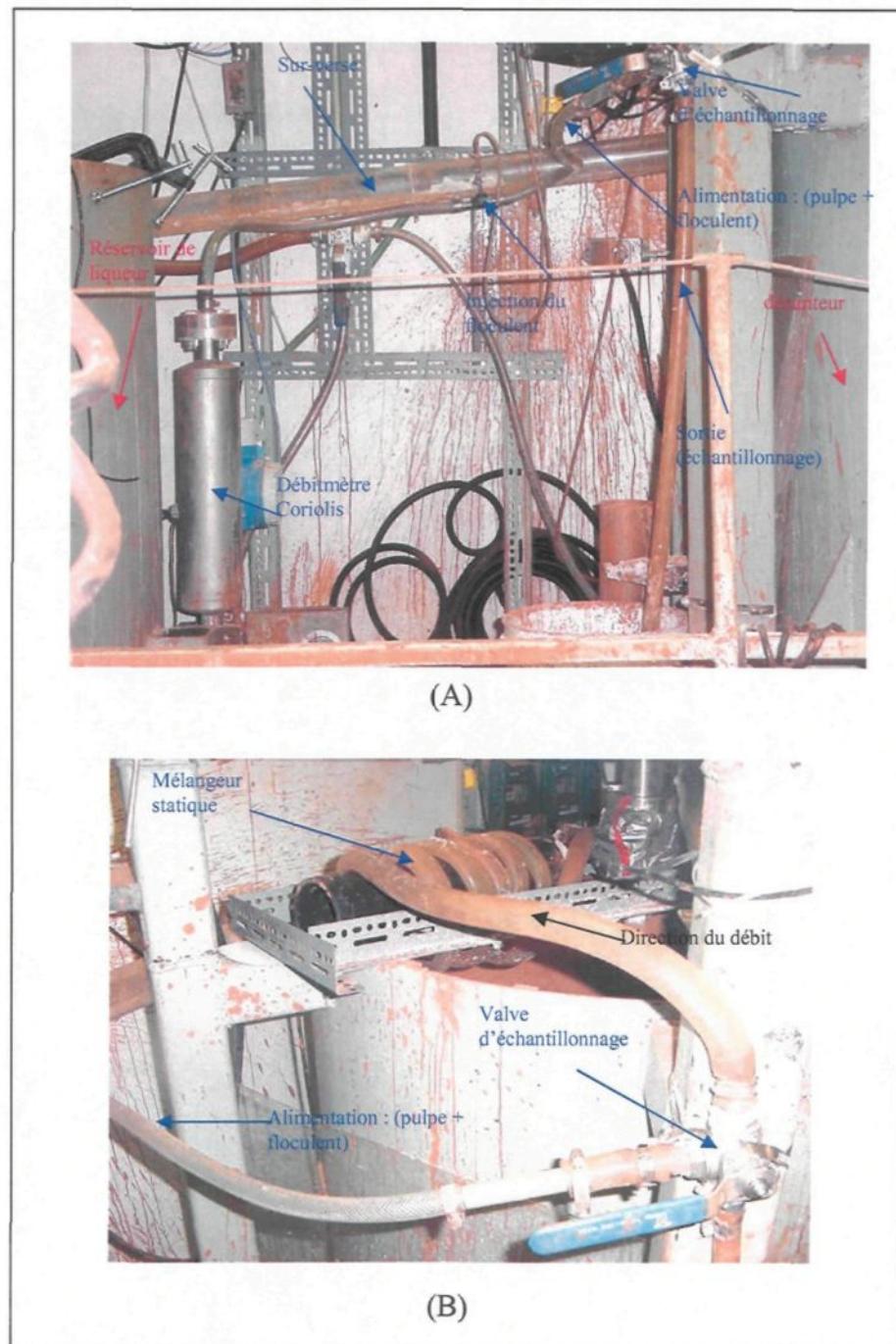
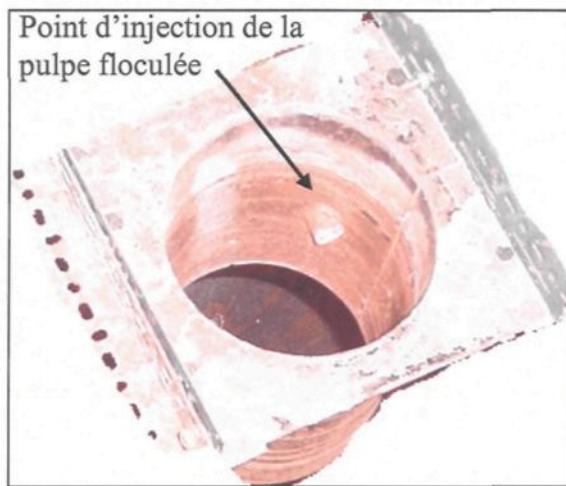
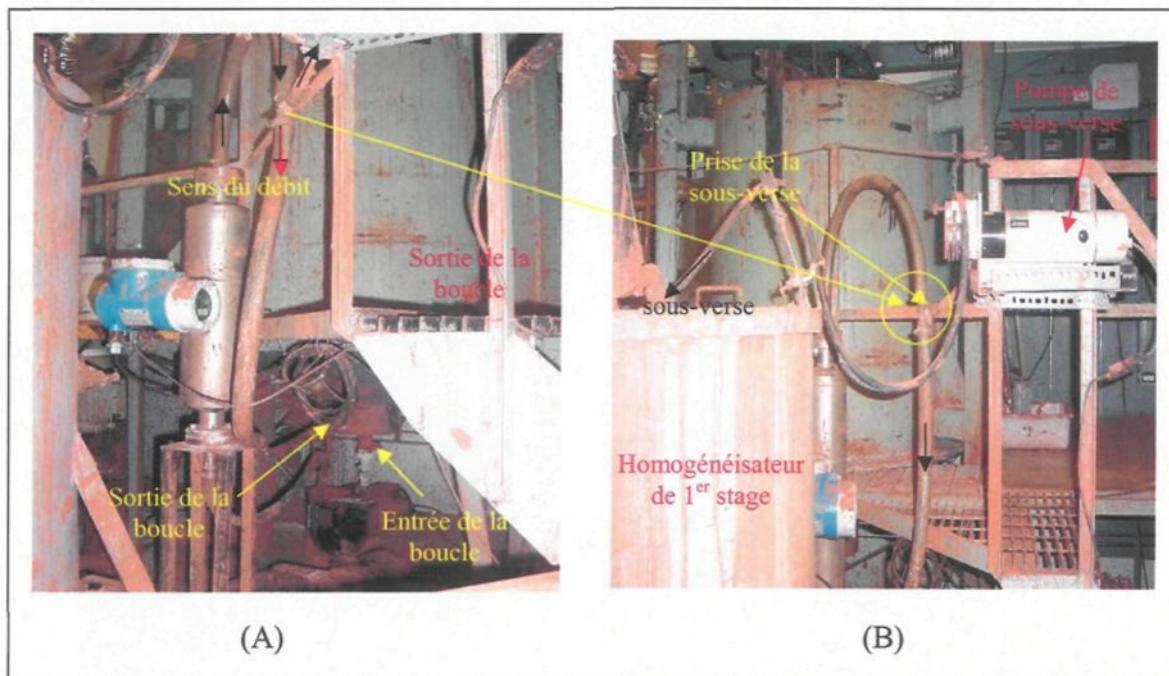


Figure 7. 6 (A) Alimentation et surverse. (B) Mélangeur statique.



**Figure 7.7 Puits d'alimentation.**

La liqueur recueillie à la surverse du décanteur est renvoyée vers le réservoir de liqueur, par gravité. À la sousverse, on retrouve une boucle de fluidisation. L'entrée et la sortie de cette boucle sont situées dans le puits de décharge. La boue est pompée de façon continue dans la boucle par une pompe B/T 92; sur cette boucle, un troisième débitmètre Coriolis «Promass 63, Endress And Hauser » est placé de façon à obtenir la densité et le débit de la sousverse à tous moments. Cette boucle permet de briser les agglomérats floculés en augmentant leur vitesse et les contraintes mécaniques exercées sur eux. La boue rouge étant thixotropique, sa viscosité diminue dans la boucle, ce qui réduit les risques de blocage de la sousverse. Sur la boucle, en amont du débitmètre Coriolis, une conduite de sortie permet à une pompe L/S 25 d'évacuer la boue vers l'homogénéisateur de premier stade. Cette sortie permet de prendre des échantillons périodiquement pour valider les valeurs du débitmètre. La boue est finalement pompée de l'homogénéisateur de premier stade vers celui de deuxième stade, pour être recyclée et reincorporée dans le système.



**Figure 7. 8 (A) Boucle de recirculation. (B) Sous-verse.**

Les débits de la boucle de recirculation et de la sortie sont ajustés en fonction des paramètres de contrôle et de la viscosité dynamique, qui peut varier entre 4000 et 30000 centipoises. Le volume de boue dans le décanteur est estimé à 28% du volume total. Le temps de résidence de la boue dans le décanteur expérimental est du même ordre que celui de l'usine : environ 4 heures, mais il peut être modifié.

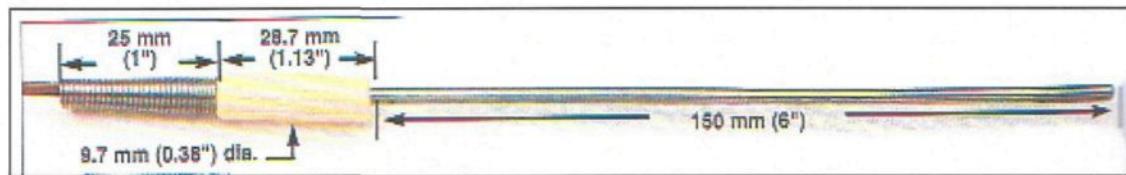
Les pompes de sousverse et d'alimentation de liqueur ainsi que les trois débitmètres Coriolis sont reliés à système A/D INET-100 placé dans l'ordinateur de contrôle. Le moteur du râteau et toutes les jauge de déformation sont aussi reliés à un système d'acquisition de données A/D INET-100. Ce système, placé tout en haut du décanteur,

tourne avec le râteau. Cet ordinateur est relié à l'ordinateur de contrôle grâce à un système de carte réseau sans fil.

### 7.1.2 Description des instruments de mesure

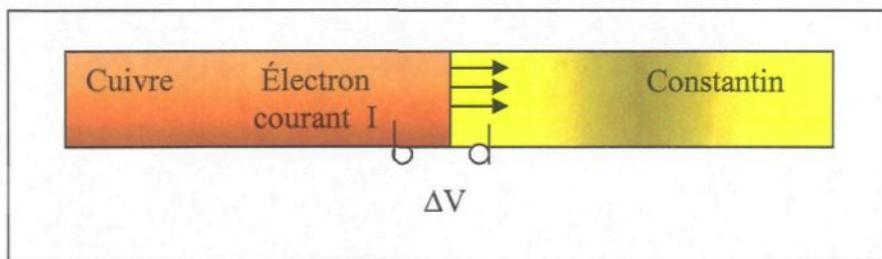
#### 7.1.2.1 Les thermocouples

Dans les essais thermiques, la température de la boue ainsi que son déplacement ont été mesurés grâce à des thermocouples de type K disposés, de façon régulière, 9 centimètres à l'arrière des lames (figure 7.14 A) [28].



**Figure 7.9 Thermocouple utilisé [28].**

Le principe de fonctionnement d'un thermocouple est relativement simple. Lorsque deux métaux sont joints, une différence de potentiel  $i$  est créée entre les deux, ce qui provoque un transfert d'électrons correspondant à un courant électrique. Ce phénomène est appelé, effet thermocouple, et est illustré à la figure 7.10. Il est très utile dans la fabrication des appareils mesurant la température, car l'effet varie avec la température.



**Figure 7. 10 Effet thermocouple [28].**

Les données recueillies grâce aux thermocouples correspondent à des voltages mesurés par un voltmètre et transmis à l'ordinateur. L'encyclopédie de la compagnie Oméga élabore de façon beaucoup plus exhaustive la théorie sur les thermocouples [28].

#### 7.1.2.2 Le torque senseur et les cellules de charge

Bien que leurs configurations soient très différentes, ces deux appareils ont pour utilité de mesurer la déformation, subie par une structure, sous une contrainte quelconque. Le torque senseur a pour objet les déformations subites sous torsion, tandis que la cellule de charge a pour objet les déformations de cisaillement. Ces deux types d'appareil fonctionnent selon le principe de jauge d'extensométrie.

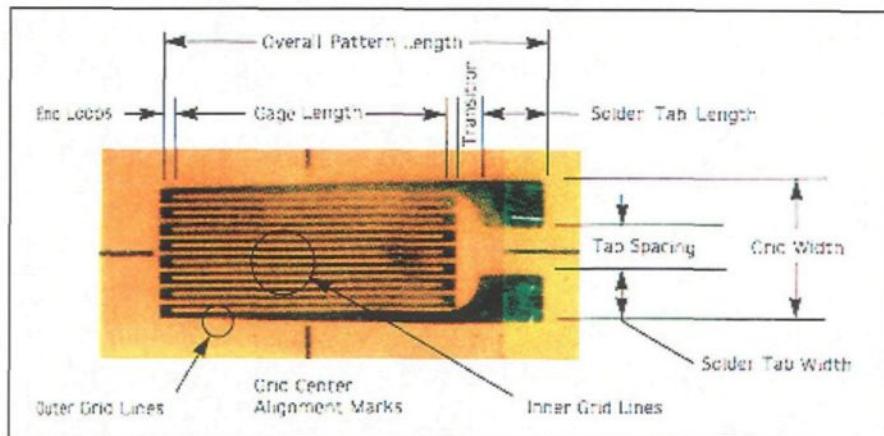
La jauge d'extensométrie est un petit élément résistif fixé sur une pièce, à l'endroit exact où l'on veut mesurer la déformation. Lorsque la pièce est soumise à un chargement, sa déformation est transmise, à travers la colle, jusqu'à la jauge de déformation. Un changement proportionnel de la résistance électrique de la jauge en résulte, d'après la relation :

$$\Delta R/R = K \Delta L/L = F\varepsilon \quad (7.1)$$

où R et L sont la résistance et la longueur initiale de l'élément résistif de la jauge et où  $\Delta R/R$  et  $\Delta L/L$  (ou  $\varepsilon$ ) sont les changements unitaires de résistance et de longueur. Le facteur de jauge F représente donc la sensibilité de la jauge.

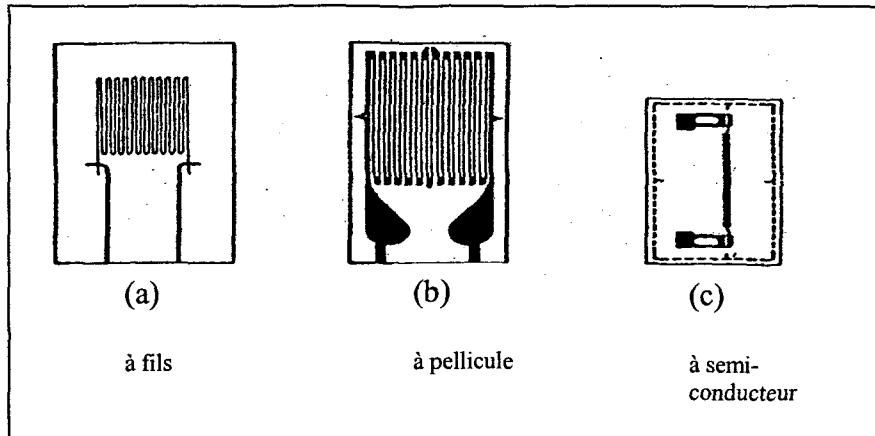
Une jauge idéale devrait avoir une très grande résistance, un facteur de jauge maximum et une limite élastique très élevée, tout en étant insensible aux effets de température. De plus, le facteur de jauge F devrait rester constant quel que soit le niveau de déformation appliquée.

Pour que la jauge puisse fonctionner adéquatement en tension aussi bien qu'en compression, son filament résistif doit être le plus mince possible afin que la colle puisse lui transmettre intégralement les déformations de la pièce [4].



**Figure 7. 11 Description détaillée d'une jauge à pellicule [27].**

Le terme «jauge d'extensométrie à résistance électrique» inclut aussi bien les jauge semi-conductrices (non métalliques) que les jauge métalliques.



**Figure 7. 12 Trois différents types de jauge [4].**

Le fonctionnement et les applications reliées à ces types d'appareils sont beaucoup plus détaillés dans le catalogue Oméga relatifs à la pression et aux déformations [27].

#### 7.1.2.3 Les débitmètres Coriolis

Le débitmètre Coriolis (Promass 63) est utilisé pour mesurer la densité, la quantité et le débit de la pulpe et de la boue. Lorsqu'un fluide en mouvement passe à travers un tube vibrant, les forces de Coriolis produites par le débit du fluide déforment légèrement le tube. Les déformations produites sont ensuite détectées par des capteurs et traitées électroniquement. Puisque les déformations détectées sont directement proportionnelles au débit du fluide, le débitmètre à effet Coriolis permet donc de connaître de façon directe le débit du fluide le traversant. Ce principe de mesure est indépendant de la densité, de la température, de la viscosité, de la pression ou de la conductibilité. À l'intérieur du débitmètre, le tube vibre toujours à sa fréquence naturelle qui est fonction non seulement de sa géométrie et des propriétés du matériel qui le compose, mais aussi la masse du liquide

qui le traverse. La mesure de cette fréquence fournit une information exacte sur la densité du fluide. La force de Coriolis est donnée par l'équation 7.2 :

$$\vec{F}_C = 2 \cdot \Delta m (\vec{\omega} \cdot \vec{v}) \quad (7.2)$$

où  $F_c$  = force Coriolis

$\Delta m$  = masse du corps en mouvement

$\omega$  = vitesse angulaire

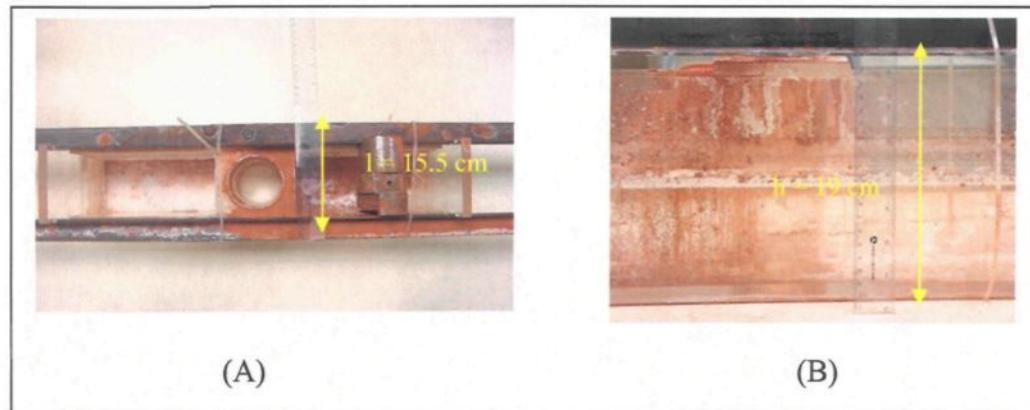
$v$  = vitesse radial dans un système en rotation ou en oscillation

Pour une description plus exhaustive du système, des principes de mesure ainsi que de son installation, il faut se référer au manuel d'instruction de la compagnie « Endress and Hauser » [10].

## 7.2 Description des essais réalisés et modifications du montage

L'expérimentation effectuée dans ce projet comprend trois différentes séries d'essais. Tout d'abord, les essais thermiques avaient pour but de vérifier l'efficacité des râteaux à déplacer la boue décantée vers le centre du décanteur. Les seconds essais, en continu, avaient pour but la comparaison de trois configurations de râteau. La dernière série d'expériences avait pour objectif l'amélioration de la stabilité du système par décentralisation du puits d'alimentation.

Notons que la description du montage correspond à la configuration des derniers essais. Dans les essais thermiques et les essais de comparaison de trois râteaux, la boucle de recirculation était absente. La sousverse passait donc directement du décanteur à l'homogénéisateur de premier stade. Le puits d'alimentation utilisé pour ces essais est présenté à la figure 7.13 :



**Figure 7. 13 Puits d'alimentation utilisé pour les essais thermiques et les essais de comparaison des trois râteaux.(A) Vue verticale. (B) Vue en plan.**

## 7.2.1 Les essais thermiques

### 7.2.1.1 Les paramètres expérimentaux

Provenance de la boue : usine Vaudreuil (Bopile)

Configuration : demi-râteau

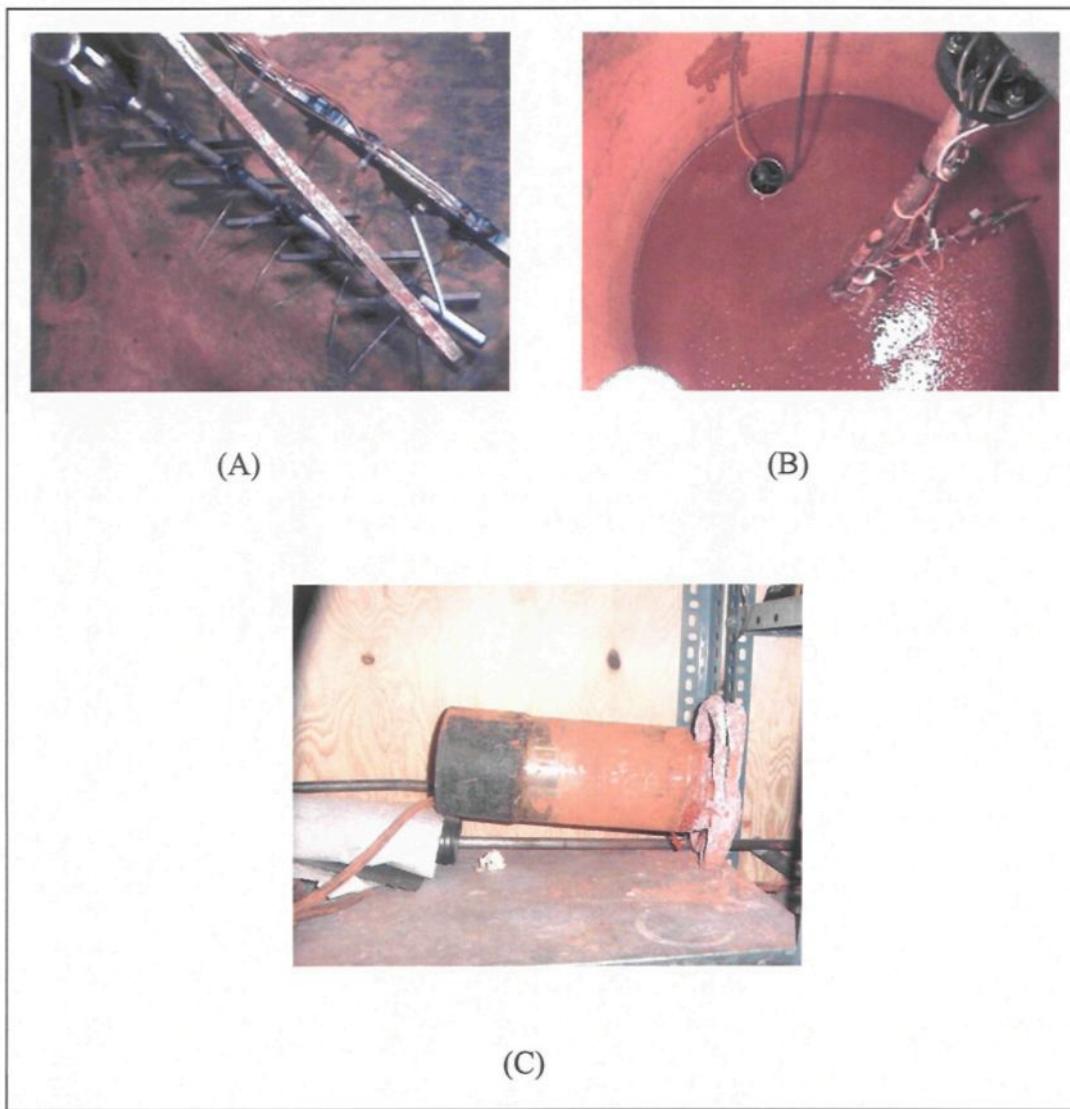
% p/p dans l'homogénéisateur: 40%

% de sable (100 mesh): 14%

Débit au puits de décharge:	1 L/min
Volume de boue:	282 L
Temps de résidence moyen:	4.7 h
Réserve de boue:	4.5 h
Vitesse de rotation:	0.5 rpm
Trace thermique:	1 heure après démarrage

### 7.2.1.2 Protocole expérimental

- 1- Homogénéisation de la boue dans l'homogénéisateur I (au moins 2 heures).
- 2- Remplissage du décanteur avec de la boue non floculée, jusqu'à environ 15 cm au-dessus du cône ( $\approx$  280 litres).
- 3- Chauffage de la boue avec un élément chauffant de 1.5 kw, placé à une profondeur située entre la lame extérieure 1 et la lame extérieure 2, jusqu'à l'apparition de bulle à la surface de la boue (ébullition)(figure 7.14 C).
- 4- Démarrage du râteau et du système d'acquisition de données (0.5 rpm).
- 5- Chauffage effectué en continu. L'élément est retiré lors du passage du râteau et il est replongé immédiatement après.
- 6- Arrêt de l'expérience après environ 30 minutes.



**Figure 7.14** (A) Disposition des thermocouples sur le râteau. (B) Endroit où le chauffage de la boue est effectué. (C) Appareil servant à chauffer la boue.

## 7.2.2 Les essais sur les trois configurations de râteau

### 7.2.2.1 Les paramètres expérimentaux

Débit alimentation : ~10 L/min  
 Débit sousverse : 0.5-1 L/min  
 Débit floculant : 50-100 mL/min  
 Dosage floculant : ~50g / tonne de boue sèche  
 % causticité : 50-60 %  
 Concentration total  
 de soda titrable (TTS): 35-40 g/L  
 Concentration de la pulpe : 50-100 g/L  
 % sable : 20-30  
 Niveau de boue : 5-10 cm au-dessus du cône  
 Vitesse des flocs : 15-25 m/h  
 Vitesse ascensionnelle : 0.4 m/h

### 7.2.2.2 Protocole expérimental

- 1- Préparation du floculant (12 heures avant le début du test).
- 2- Remplissage des deux homogénéisateurs avec environ 70% de boue fraîche provenant de l'usine. L'autre 30% provient de l'expérience précédente.
- 3- Homogénéisation de la boue pendant au moins trois heures.
- 4- Remplissage du décanteur avec de la boue à partir de l'homogénéisateur de premier stade jusqu'à environ 8 cm au-dessus du niveau du cône ( $\approx$  280 litres).
- 5- Remplissage du décanteur avec la liqueur Bayer jusqu'à la surverse.
- 6- Attente d'environ 6 heures, jusqu'à la stabilisation du système et léger compactage.

- 7- Début de l'alimentation en pulpe floculée, démarrage du râteau et du système d'acquisition de données (0.3 rpm).
- 8- Démarrage de la sousverse (pas de boucle de recirculation pour ces essais).
- 9- Transfert de boue de l'homogénéisateur de premier stade et ajout de liqueur Bayer (dilution) dans l'homogénéisateur de deuxième stade effectuée; lorsque son niveau de boue baisse de plus de 20 cm.
- 10- Prise systématique d'échantillons (à chaque heure) de l'alimentation, de la sousverse et du lit de boue à l'intérieur du décanteur.
- 11- Arrêt de l'expérience après environ 35 à 40 heures.

### **7.2.3 Essais avec le puits décentré**

#### **7.2.3.1 Les paramètres expérimentaux**

Dans cette partie, les paramètres expérimentaux sont les mêmes que dans les expériences sur les trois râteaux, à l'exception de la position du puits d'alimentation et de la durée des expériences, qui peuvent varier d'une expérience à l'autre.

### 7.2.3.2 Protocole expérimental

Les étapes sont sensiblement les mêmes que pour les essais précédents, à l'exception de quelques changements.

- 1- Préparation du floculant (12 heures avant le début du test).
- 2- Remplissage des deux homogénéisateurs avec environ 70% de boue fraîche provenant de l'usine. L'autre 30% provient de l'expérience précédente.
- 3- Homogénéisation de la boue pendant au moins trois heures.
- 4- Remplissage du décanteur avec la liqueur Bayer jusqu'au niveau de la surverse.
- 5- Début de l'alimentation en pulpe floculée, démarrage du râteau et du système d'acquisition de données.
- 6- Démarrage de la boucle de recirculation et de la sousverse (la boue passe du décanteur à l'homogénéisateur de premier stage); lorsque le niveau de boue atteint 8 cm au dessus du niveau du cône ( $\approx 280$  litres).
- 7- Transfert de boue de l'homogénéisateur de premier stade et ajout de liqueur Bayer (dilution) dans l'homogénéisateur de deuxième stade effectuée; lorsque son niveau de boue baisse de plus de 20 cm.
- 8- Prise systématique d'échantillons (à chaque heure) de l'alimentation, de la sousverse et du lit de boue à l'intérieur du décanteur.
- 9- Arrêt de l'expérience après environ 35 à 60 heures.

## 7.3 Méthode d'analyse

### 7.3.1 Les fractions solides

Les échantillons de fraction solide pris à la sousverse permettent d'obtenir les quantités de sable et de boue fine à la sousverse. Ces échantillons sont aussi utilisés pour valider les données obtenues grâce au débitmètre Coriolis. La détermination du pourcentage solide se déroule comme suit :

- 1- Prise d'un volume X de boue.
- 2- Pesée de la quantité de boue (total - contenant).
- 3- Filtration de l'échantillon sur un tamis de 100 mesh.
- 4- Récupération du sable et du liquide contenant les particules de boue.
- 5- Séchage du sable dans un pétri.
- 6- Filtration sous vide du liquide contenant les particules de boue et récupération du solide.
- 7- Séchage du solide au micro-onde (3x 2 minutes) pour éviter de brûler le papier filtre.
- 8- Pesée du sable et de la boue fine.

Le pourcentage de boue fine correspond au poids de boue fine sèche divisé par le poids de la boue humide. Il en va de même pour le sable.

### **7.3.2 Le traitement des données**

#### **7.3.2.1 Les données thermiques**

Pour les expériences thermiques, le seul traitement effectué sur les données fut de transposer les températures obtenues par les thermocouples de façon linéaire en une carte thermographique circulaire (Transformation:  $T(r,t) \rightarrow T(r,q) \rightarrow T(x,y)$ ). Le traitement n'a donc pas été effectué sur les valeurs des données de température mais plutôt sur leur localisation par rapport au temps. Pour ce faire un programme fortran a été construit.

#### **7.3.2.2 Les données de couple et de force**

Les données obtenues par le torque senseur et les cellules de charge n'ont subi qu'une seule modification. Elles ont été divisées par la plus haute valeur obtenue par chacun des appareils, de façon à obtenir des valeurs adimensionnelles et à permettre une comparaison entre deux expériences différentes.

#### **7.3.2.3 Les données du débitmètre Coriolis**

Les données obtenues par le débitmètre Coriolis correspondent à la densité du mélange. Ces données correspondent à une valeur moyenne de densité calculée sur trente lectures de l'appareil. Les données utilisées pour construire les graphiques sont moyennées de façon centrée sur cinq minutes. De cette façon les fluctuations aléatoires sont négligeables et le traitement des données, moins fastidieux. Pour obtenir un pourcentage

solide total, les données sont traitées avec un petit programme fortran qui applique la formule 7.3 :

$$\% \text{ solide} = (1-\rho/1030)/(1-2900/1030) \cdot 2900/\rho \cdot 100 \quad (7.3)$$

où

$\rho$  = densité obtenue avec le débitmètre Coriolis

densité de la liqueur Bayer pure = 1030

densité de la boue sèche = 2900

### 7.3.3 Les erreurs sur les mesures

Les expériences effectuées ont pour but de caractériser de façon générale le comportement de certaines structures sous différentes conditions, et non de mesurer de façon extrêmement précise certaines valeurs. En prenant en considération que les phénomènes simulés durant les expériences se rapportent à une échelle industrielle, certaines marges d'erreur peuvent être acceptées. C'est pourquoi, dans les données expérimentales, les erreurs provenant des appareils de mesure ne sont pas considérées puisqu'elles répondent de façon très satisfaisante aux exigences désirées. Il est quand même utile de savoir que le débitmètre Coriolis introduit une erreur de  $\pm 0.10\%$  sur le débit d'un liquide, alors que les erreurs du torque senseur et des cellules de charge sont en deçà de 1% [10, 27].

## Résultats et discussion

Pour permettre une meilleure compréhension des phénomènes régissant la dynamique d'un décanteur et pour effectuer la vérification des hypothèses émises, plusieurs étapes sont nécessaires. Les travaux ont été réalisés selon le plan expérimental suivant :

Les premières expériences ont eu pour but de vérifier l'efficacité du râteau à 5 lames et 1 bras, à déplacer la boue vers le centre. Ces expérimentations ont été effectuées par traçage thermique, en fournée et avec une boue non floculée.

La seconde partie a eu comme objectif de vérifier l'efficacité de l'espacement des lames du râteau. Trois configurations de râteau, dont l'espacement entre les lames est différent, ont été étudiées. Les essais avec la première configuration, représentant le râteau utilisé en usine, avaient pour objectif de permettre de recréer et d'observer le phénomène de d'obstruction des lames. Les essais avec les deux autres configurations avaient pour but d'étudier et de vérifier l'efficacité de l'espacement des lames du râteau. Pour permettre d'évaluer l'efficacité des ces trois configurations, les expériences ont été effectuées en continu et avec une boue floculée, de façon à reproduire le plus exactement possible les conditions retrouvées en usine.

La troisième partie des travaux s'est déroulée de la même façon que la précédente. Les essais ont d'abord été effectués avec un puits centré, pour permettre de reproduire et d'observer le noyau central. Puis, des essais ont été faits afin d'étudier l'effet de la variation

de la vitesse du râteau sur le noyau. Et les derniers essais ont porté sur le puits décentré, pour permettre de mesurer son efficacité à prévenir la formation du noyau central.

### **8.1 Le déplacement de la boue sous l'effet du râteau en fournée**

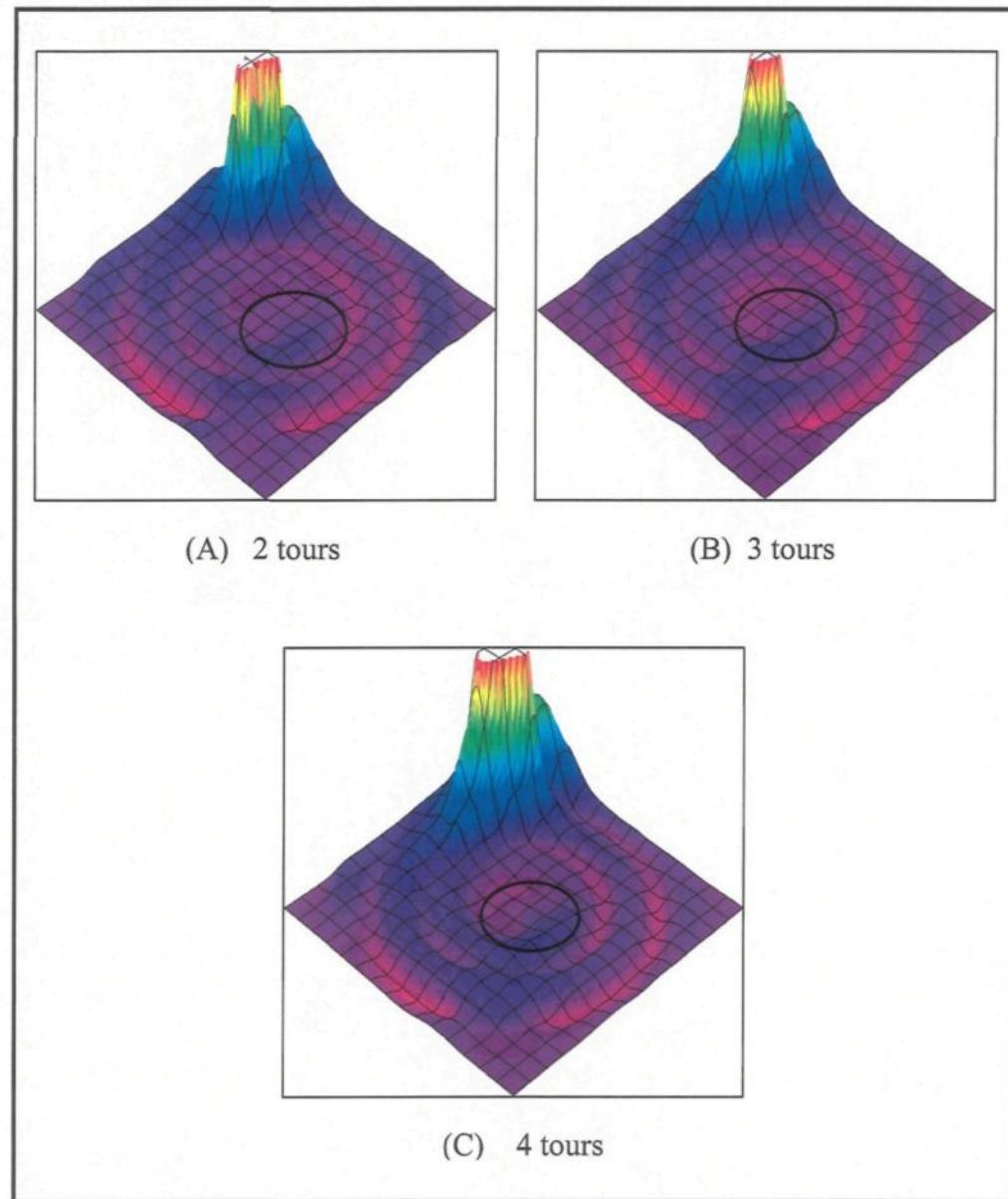
Pour cette première partie, le déplacement de la boue a été étudié dans le système le plus simple possible, c'est-à-dire que les essais sont effectués en fournée avec une boue non floculée. La première série de tests a été effectuée avec de la boue non floculée parce que cette dernière ne demande aucun prétraitement, ce qui rend les tests plus faciles à réaliser et, qu'aucune indication ne confirmait l'efficacité des râteau avec la boue floculée, il était donc préférable de commencer avec une boue plus facile à déplacer pour examiner les effets du râteau. Pour permettre l'observation du déplacement de la boue située en périphérie du décanteur vers le puits de décharge situé au centre une technique de traçage thermique a été utilisée. Pour ce faire, le décanteur a été rempli de boue à une hauteur d'environ dix centimètres au-dessus du cône. Un élément chauffant est ensuite introduit le long de la paroi du décanteur, à une profondeur de dix centimètres sous le niveau de la boue, et il est activé pendant dix minutes. Le volume de boue chauffé est estimé suivant les dimensions de l'élément chauffant, à environ un litre. Puis le râteau est mis en marche à une vitesse de 0.5 rpm, vitesse qui correspond à la vitesse de certains râteaux en usine. Pour mesurer les différences de température à l'intérieur de la boue et pour permettre de suivre le déplacement du volume de boue chauffé, des thermocouples sont fixés aux lames du râteau. Les tests thermiques ont été effectués avec un râteau à lames progressives complet (figure

8.3). La raison qui justifie ce choix : cette configuration est déjà utilisée en usine et elle permet une comparaison des résultats.

La figure 8.1 montre le déplacement du volume de boue chauffé sous l'action du râteau; il est clair que la boue se déplace rapidement vers le centre. En effet, plus le râteau effectue de rotations et, plus le sillage induit par le râteau devient apparent. La figure (A) illustre une température maximale très apparente à l'endroit où le chauffage est effectué, tandis que le reste de la surface est plutôt isotherme. Si le râteau déplace la boue chaude vers le centre, les thermocouples placés en aval des lames détecteront une température de la boue de plus en plus élevée : c'est effectivement ce qui se produit. Les figures 8.1 (B) et (C) montrent une surface de moins en moins uniforme. Les sillages qui apparaissent sont causés par une augmentation du volume de boue chaude déplacée par les lames. Les figures 8.1 (A), (B) et (C) illustrent aussi que la représentation du volume de boue total devient de plus en plus pâle. Ce phénomène est causé par l'accroissement de la température à l'intérieur du volume de boue contenu dans le décanteur, augmentation qui découle du chauffage continu de la boue et du volume limité de boue. Cela démontre que cette méthode de traçage thermique de la boue en fournée comporte certaines limites. La détection de la boue chauffée est basée sur les différences de températures; or, plus le temps passe et plus le volume total de boue tend vers une température élevée et uniforme.

L'endroit précis d'observation de la boue chaude, pour valider l'efficacité du râteau, est mis en évidence dans la figure 8.1. L'accroissement de température à cet endroit de la figure 8.1 (A) implique que la boue chaude se déplace de la périphérie du décanteur à son centre en moins de deux rotations du râteau. Bien que ce volume semble faible après

deux tours, il est indéniable que la boue chaude a atteint le centre après quatre rotations du râteau (figure 8.1 (C)). Cette observation prouve que le râteau déplace facilement la boue non floculée vers le centre.



**Figure 8.1** Déplacement de la boue en fonction du nombre de tours effectués.

Les lames, qui ont un angle de 45 degrés avec le bras du râteau, déplacent la boue vers le centre selon un plan horizontal; cependant, pour que la boue soit évacuée par le puits de décharge, il doit y avoir un déplacement vertical causé par la gravité. Comme les lames sont placées suivant un angle de 30 degrés, angle qui correspond à celui du bras du râteau suivant le cône du décanteur, l'observation de la boue chaude au centre du décanteur, confirme donc qu'il y a bel et bien un déplacement vertical de la boue.

Mentionnons que les résultats obtenus sous-estiment probablement le déplacement de la boue dans un système complet en recirculation. En effet, l'action du râteau et le déplacement vertical de la boue se trouvent facilités par le pompage à la sousverse. L'évacuation de la boue au centre du décanteur fait en sorte que le râteau, qui agit comme une pompe radiale, n'a pas à combattre une accumulation de masse au centre aussi importante que lorsqu'il n'y a pas de pompage (fournée).

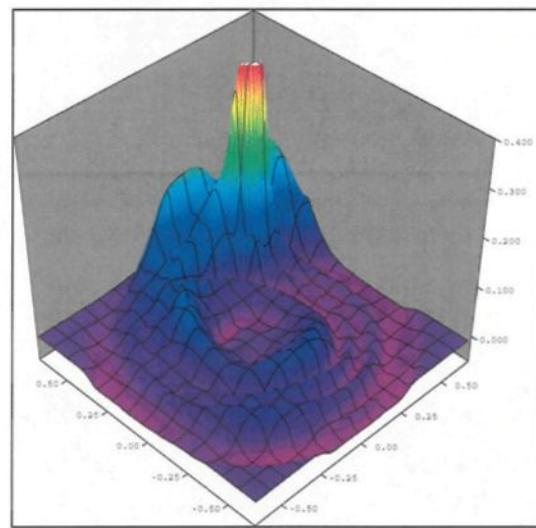
Bien que l'efficacité du râteau à déplacer la boue vers le centre soit confirmée, il est beaucoup plus difficile de quantifier le débit de boue déplacée. Il est possible de faire certaines approximations en calculant la surface des lames, la vitesse de rotation, la force de gravité, la viscosité de la boue, etc. Mais il est encore très difficile, à cette étape de la recherche, de quantifier ce débit de façon exacte.

La méthode du traçage thermique a pu être utilisée puisque le phénomène de la diffusion thermique est négligeable à l'intérieur de la boue. Dans le cas de la boue rouge, le nombre de Peclet, qui correspond au rapport entre la convection et la diffusion thermique d'un milieu, est de beaucoup supérieur à 1.

$$Pe_{boue\ rouge} = \frac{\omega RL}{\text{diffusivité thermique } (OH, NaOH, \text{sable}, \text{oxyde})} \approx 1000 \quad (8.1)$$

Le déplacement du volume de boue chauffée à l'intérieur du décanteur est donc uniquement dû à la convection provoquée par le râteau.

La figure 8.2 illustre la température de la boue à l'intérieur du décanteur après 18 rotations du râteau (36 minutes); elle confirme que le profil de température n'est dû qu'au phénomène de la convection. En effet, puisque le chauffage a été continu, si la diffusion était prépondérante, le profil de température observé devrait la mettre de plus en plus en évidence à mesure que le temps augmente. Or, le profil reste similaire à celui du départ avec le point chaud localisé et les sillages provoqués par le râteau.



**Figure 8. 2 Isosurface après 18 tours.**

Puisque la boue contient une certaine concentration de sable, le déplacement de ce sable à l'intérieur de la boue non floculée a été étudié. Pour ce faire, dix litres de sable chauffé à 200 degrés Celsius ont été injectés le long de la paroi du décanteur, à l'intérieur du décanteur rempli à plus de dix centimètres au-dessus du cône. Le sable n'a pas été détecté par les thermocouples. Des échantillons de boue ont permis de déterminer que le sable a coulé directement au fond en suivant la pente du cône. Cette observation montre que la boue non floculé, même à 55% solide, demeure assez fluide et peu visqueuse. Elle s'écoule facilement à travers les lames du râteau et, par conséquent, n'offre aucun support au sable.

Cette première partie, a ainsi permis de déterminer clairement que le râteau, à lames progressives (figure 8.2) possédant deux bras, déplace la boue non floculée de façon très efficace. Elle a aussi démontré que la boue reste relativement fluide, même à une fraction solide élevée, et qu'elle se déplace verticalement sous l'action de la gravité

## **8.2 Le déplacement de la boue en système continu avec floculation, sous trois différentes configurations de râteau**

L'objectif de cette partie est de vérifier l'efficacité de l'espacement des lames du râteau sur le déplacement de la boue. Pour ce faire, les tests ont été effectués avec trois différentes configurations de râteau, qui se distinguent principalement par le nombre et l'espacement de leurs lames respectives. Pour permettre une évaluation significative, les tests ont été effectués dans un système se rapprochant le plus possible des conditions du

système réel, c'est-à-dire en continu avec flocculation. L'observation d'un tel système devrait permettre de valider l'hypothèse selon laquelle l'espacement des lames du râteau a pour effet d'empêcher l'obstruction du râteau.

Les critères mesurant l'efficacité d'un râteau sont : un couple stable et faible, une fraction solide à la sousverse stable et élevée et une stabilité opérationnelle du système (blocages, «rat hole», etc). La configuration la plus efficace sera celle répondant le mieux à ces trois critères et, qui permettra d'éliminer l'obstruction des espaces entre les lames.

### **8.2.1 Les trois configurations de râteaux étudiées**

Les trois configurations de râteau étudiées sont des configurations à lames progressives. Le terme «lame progressive» indique que chacune des lames doit déplacer approximativement le même volume de boue vers le puits de décharge. Puisque la vitesse angulaire augmente avec le rayon, elle entraîne une augmentation du débit volumique de boue déplacé par les lames. Pour conserver des débits relativement constants, les surfaces des lames sont réduites en fonction du rayon. Le tableau 6.1 montre le débit volumique de boue transportée par chacune des lames en fonction de leur surface et de leur vitesse angulaire.

La première configuration de râteau étudiée correspond au râteau à lame progressive originale, illustré à la figure 8.3. Le terme «râteau original» est utilisé parce que cette configuration correspond à une configuration de râteau en application à l'usine. Le choix de cette configuration repose sur la possibilité de comparer les résultats obtenus avec le modèle physique et le comportement d'un râteau de taille réelle. Dans cette configuration,

le râteau possède deux bras et dix lames. Le nombre élevé de lames implique qu'elles se chevauchent partiellement. Ce chevauchement signifie que la lame numéro 3 balaie une partie de la surface de la lame suivante (voir figure 8.3). Les tests ont été effectués avec un demi-râteau pour faciliter la comparaison avec le râteau complémentaire à cinq lames et deux bras.

L'utilisation de la boue rouge provenant directement de l'usine, couplée au système en continu avec flocculation, permet de reproduire les conditions de viscosité de la boue retrouvées en usine. Ces conditions étant semblables, les tests effectués avec la configuration originale devraient permettre de reproduire les mêmes phénomènes qu'en usine.

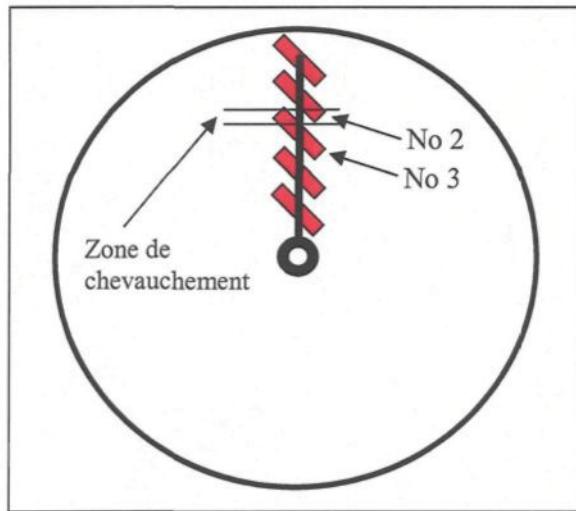
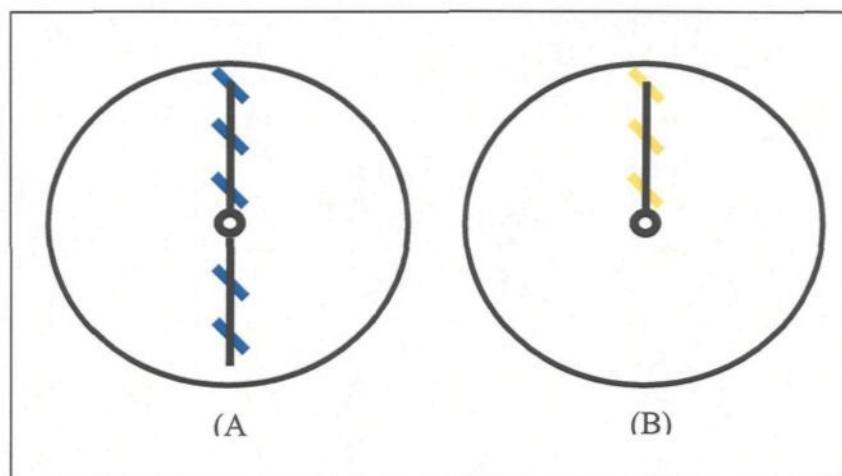


Figure 8. 3 Demi-râteau à lame progressive (configuration originale).

La deuxième configuration de râteau étudiée correspond au râteau à lames progressives complémentaires. Il s'agit d'un râteau à deux bras et cinq lames complémentaires (figure 8.4A). Le terme «complémentaire» signifie que les lames sont disposées de manière à ce que le début d'une lame sur le premier bras corresponde à la fin d'une autre lame sur le second bras. Cette configuration comprend le même nombre de lames que la configuration originale mais contrairement à cette dernière, elles sont disposées sur deux bras et réparties sur tout le diamètre du décanteur pilote. Cet étalement implique que les lames sont espacées de 20 centimètres, ce qui correspond au double de la distance qui sépare les lames du râteau original. Sous cette configuration, l'ensemble de la surface du décanteur est balayé par les lames en une rotation.

La troisième configuration de râteau correspond au demi-râteau complémentaire (figure 8.4B). Il s'agit, en fait, de la même configuration que le râteau complémentaire, auquel le bras possédant deux lames a été retiré. Sous cette configuration, les lames sont distancées de 15 centimètres. Cet espacement implique que la surface du décanteur n'est jamais balayée au complet.



**Figure 8.4 (A) Râteau complémentaire. (B) Râteau à trois lames et un seul bras.**

### 8.2.2 Comparaison entre les trois configurations de râteaux étudiées

Les protocoles utilisés lors des tests réalisés avec les trois configurations de râteau sont identiques. D'abord, le cône du décanteur est rempli de boue non floculée. Le remplissage du cône s'effectue avec de la boue non floculée car cela permet de suivre le comportement du râteau à mesure que la boue floculée qui s'accumule dans le cône. Une fois le niveau supérieur du cône atteint, le reste du décanteur est rempli de liqueur jusqu'à la surverse. Le système est ensuite mis en marche, incluant l'alimentation en boue, la flocculation, la sousverse et le râteau.

Pour rendre les valeurs de couple adimensionnel, celles-ci sont normalisées. Cela signifie que les courbes de couples sont exprimées par rapport à une valeur arbitraire correspondant au couple maximal obtenu lors d'essais préliminaire. La figure 8.6 montre le couple et le pourcentage de fraction à la sousverse pour le râteau à 5 lames et 1 bras. Le

couple et le pourcentage de fraction solide à la sousverse varient de façon presque identique. Comme le couple, la fraction solide commence à augmenter après une période située entre six et huit heures suivant le début de l'expérience. Ce délai correspond à l'apparition de la boue floculée à la sousverse. Tout comme le couple encore, la fraction solide atteint deux maximums soit après neuf et quatorze heures d'opération. Les maximums du couple ne sont cependant pas synchronisés avec ceux de la fraction solide.

Les variations de couple, illustrées à la figure 8.5, augmentent de la même façon que celles observées en usine<sup>7</sup>. La reproduction du comportement observé en usine permet donc de valider les résultats obtenus avec le décanteur pilote.

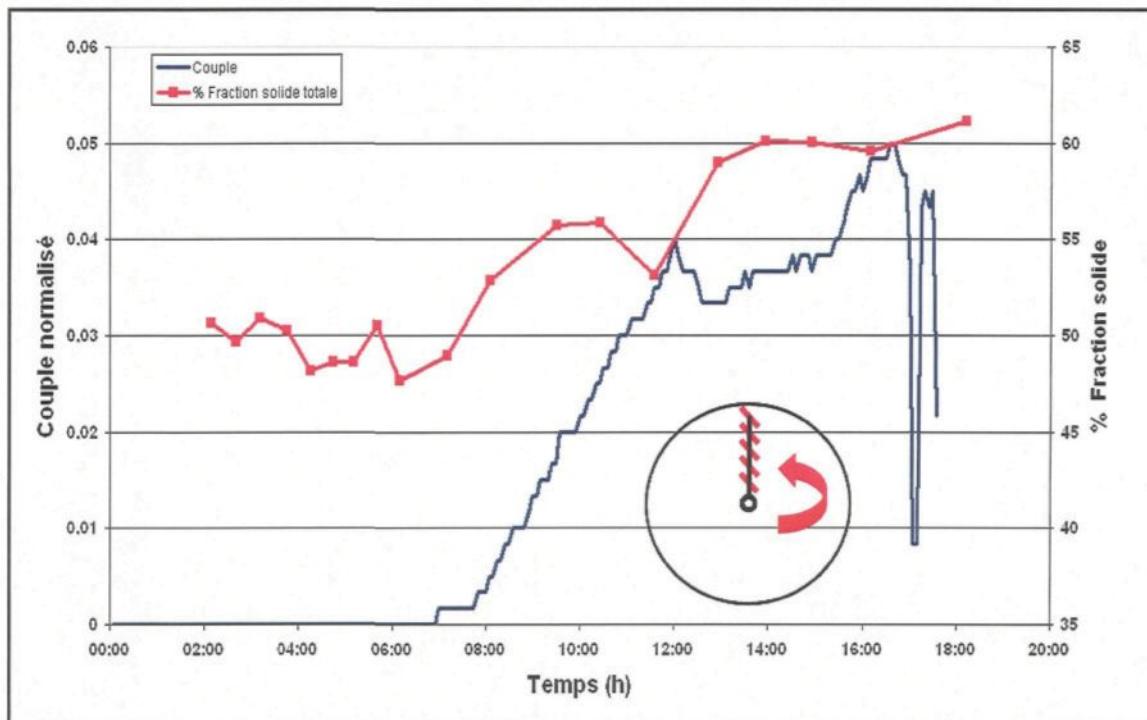
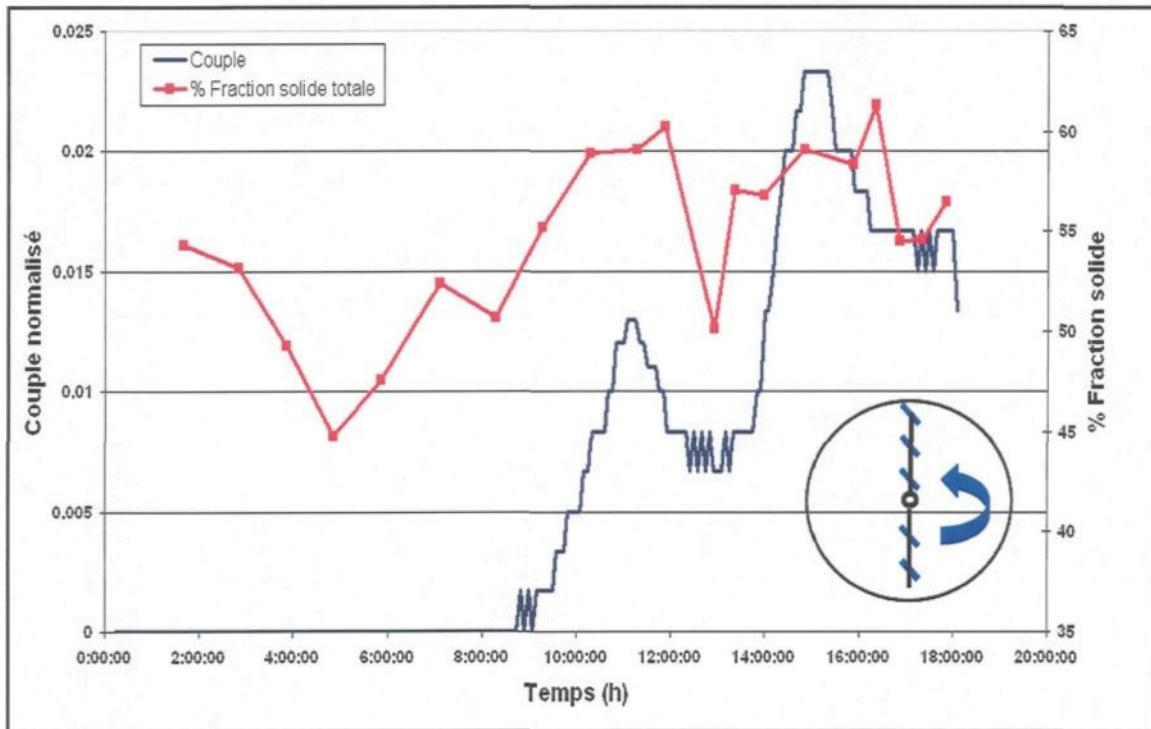


Figure 8. 5 Couple et fraction solide vs temps pour le râteau à 5 lames et 1 bras.

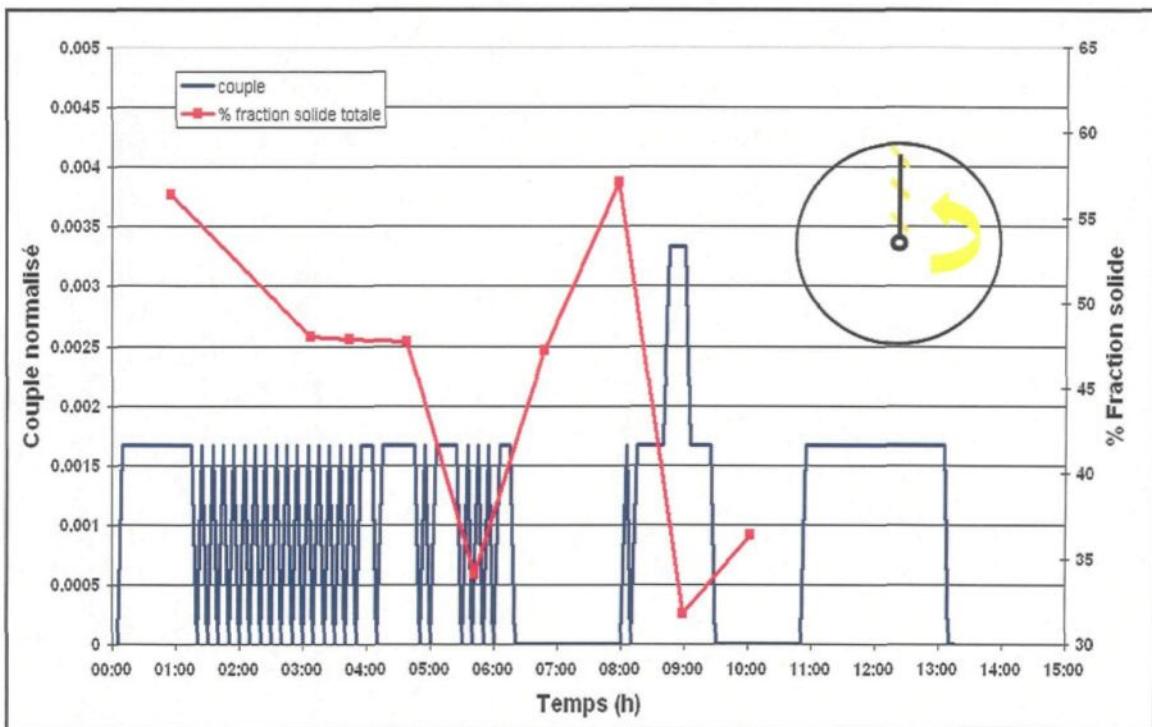
<sup>7</sup> Ces valeurs de couple sont disponibles dans les rapport de suivis d'opération des usines.

La figure 8.6 montre les variations du couple et du pourcentage de fraction solide à la sousverse pour le râteau complémentaire à 5 lames et 2 bras. Les variations observées avec le râteau complémentaire sont similaires à celles observées avec le râteau original à 5 lames et 1 bras, tant du point de vue du couple que du point de vue de la fraction solide. En effet, dans les deux cas, la fraction solide commence à monter entre 6 et 8 heures suivant le début de l'expérience. Les valeurs de fraction solide obtenues avec la configuration complémentaire sont du même ordre de grandeur que celles obtenues avec le râteau original à 5 lames et 1 bras.



**Figure 8. 6 Couple et fraction solide vs temps pour le râteau à 5 lames et 2 bras.**

La figure 8.7 montre les variations de couple et de pourcentage de fraction à la sousverse pour le râteau à trois lames et 1 bras. Le couple et la fraction solide à la sousverse, sous cette configuration, sont très faibles en comparaison avec le couple et le pourcentage de fraction solide à la sousverse, obtenue avec les deux autres configurations. Cependant, la fraction solide à la sousverse est instable variant entre 58% et 35% de façon rapide.



**Figure 8.7 Couple et fraction solide vs temps pour le râteau à 3 lames et 1 bras.**

Les trois figures précédentes montrent l'effet direct du pourcentage de fraction solide obtenu à la sousverse sur le couple. Les courbes de couple varient de façon similaire à celles de fraction solide sauf pour la configuration à 3 lames et 1 bras qui est plus instable. Pour les deux premières configurations, les maximums des courbes de couple et de % fraction solide surviennent presque simultanément.

La figure 8.8 permet de comparer le couple normalisé en fonction du temps, pour les trois différentes configurations de râteau. La courbe en rouge correspond au couple du

râteau original, la courbe en bleu correspond au râteau complémentaire et la courbe jaune correspond au demi-râteau complémentaire.

La figure 8.8 montre aussi que les râteaux de configuration originale et complémentaire possèdent des comportements similaires, tandis que le râteau à trois lames et un bras possède un comportement plutôt singulier. Ce dernier montre un couple sensiblement constant et très faible par rapport aux deux autres configurations. Bien que leurs comportements soient similaires, le couple du râteau complémentaire à cinq lames et deux bras est inférieur, avec des valeurs à près de la moitié de celles du couple du râteau original à cinq lames et un bras.

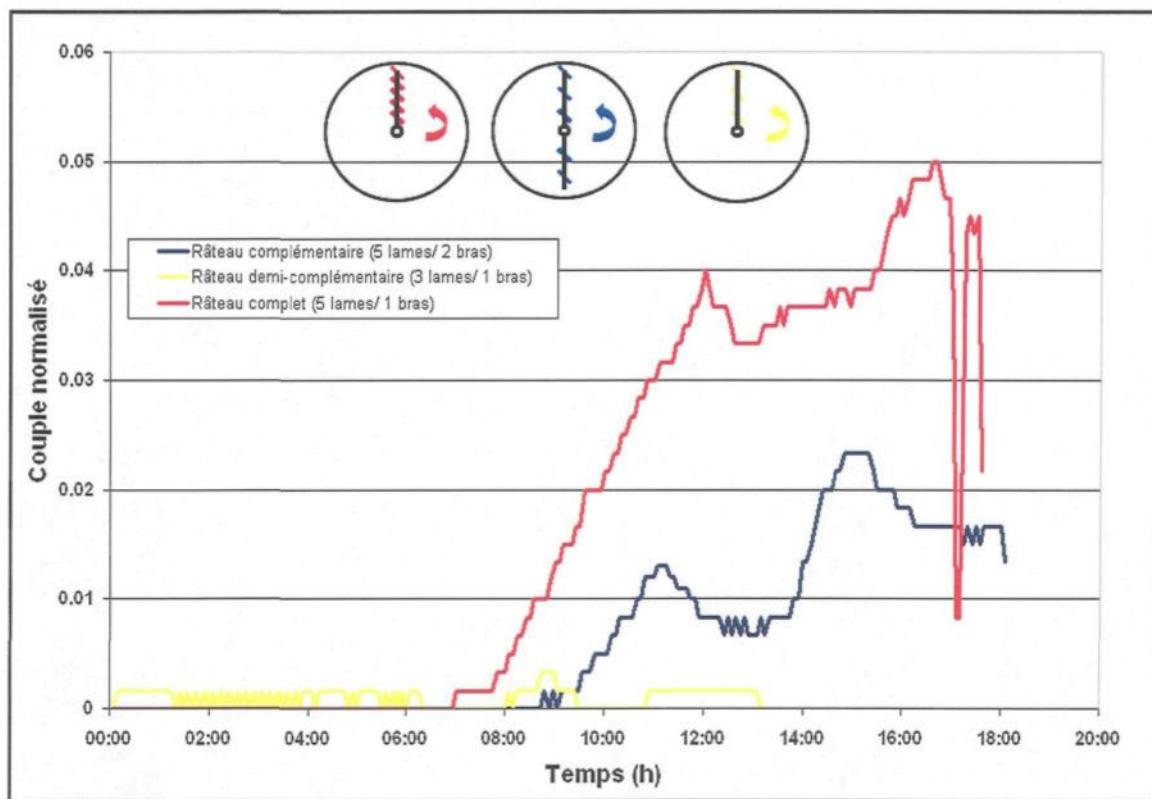


Figure 8.8 Comparaison du couple des trois configurations de râteau vs temps.

Les résultats de couple obtenus pour les trois configurations de râteau semblent indiquer que l'augmentation de l'espacement entre les lames est efficace pour réduire le couple. En effet, plus l'espacement entre les lames est grand, plus le couple est faible. Mais, comme il a été décrit à la section 6.2, plusieurs facteurs peuvent influencer le couple d'un râteau. Par conséquent, il est préférable de les examiner avant d'identifier la configuration la plus efficace.

Les principaux facteurs pouvant influencer le couple sont : la vitesse de rotation, la longueur des bras et la surface projetée des râteaux, c'est-à-dire le nombre de lames. À cela s'ajoute la viscosité de la boue. Puisque la vitesse de rotation et la longueur des bras sont gardées constantes pour chacune des configurations, ces paramètres ne peuvent être responsables des différences de couples mesurées. Trois facteurs peuvent alors expliquer les différences de couple : la viscosité de la boue, le nombre de lames et l'espacement des lames.

La configuration de demi-râteau complémentaire possède un bras et trois lames. Sa surface projetée correspond à environ quarante pour cent de la surface projetée des deux autres configurations. Le volume de boue qu'il déplace est, par conséquent, beaucoup moindre que celui déplacé par les deux autres configurations de râteau, ce qui explique en partie son faible couple. Les figures 8.5, 8.6 et 8.7 ont aussi montré que le couple dépend directement du pourcentage de fraction solide à la sousverse. Les faibles valeurs de fraction solide du râteau à 1 bras et 3 lames viennent, elles aussi, contribuer au faible couple obtenu avec cette configuration.

Les configurations originale et complémentaire possèdent toutes deux 5 lames, distribuées selon les mêmes rayons. La différence entre leur couple respectif dépend de donc deux facteurs : ou bien l'espacement entre les lames du râteau complémentaire empêche l'obstruction du râteau, ou bien la nature de la boue contenue dans le décanteur varie d'une expérience à l'autre.

Les figures 8.9, 8.10 et 8.11 montrent la composition de la sousverse, pour les trois configurations de râteau, en fonction du temps. La figure 8.9 montre que les pourcentages solides à la sousverse sont sensiblement les mêmes pour la configuration originale à 5 lames et 1 bras et la configuration complémentaire à 5 lames et 2 bras. Les figures 8.10 et 8.11 illustrent les variations du pourcentage de sable et de particules fines en fonction du temps, pour les trois configurations de râteau. Les courbes de ces trois figures montrent que les sousverses des tests effectués avec les configurations de râteau originale et complémentaire sont sensiblement stables et similaires. Quant aux tests effectués avec la configuration à 3 lames et 1 bras, ils montrent une sousverse beaucoup plus instable, autant au niveau du pourcentage de sable que de celui du pourcentage de boue fine.

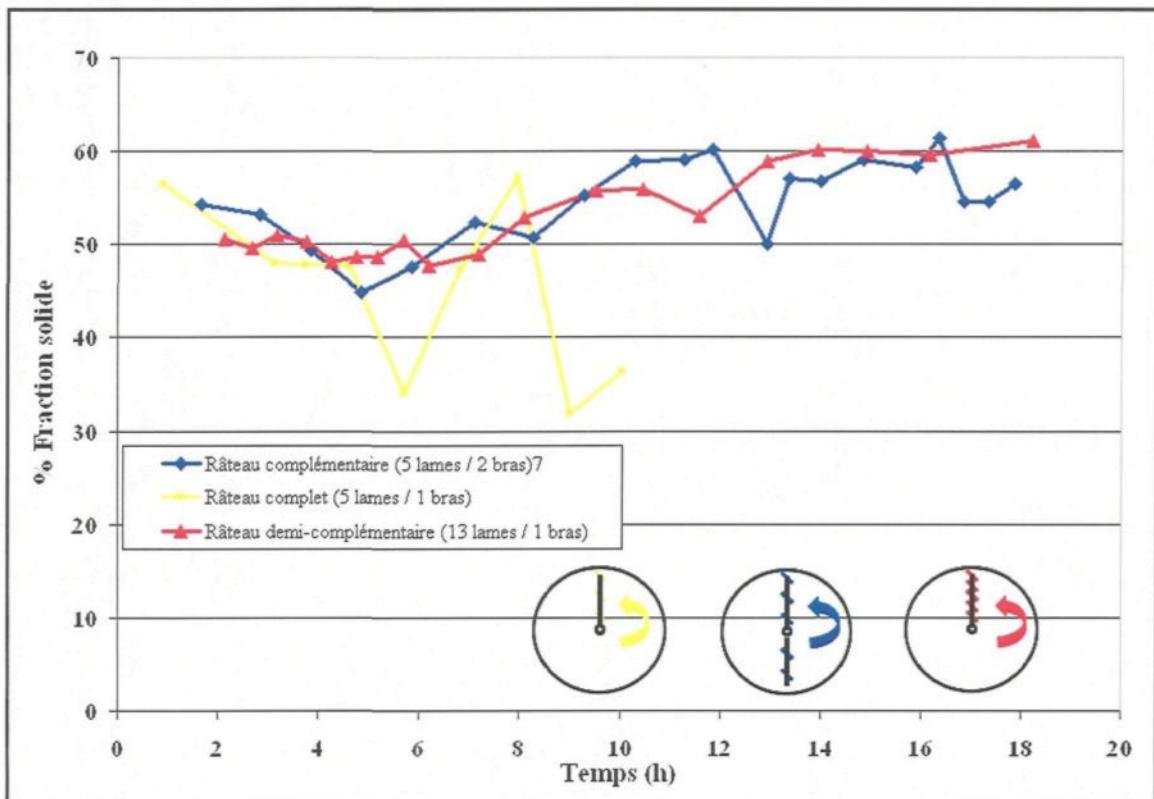


Figure 8.9 Comparaison du % de fraction solide à la sousverse en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.

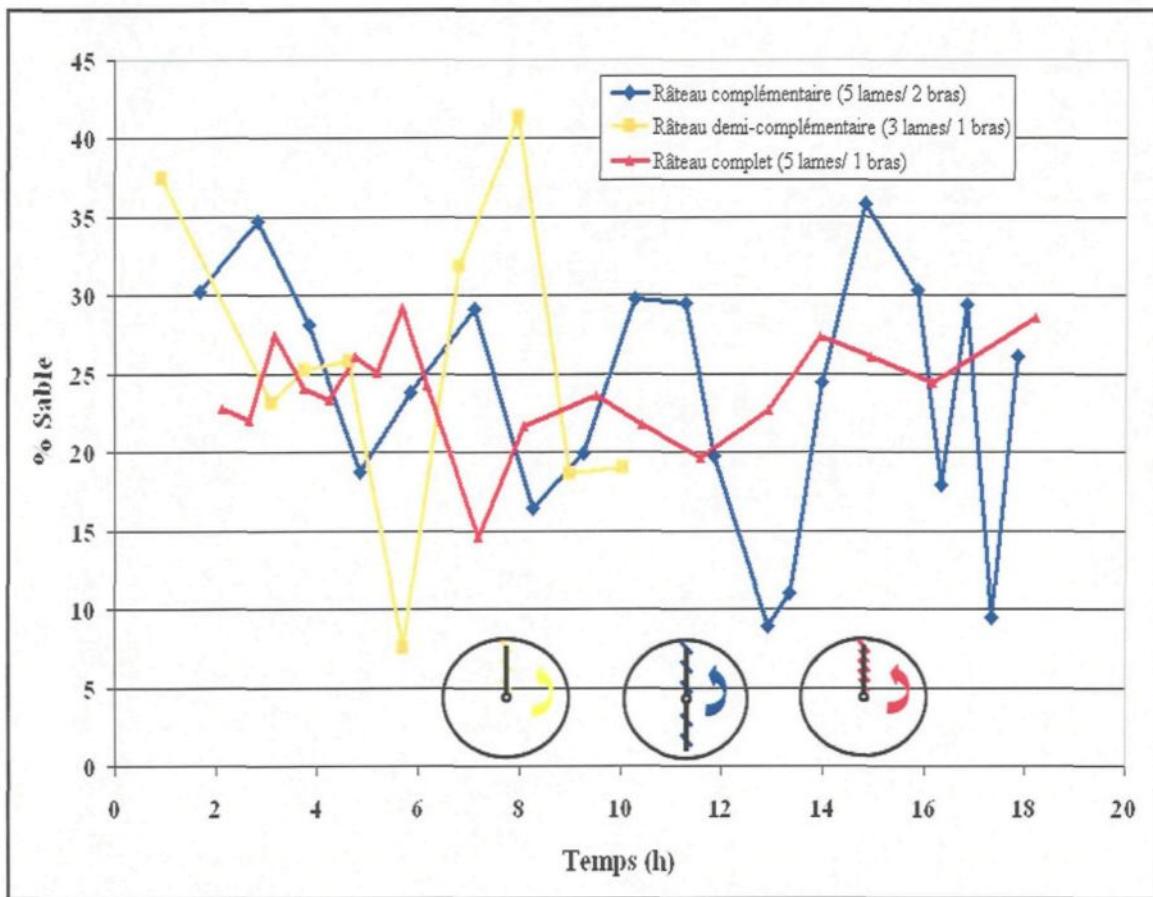
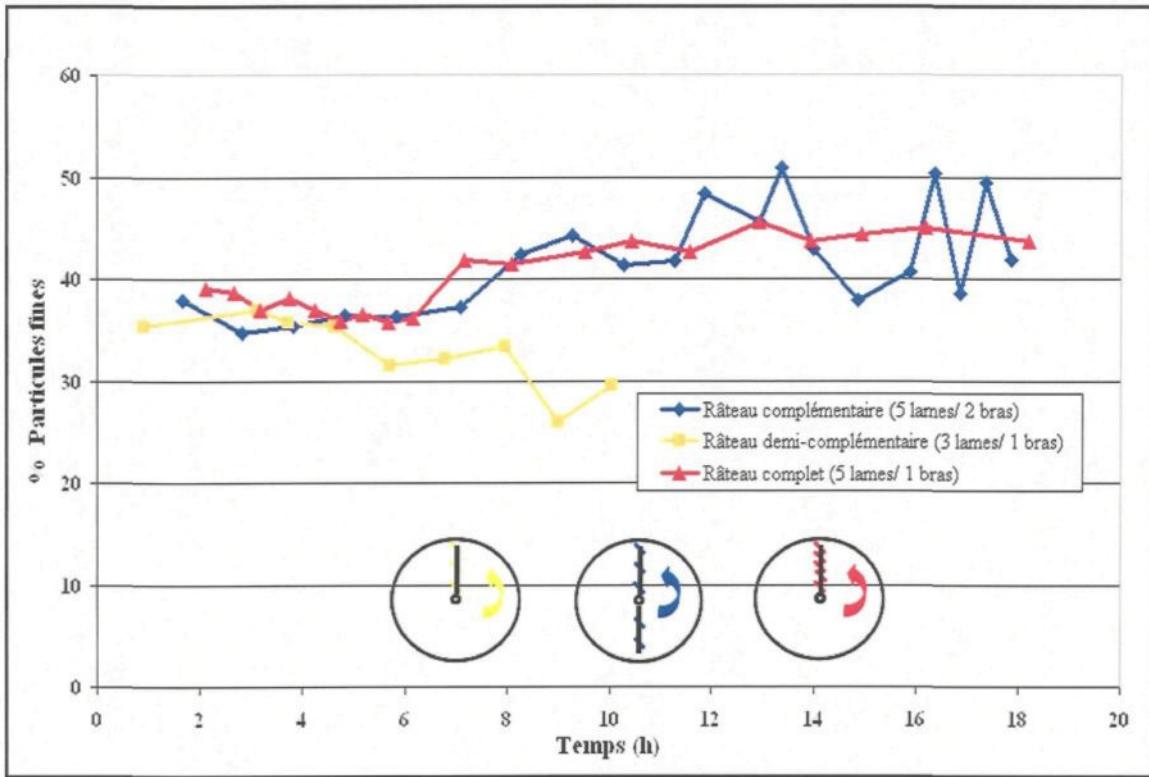


Figure 8. 10 Comparaison du % de sable à la sousverse en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.



**Figure 8. 11 Comparaison du % de particules fines à la sousverse en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.**

Comme il a été mentionné précédemment, l'analyse de la sousverse permet d'avoir une représentation sommaire de la composition de la boue à l'intérieur du décanteur. En se basant sur cette affirmation et sur la composition des sousverses obtenues lors des tests avec les configurations de râteau originale et complémentaire, il est possible de dégager la conclusion suivante : la différence entre le couple de la configurations à 5 lames et 1 bras et celui de la configuration à 5 lames et deux bras dépend uniquement de l'espacement entre les lames.

Pour observer le phénomène de l'obstruction du râteau, il a fallu vider progressivement le décanteur de façon à ne pas perturber le système. Une fois la liqueur retirée, il a été possible d'observer directement l'action des trois structures, ce qui a permis de constater que l'action de cisaillement du râteau à cinq lames et un bras est presque inexiste avec de la boue floculée. En effet, la viscosité très élevée de cette dernière entraîne l'obstruction complète des lames, du râteau original, qui ne sont séparées que de 10 centimètres les unes des autres comparativement à 20 centimètres pour le râteau complémentaire et à 30 centimètres pour le râteau à 3 lames et 1 bras. La boue ne pouvant plus circuler entre les lames du râteau à 5 lames et 1 bras, elle finit par passer au-dessus de la structure et son déplacement vers le centre semble dépendre en grande partie de la force de gravité. L'obstruction des espaces permettant à la boue de s'écouler entre les lames se traduit par une augmentation marquée de la surface effective du râteau. Le râteau, si efficace avec la boue non floculée, agit donc comme un simple grattoir avec la boue floculée. C'est pourquoi le couple devient si élevé. La configuration complémentaire avec ses lames beaucoup plus espacées, n'a pas présenté ce problème. Le volume de boue situé au fond du décanteur semblait posséder, tout comme pour le râteau original, une certaine structure rigide; mais le cisaillement et le déplacement de la boue vers le centre étaient toujours visibles après seize heures de test. Avec le râteau à 1 bras et 3 lames, la boue située au fond du décanteur semblait beaucoup plus fluide que dans les deux autres configurations. Ces observations corroborent les résultats obtenus pour les pourcentages de fraction solide aux sousverses. Elles permettent de aussi confirmer que l'espacement entre

les lames du râteau réduit de façon significative l'obstruction des râteaux et, par la même occasion, le couple.

Les résultats de fraction solide à la sousverse du râteau à 3 lames et 1 bras sont si faibles et si instables, qu'ils laissent supposer que le râteau exerce une influence sur le compactage de la boue et que l'espacement entre les lames doit, par conséquent être limité.

Pour s'assurer que la viscosité de la boue et son compactage ne dépendent que de l'action du râteau, tous les paramètres susceptibles d'avoir une influence sur la viscosité de la boue ont été vérifiés.

Comme la boue est un fluide thixotrope, c'est-à-dire dont la viscosité varie dans le temps en fonction des contraintes qui lui sont appliquées, les volumes de boue utilisés dans les différentes expériences sont soumis aux mêmes contraintes d'homogénéisation. Cette homogénéisation permet de s'assurer que les expériences sont effectuées avec des volumes de boue possédant sensiblement le même comportement. Les autres facteurs susceptibles d'influencer la viscosité du volume de boue à l'intérieur du décanteur sont : la fraction solide, la quantité de sable, le dosage de floculant et l'action du râteau sur la boue. Avant chacune des expériences, le pourcentage de sable est ajusté de façon à obtenir des volumes de boue contenant environ 20 % de sable. Des mesures de débit et de concentration de boue ainsi que des mesures de débit de floculant sont effectuées à chaque heure pour s'assurer que le dosage soit aux alentours de 50 grammes, par tonne de boue sèche. Le contrôle de ces paramètres à l'entrée permet de les exclure des causes susceptibles de modifier la viscosité du lit de boue.

Il ne reste alors que l'action du râteau sur le compactage de la boue, pour expliquer le faible pourcentage de fraction solide à la sousverse lors des tests effectués avec le râteau à 3 lames et 1 bras. Comme il a été mentionné au chapitre 6, le compactage de la boue est augmenté par l'action d'une structure mécanique en rotation. Puisque le râteau à 3 lames et 1 bras possède une surface effective d'environ quarante pourcent inférieure au deux autres configurations, il traite un plus petit volume de boue. Cela se traduit par un compactage dynamique du râteau plus faible et, par conséquent, par une fraction solide à la sousverse plus basse. De plus, comme les lames du râteau ne balaien pas toute la surface du décanteur, il y a création de zones mortes entre les lames. L'alternance entre les zones efficaces et les zones mortes contribue à créer un lit non homogène qui favorise les instabilités à la sousverse comme les blocages et les «rat hole».

### **8.2.3 Coefficient d'efficacité des râteaux**

Les principaux facteurs déterminant l'efficacité d'un râteau sont un couple faible et une fraction solide élevée et stable. Après avoir examiné les résultats du couple, du compactage de la boue ainsi que la stabilité opérationnelle de chacune des configurations, il en résulte que le râteau ayant le couple le plus faible est celui qui possède trois lames et un seul bras. Pour ce qui est de la stabilité et du compactage, il semble que les configurations originale à 5 lames et 1 bras et complémentaire à 5 lames et 2 bras soient sensiblement équivalentes. Pour déterminer la meilleure configuration de râteau, un coefficient d'efficacité incluant les trois paramètres les plus importants a été développé. Ce coefficient tient compte de la fraction solide de boue fine à la sortie des décanteurs, qui illustre le

compactage; de la fraction de boue fine de départ, pour tenir compte de l'amélioration de la fraction solide (état transitoire); finalement du couple normalisé de chacun des râteaux par rapport au couple le plus élevé ayant été mesuré durant l'expérimentation. L'équation 8.2 montre le calcul effectué pour obtenir le coefficient d'efficacité  $A_e$  :

$$A_e = \frac{\frac{Fs_{Finale} - Fs_{initiale}}{C}}{C_{max}} \quad (8.2)$$

où

$A_e$  = coefficient d'efficacité

$Fs_{initiale}$  = fraction des particules fines initiales (%)

$Fs_{finale}$  = fraction des particules fines à la sousverse (%)

$C$  = couple pour une configuration donnée à un temps donné.

$C_{max}$  = couple maximum pour les trois configurations.

La figure 8.12 montre les courbes des coefficients d'efficacité en fonction du temps, pour les trois configurations de râteau. Ce graphique montre d'abord que le râteau à 3 lames et 1 bras n'est pas efficace. La courbe décrivant son action est presque toujours négative. Bien que ce râteau possède un couple très faible, il n'effectue pas la principale tâche d'un râteau : le compactage de la boue et son déplacement régulier vers le puits de décharge. En plus du faible compactage de la boue, ce dernier induit une certaine instabilité opérationnelle telle que les blocages ou les « rathole ». Le « rathole » est un phénomène qui se produit lorsque l'apport en matériaux vers le centre ne suffit pas au débit du pompage à la sousverse; il en résulte alors un manque de matière au centre et la liqueur Bayer commence à être aspirée à la sousverse. Ces phénomènes sont indésirables en

industrie puisqu'ils font augmenter le niveau de boue à l'intérieur du décanteur et qu'ils évacuent la liqueur Bayer. La figure 8.12 permet de déterminer le râteau le plus efficace : le râteau de type complémentaire à 5 lames et 2 bras. Sa courbe d'efficacité donne un facteur moyen environ sept fois supérieur à celui du râteau de configuration originale à 5 lames et 1 bras

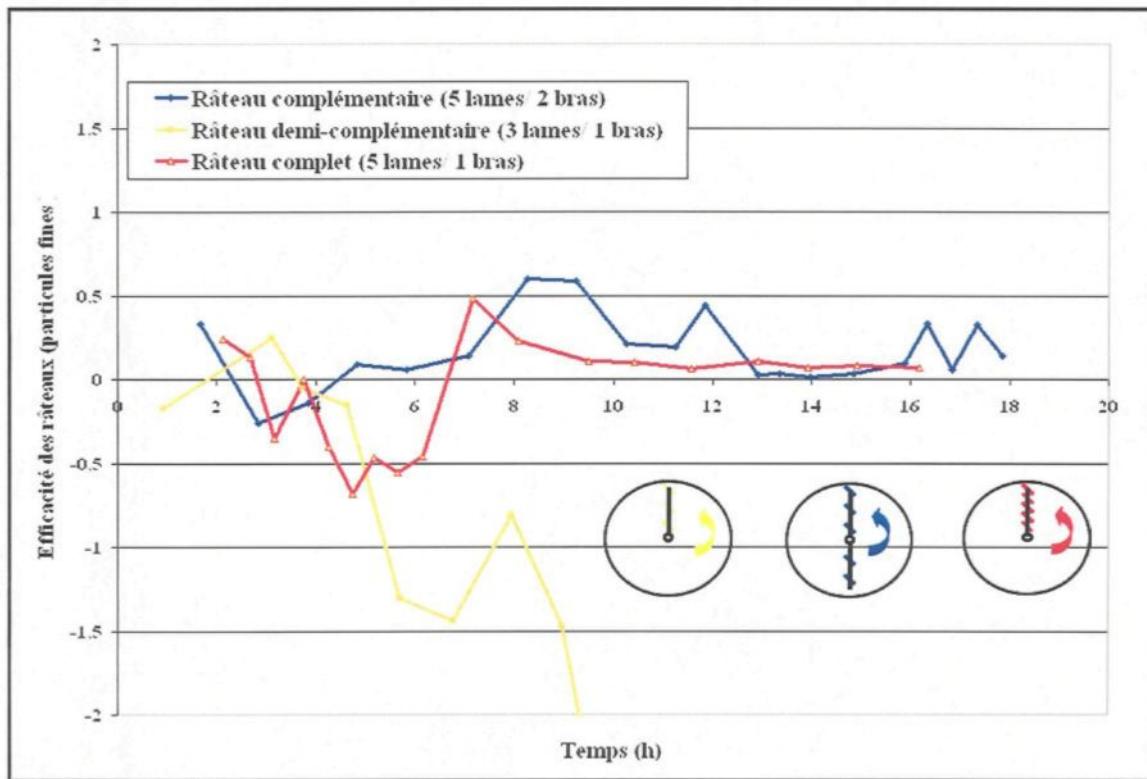
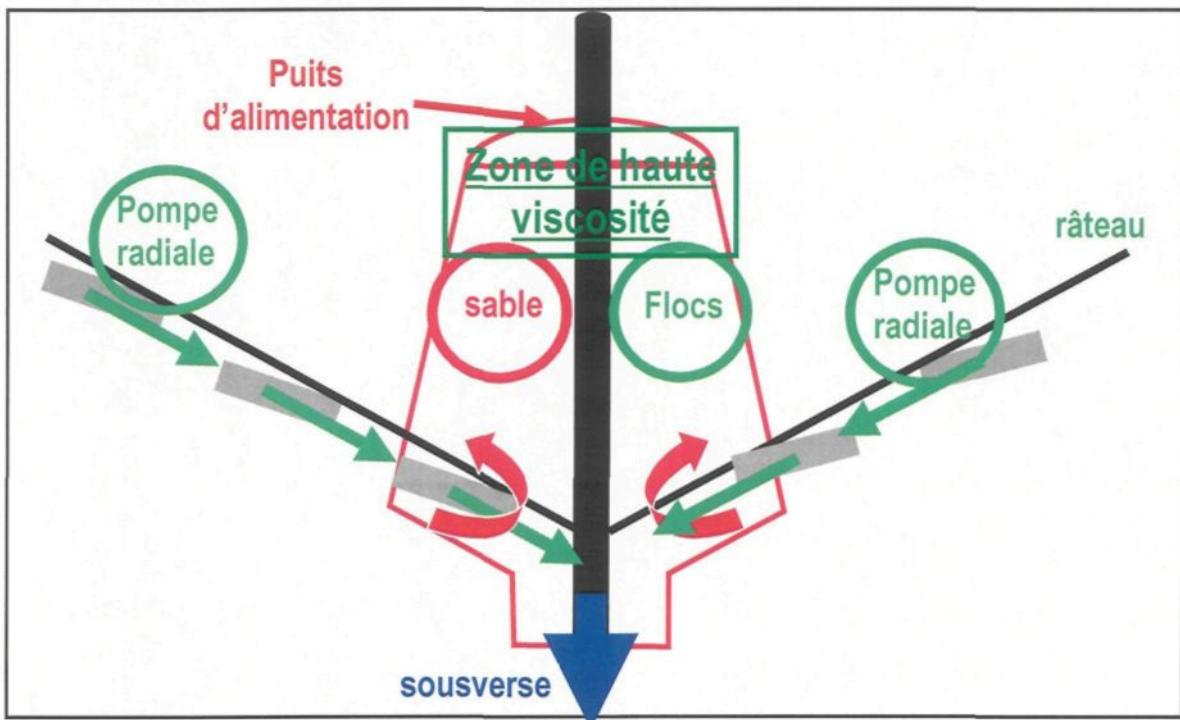


Figure 8.12 Comparaison du coefficient d'efficacité en fonction du temps pour les trois configurations de râteau.

Les résultats et les observations effectuées lors de cette étude conduisent à la conclusion qu'il faut augmenter l'espace entre les lames des râteaux pour éviter leur blocage par la boue. Il faut cependant conserver une structure assez importante pour que la surface des décanteurs soit entièrement balayée par le râteau, permettant ainsi un compactage suffisant.

### **8.3 Étude sur la formation du noyau**

La formation du noyau central, provoquant une baisse de fraction solide à la sousverse, découle de la combinaison de deux facteurs : la sédimentation rapide du sable et des gros flocs sous le puits d'alimentation (section 4.2.3), et l'action du râteau qui agit comme une pompe radiale. L'effet combiné de ces deux facteurs provoque un déséquilibre entre l'apport de matériel vers le centre et son évacuation (voir figure 8.13). L'accumulation du sable au centre du décanteur proviendrait de ce déséquilibre.



**Figure 8. 13 Illustration de la formation du noyau.**

L'objectif de la première étape de l'étude portant sur le noyau central était de reproduire et d'observer le noyau. Pour ce faire, ces tests ont été effectués avec la configuration de râteau complémentaire à 5 lames et 2 bras, et un puits centré. Tout d'abord, le décanteur est rempli de liqueur Bayer. Puis l'alimentation est mise en marche à un débit de liqueur de 8 litres par minute, avec une concentration de boue de 50 grammes par litre. Après environ deux heures, le râteau est mis en route. Lorsque le niveau de boue atteint 10 centimètres au-dessus du râteau, la sousverse est mise en marche. Comme la formation du noyau est un phénomène plus difficile à observer que l'obstruction des râteaux, la durée des expériences a été portée aux alentours de quarante-huit heures.

Les quarante-huit heures de test étant écoulées, l'alimentation, la sousverse et le râteau sont interrompus. La liqueur Bayer est ensuite retirée progressivement du décanteur. Après avoir retiré totalement la liqueur Bayer du décanteur, il a été possible d'observer pour la première fois visuellement, une masse centrale située en périphérie de l'arbre du râteau (figure 8.14 A et B). Des échantillons prélevés sur cette masse ont démontré que ce noyau solide est composé d'environ 68% de sable, apparemment cimenté avec des particules de boue floculées (figure 8.15). Ce noyau semble provenir de l'accumulation de solide, de sable et de grosses particules floculées provenant du puits d'alimentation et de l'action du râteau, qui agit comme une pompe radiale en ramenant le matériel vers le centre. Cette observation vient appuyer la théorie du chapitre 4, selon laquelle le sable et les grosses particules floculées sédimentent beaucoup plus rapidement que les petites. Puisque le sable sédimente très rapidement, il se retrouve en grande partie directement sous le puits d'alimentation, au centre du décanteur. Cette observation met aussi en évidence le fait que le sable, plus lourd que la boue, prend la place cette dernière sous le puits d'alimentation, ce qui appuie les hypothèses sur le compaction.

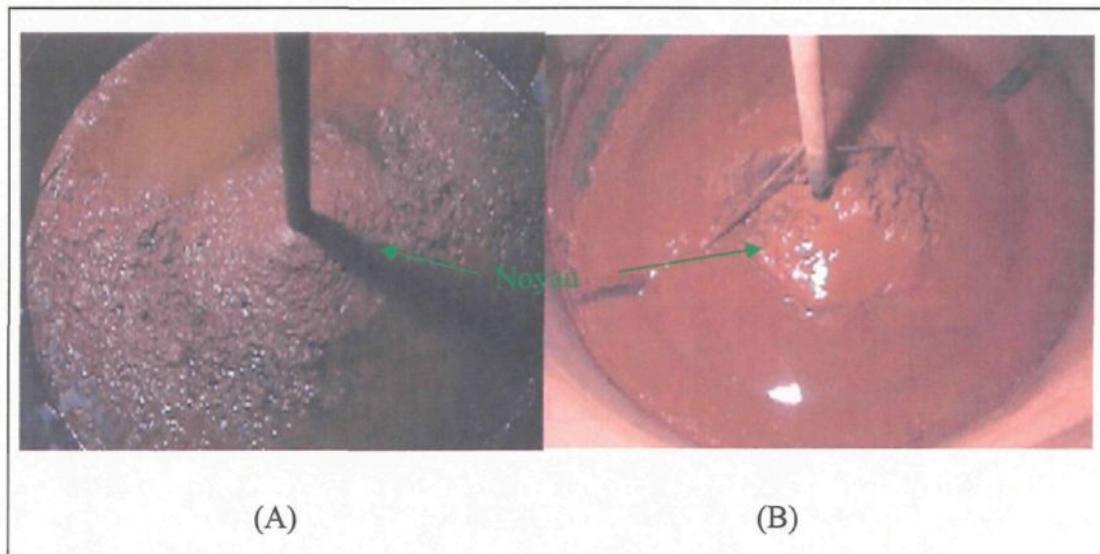


Figure 8. 14 (A), (B) Exemples de noyau.



Figure 8. 15 Intérieur du noyau.

Pour faire suite à l'observation du noyau, quelques tests ont été effectués dans le but d'étudier l'effet de l'accélération du râteau sur ce dernier. Ces tests ont donc été réalisés selon le même protocole expérimental que les tests concernant la création et l'observation du noyau. La seule différence : l'accélération du râteau pendant des périodes plus ou moins longues. Ces accélérations avaient pour objectif la destruction du noyau central, dont l'hypothèse était fondée sur l'inertie de ce dernier. Puisqu'il forme un amas possédant une masse assez importante, agglomérée sur la structure du râteau, une accélération subite du râteau devait provoquer de fortes tensions de cisaillement à l'intérieur du noyau conduisant à sa destruction progressive.

La figure 8.16 permet de comparer le couple et la fraction solide en (A), et les variations de la vitesse du râteau en (B). Les points de comparaison principaux sont désignés par les lignes orangées et les augmentations de vitesse, par les lettres de A à D. La figure 8.16 montre clairement qu'une augmentation de vitesse entraîne presque immédiatement une diminution du couple et de la fraction solide à la sousverse. L'effet de l'augmentation de la vitesse du râteau sur le couple et la sousverse dépend de l'amplitude et de la durée de l'accélération. Le point A, qui correspond à une augmentation très faible de la vitesse, induit une très légère baisse du couple et de la fraction solide. Cela démontre qu'une augmentation très faible, bien que de très longue durée, ne provoque pas de perturbation importante dans le système. Elle n'entraîne donc pas de diminution importante du couple. Les points B et C ont, quant à eux, beaucoup plus d'impact sur la fraction solide et sur le couple. Des augmentations, brèves, mais de plus de 100% de la vitesse, induisent une diminution du couple très marquée. La diminution du couple a été de l'ordre de 53%,

alors que la fraction solide est passée d'environ 68% solide à 56 % solide. Au point D, une augmentation de 100% de la vitesse de rotation du râteau pendant quelques heures a entraîné une grande perturbation de l'équilibre dans le cône. Après une telle perturbation, le couple et la fraction solide ont eu beaucoup plus de mal à reprendre leurs valeurs initiales, par rapport aux perturbations provoquées aux point A et B.

La diminution du couple lors de l'augmentation de la vitesse de rotation du râteau semble provenir de la fluidisation du lit plutôt que de la destruction du noyau. Bien que l'accélération du râteau soit considérable, la vitesse de rotation au centre du décanteur est trop faible pour briser le noyau. Ce dernier accélère légèrement avec la structure, ce qui provoque un cisaillement du lit en périphérie du noyau. Ce cisaillement facilite ensuite l'infiltration de la liqueur Bayer sous le noyau, ce qui entraîne immanquablement une diminution de la fraction solide à la sousverse. L'augmentation de la vitesse du râteau semble accélérer le processus de vieillissement du système. De plus, les diminutions de couple ne sont que temporaires; après chaque diminution, le système se stabilise à nouveau et le couple reprend très rapidement sa remontée, ce qui permet de dire que le noyau n'est pas détruit.

Ainsi, l'augmentation de la vitesse ne peut donc pas être considérée comme un paramètre valable pour l'élimination du noyau.

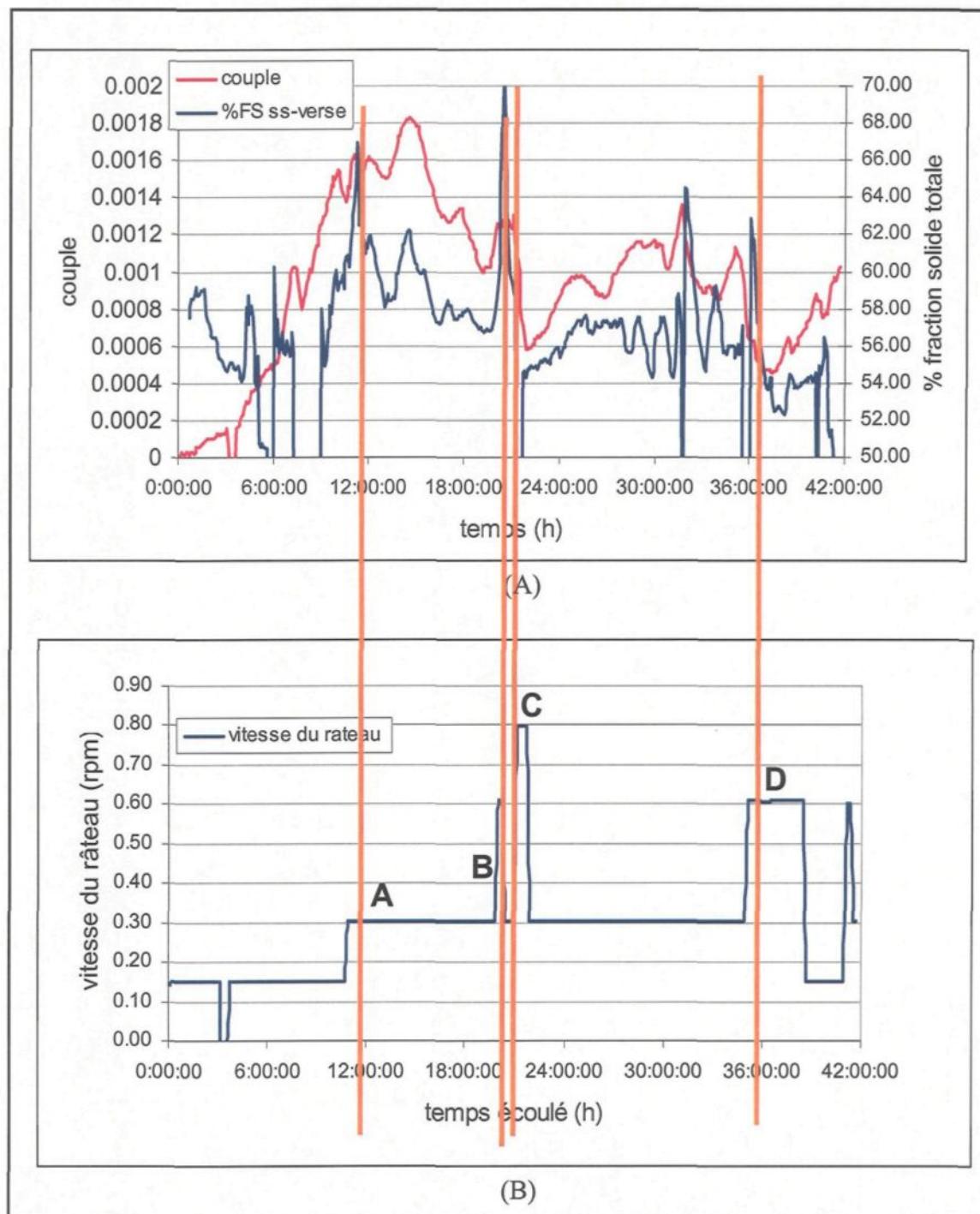


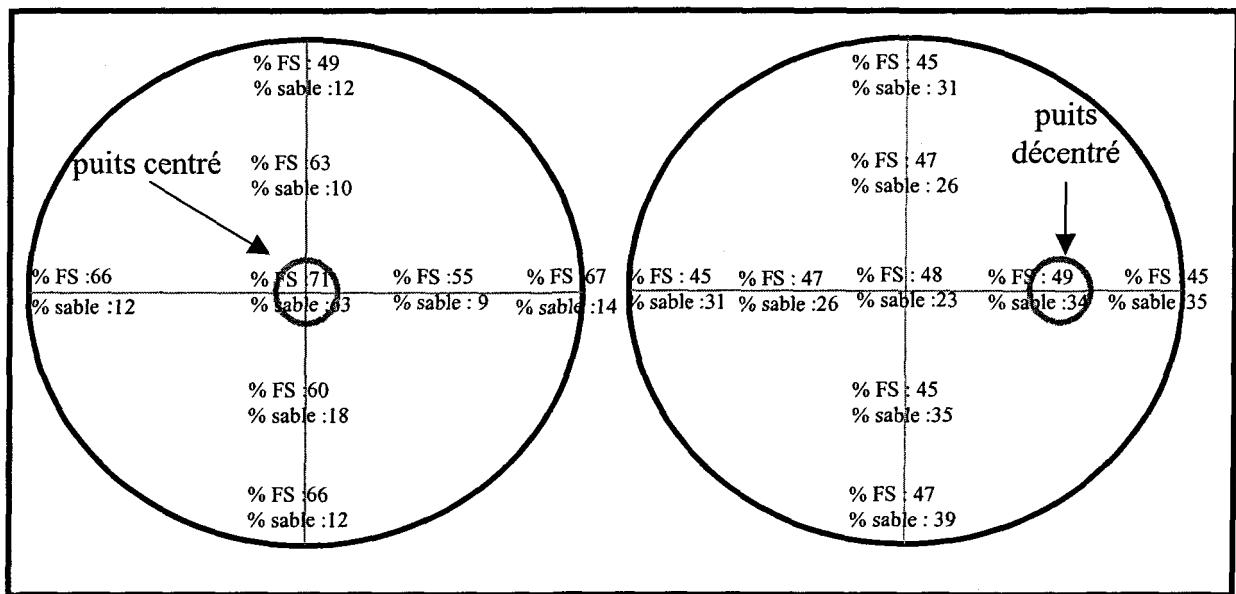
Figure 8.16 (A) Couple et %FS vs temps. (B) Vitesse râteau vs temps.

Comme il a été mentionné précédemment, l'hypothèse de la formation du noyau est basée sur un déséquilibre entre l'apport de matériel au centre et son évacuation. En diminuant l'apport direct de matériel vers le centre de façon à rétablir l'équilibre, la formation du noyau devrait théoriquement être empêchée, ou à tout le moins ralentie. Puisque deux facteurs ont été identifiés comme étant responsables de l'apport de matériel vers le centre, l'élimination ou la diminution d'un de ces facteurs devrait normalement contribuer à empêcher la création du noyau.

La principale cause de la création du noyau et des instabilités semble provenir de la très grande concentration de sable au centre du décanteur. Pour la diminuer, il faut favoriser la dilution du sable dans un volume de boue plus grand. Deux approches sont envisageables : augmenter de façon substantielle l'apport de particules de boue vers le centre, ou distribuer le sable dans tout le volume de boue du décanteur. Parce qu'il y a déjà un déséquilibre entre l'apport de matériel vers le centre et son évacuation, la seconde option est beaucoup plus prometteuse. Vu la vitesse de sédimentation du sable sous le puits d'alimentation, la meilleure façon de diluer le sable est de décentrer le puits d'alimentation et d'utiliser l'action du râteau pour le redistribuer dans tout le volume de boue du décanteur. En plus de permettre une meilleure dilution du sable et d'utiliser la boue comme matrice de support, le déplacement du puits d'alimentation en périphérie du décanteur permet de réduire l'apport direct de matériel vers le centre et, par conséquent, de favoriser l'homogénéité du lit de boue et la stabilité de la sousverse. Pour vérifier cette hypothèse, deux séries de trois tests chacune ont été effectuées avec les mêmes paramètres, à l'exception de la position du puits d'alimentation : centré pour la première série, et décentré

pour la deuxième série. Pour vérifier l'homogénéité du lit de boue, des échantillons ont été prélevés dans le lit de boue après chaque expérience.

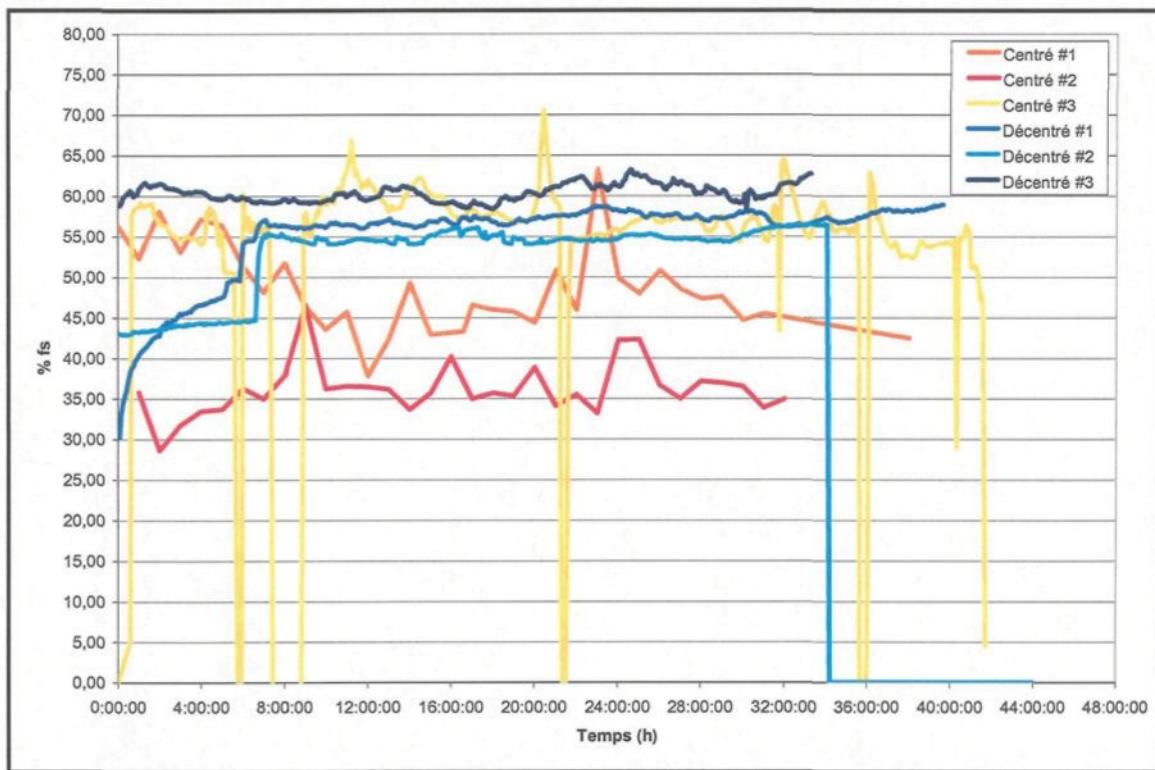
La figure 8.17 montre les distributions moyennes de la fraction solide et du pourcentage de sable à l'intérieur du décanteur pilote pour les expériences menées avec les positions de puits d'alimentation centré et décentré. Les échantillons obtenus montrent de façon évidente que le puits décentré améliore grandement la dispersion du sable et l'homogénéité du lit de boue. Cette amélioration devrait se traduire par une augmentation de la stabilité à la sousverse et par une diminution des blocages de cette dernière causés par des amas de sable qui s'accumulent au centre du décanteur pilote.



**Figure 8.17 Distribution du sable et de la fraction solide pour le puits centré et décentré avec une alimentation en sable de 28%.**

Pour vérifier si le décentrage du puits d'alimentation améliore la stabilité à la sousverse du décanteur pilote, des échantillons de sousverse ont été analysés durant chacune des six expériences.

La figure 8.18 montre les fluctuations du pourcentage solide à la sousverse du décanteur pilote pour les six différents tests. Ce graphique permet de voir que les tests effectués avec le puits décentré sont beaucoup plus stables que ceux avec le puits centré. En effet, les fluctuations pour les trois courbes des puits décentrées sont extrêmement faibles par rapport aux fluctuations que montrent les courbes des puits centrés. Il est à noter que les valeurs de fraction solide égales à zéro, pour la courbe #3 avec puits centré, correspondent à des arrêts du système causés par un blocage. Notons encore que l'expérience #2 avec le puits décentré a duré 44 heures et que la chute de fraction solide après 35 heures, correspond à une perte de données causée par un bris informatique.

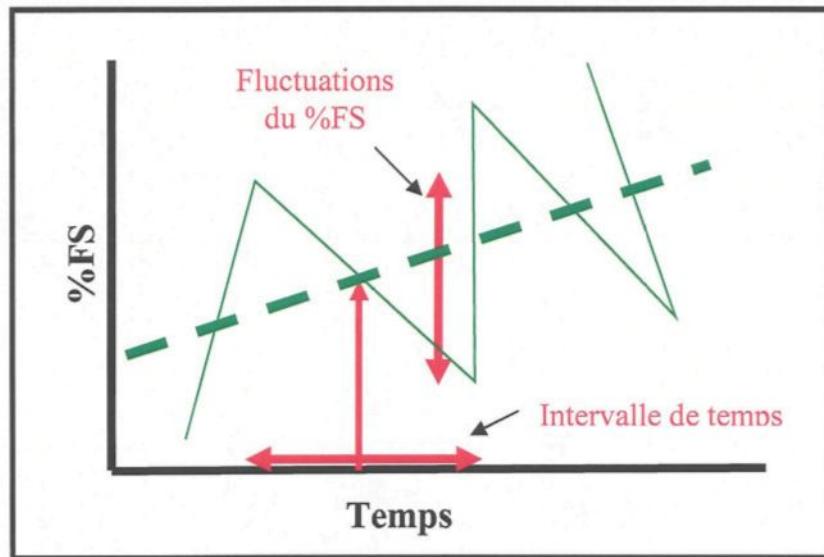


**Figure 8. 18 Comparaison entre les pourcentages fraction solide à la sousverse pour différentes expériences.**

Bien que la figure 8.18 montre de façon très claire que le puits décentré améliore grandement la stabilité de la sousverse du décanteur pilote, il est intéressant de mesurer quantitativement cette amélioration. C'est pourquoi un indice de stabilité  $I_{\%FS}$  a été défini. Cet indice est donné par l'équation 8.3 :

$$I_{\%FS} = \frac{1}{2} \frac{\sum_i \frac{| \%FS_{i+1} - \%FS_i |}{(\%FS_{i+1} - \%FS_i)/2} \Delta t_i}{\sum_j \Delta t_j} \quad (8.3)$$

Cet indice de stabilité se définit comme étant la moyenne, dans chaque intervalle de temps, de l'amplitude de l'instabilité du pourcentage de fraction solide par rapport à la moyenne du pourcentage de fraction solide. La figure 8.19 illustre le calcul.



**Figure 8. 19 Illustration du calcul de l'indice d'instabilité.**

Le tableau 8.1 présente les paramètres importants pour les six différentes expériences en fonction de leurs indices d'instabilité. Le pourcentage d'arrêt correspond au pourcentage de temps d'arrêt causé par les blocages par rapport à la durée totale de l'expérience. Ce tableau démontre que la configuration de puits décentré est environ 10 fois plus stable que la configuration de puits centré, et qu'aucun arrêt n'a eu lieu avec cette configuration.

**Tableau 8. 1 Indice d'instabilité et % d'arrêt pour les six expériences.**

Configuration	Date	Indice d'instabilité, $I$	% sable	%FS moyen	% arrêt
Décentré #3	0523-25	0,00262	27	60	0
Décentré #1	0425-27	0,00278	15	55	0
Décentré #2	0509-11	0,004	12	55	0
Centré #1	0207-09	0,01	26	55	1+
Centré #3	0411-13	0,043	22	55	5+
Centré #2	0221-23	0,12	19	49	16+

À la fin de chaque expérience, la liqueur Bayer a été retirée progressivement pour permettre l'observation du lit de boue. Ces observations ont permis de vérifier visuellement l'homogénéité du lit et de confirmer la présence ou l'absence de noyau. Dans tous les cas de puits centré, le lit de boue est non homogène. Parce que les gros flocs et le sable se retrouvent au centre et que les plus petits flocs se retrouvent en périphérie du décanteur. De cette ségrégation des particules résulte un lit de boue fluide sur les bords du décanteur, qui devient de plus en plus visqueux vers le centre. Dans chacune des expériences avec une configuration de puits centrée, des noyaux ont été observés. Dans les cas des configurations à puits décentrées, c'est tout à fait l'opposé. En effet, le lit de boue est très homogène dans l'ensemble du décanteur. Les gros flocs, contenant plus de floculant, sont mieux distribués suivant le rayon du décanteur et contribue à la formation d'un lit de boue plus visqueux qui

sert de matrice de support aux particules de sable. Cette matrice, en déplacement constant vers le centre, empêche l'accumulation de sable sous le puits d'alimentation et au-dessus du puits de décharge, ce qui se traduit par une l'élimination des arrêts dus aux blocages. Avec la configuration du puits décentré, aucun noyau n'a été observé.

Au moment d'écrire ces lignes, des essais de puits décentrés ont été effectués dans un décanteur industriel et les résultats sont tout à fait concluants. Le décentrage du puits a contribué de façon significative à l'augmentation de la stabilité de la sousverse. Cette stabilité a permis d'augmenter le niveau de boue à l'intérieur du décanteur et, par conséquent, la fraction solide à la sousverse. L'augmentation du niveau de boue s'est traduit par une diminution de l'entartrement des structures du râteau non submergées et a permis d'augmenter de façon significative la durée d'opération du décanteur.

## Conclusion

Les premiers tests effectués ont permis d'observer le déplacement de la boue rouge par traçage thermique. Ces tests, réalisés en fournée, ont démontré clairement l'action du râteau à 5 lames et 1 bras à l'intérieur du décanteur. Celui-ci déplace, en quelques tours seulement, la boue non floqué, de la périphérie au centre du décanteur.

De plus, les tests effectués avec et sans flocculation ont aussi permis d'observer l'influence du flocculant sur la viscosité de la boue. En plus d'augmenter la vitesse de sédimentation de la boue, le flocculant augmente de façon très importante la force des liens interparticulaires de la boue rouge, ce qui augmente considérablement la viscosité. Cette augmentation de viscosité provoque un changement de comportement de la boue. La boue floqué agit comme une matrice pour les particules de sable, les retenant en suspension à plus ou moins long terme selon leur taille et selon sa viscosité. Le mélange de particules fines et de sable devient très compact et visqueux.

Les tests avec les trois différentes configurations de râteau ont permis d'observer l'obstruction des espaces entre les lames du râteau de configuration originale à 5 lames et 1 bras. Ces tests ont aussi permis de prouver que l'augmentation de l'espace entre les lames du râteau diminue de façon significative leur obstruction. De plus, ces tests ont mis en évidence l'importance du râteau dans le compactage de boue. En effet, les résultats obtenus avec le râteau à 3 lames et 1 bras ont clairement démontré qu'un râteau efficace doit

posséder une certaine quantité de lames pour permettre un balayage complet de la surface du décanteur et, par le fait même, effectuer un travail de compactage de la boue suffisant.

Ces tests ont permis de déterminer que le râteau le plus efficace doit couvrir toute la surface du décanteur, mais doit posséder des espaces entre les lames assez grands pour éviter qu'ils ne soient obstrués. La configuration ayant obtenu les meilleurs résultats lors des essais est la configuration complémentaire à 5 lames et 2 bras.

Les tests portant sur le décentrage du puits d'alimentation ont d'abord permis de déterminer la cause principale de la formation du noyau central : un trop grand de débit de matière au centre du décanteur. En effet, le sable et les gros flocs sédimentent très directement sous le puits d'alimentation qui est situé, au centre du décanteur, juste au-dessus du puits de décharge. Cet apport majeur en sable cause un problème puisque le sable s'accumule au centre du décanteur et qu'il remplace progressivement les particules de boue plus légères. Additionné au surplus de floculant contenu dans les gros flocs, ce phénomène se traduit, après un certains temps, par la création d'un noyau solide qui finit par provoquer des instabilités à la sousverse du décanteur. Les tests effectués ont montré que le décentrage du puits d'alimentation permet d'éliminer ce problème. En effet, le décentrage du puits d'alimentation permet une meilleure répartition du sable et permet au lit de boue flokulée, relativement visqueux, de servir de matrice de support pour le sable. Cette dilution, combinée à l'action du râteau, permet d'obtenir un lit de boue très homogène et une sousverse beaucoup plus stable.

Ce mémoire avait pour objectif de comparer différentes configurations de râteaux tout en augmentant de façon significative la compréhension du système de décantation en

usine. Des travaux plus poussés sur le compactage seront entrepris à la suite de ce travail. Afin d'expliquer les différents phénomènes moléculaires et physiques qui s'y produisent de façon plus fondamentale.

## Bibliographie

- [1] Baggatto P.F., Puxley, D.L., «Method of and apparatus for thickening red muds derived from bauxite and similar slurries», Alcan International Limited, US Patent no 4,830,507, 1989
- [2] Baggatto P.F., al., «Process for decantation of suspensions», Alcan International Limited, US Patent no 5,080,803, 1992
- [3] Biggs, S., Habgood, M., Jameson, G. J., Yan, Y., «Aggregate structures formed via a bridging flocculation mechanism», vol. 80 (1-3), Conference on Solid-Liquid Separation Systems: special issue, 2000, p. 13-22.
- [4] Boivin, Alain., «Les jauge de déformation », Université du Québec à Chicoutimi, Techniques avancées de mesure thermique, 6DIG964, hiver 2000, 36 pages.
- [5] Brodkey, R.S., Hershey, H.C., «Transport Phenomena, A united approach », New York, McGraw-Hill, 1988, 847 pages.
- [6] Buscall, R., White, L.R., «The Consolidation of Concentrated Suspensions», Journal of Chemical Society, Faraday Translation 1, 1987, 83, 873-891.

- [7] Caouette, Gaudreault., « Le procédé Bayer, partie 2 » Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, 1979, 87 pages.
- [8] Chapman, D.D., Phil. Mag., 11, 425, 1906
- [9] Couillard,D., Pednault, M., « Utilisation des boues rouges, résidus de la fabrication de l'alumine par le procédé Bayer », INRS-Eau, Rapport scientifique No 42,Université du Québec, Sainte-Foy, 1974, 61 pages.
- [10] Endress+Hauser, « promass 63, Mass Flow Measuring System, Operating manual», États-Unis, 2000, 150 pages.
- [11] Ferland, P., Tremblay, L., Doucet, J., «Process and Apparatus for Controlling Gravity Settling System», Alcan International Limited, 1997, US Patent no 5,616,831.
- [12] Forbes, D. L., «Theorie of flocculation», Copyright WET, Inc., 2000, 8p.
- [13] Gagnon, M.J., Simard, G., Charrette, A., Péloquin, G., « Characterization of Red Mud Aggregate Populations Under Shear Conditions», Proc. Of International Symposium on Ligths Metals, Éditeurs M.Sahoo et T. Lewis, Toronto, 2001, pp.155-166

- [14] Gagnon, M.J., Simard, G., Normandin, M., Peloquin, G., « Behavior of Red Mud Agglomerated with Various Flocculants Under Shear Conditions », Ligths Metals, 2002, pp.107-114
- [15] Glover, S. M., Yan, Y. D., Jameson, G. J., Biggs, S., « Polymer Molecular Weight and Mixing Effects on Floc Compressibility and Filterability », 6<sup>e</sup> World Congress of Chemical Engineering Melbourne, Centre for Multiphase Processes, University of New Castle, Callaghan, Australia, 2001.
- [16] Gouy, G.J., J. Physique, 7, 129, 1910.
- [17] Gouy, G.J., Annls Phys, 7, 129, 1924.
- [18] Grossiord, J.-L., Couarraze, G., « Initiation à la rhéologie », Paris, Editions TEC & DOC, 3<sup>e</sup> édition, 2000, 300 pages.
- [19] Guth, E., Simha, R., Kolloïd Z., 74, 226, 1936
- [20] Holland, F.A., « Fluid flow for Chemical Engineers », New York, Chemical Publishing CO. Inc., 1973, 269 pages.

- [21] Hunter R.J.; Crispo, S.; Smith-Palmer, T., The flocculation of kaolin by cationic polyacrylamides and the effect of cationic surfactant on this process, vol. 83 (11), Journal of applied polymer science, 1991, p. 2382-2389.
- [22] Hydroqual,Inc., «Application guide for CMA-HYDROQUAL chemical fate models », No. CMAS0022, New Jersey, Hydroqual Inc., mai 1982, 300 pages.
- [23] Iiada, F., Stewart, F., Puxley, D.L., «Pressure Decanter», Alcan International Limited, 1995, US Patent no. 5,407,561.
- [24] INGÉNIEURS DU GROUPE PECHINEY, «L'aluminium », Tome 1, Éditions Eyrolles, Paris, 1964, 939 pages.
- [25] Laurier, J., «Le procédé Bayer, partie 1 » Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, 1979, 91 pages.
- [26] Murphy, C.H., «Handbook of particle sampling and analysis methods », Floride, Verlag Chem. International Inc., 1984, 354 pages.
- [27] Omega, «The pressure strain and force handbook », Stamford, Omega Engineering Inc., volume MM, 2<sup>e</sup> édition, 2000

- [28] Omega, « The temperature », Stamford, Omega Engineering Inc., volume MM, 2<sup>e</sup> édition, 2000
- [29] Osipow, L. I., « Surface chemistry », New York, Reinhold, 1963
- [30] Paradis, R., Puxley, D.L., « Transfert of shear-thinning slurries », Alcan International Limited, 2002, US Patent no 6,340,033.
- [31] Paraschivoiu, I., Prud'homme, M., Robillard, L., Vasseur, P., « Mécanique des Fluides », Montréal, Presses Internationales Polytechniques, première édition, 2003, 450 pages.
- [32] Péloquin, G., « Modélisation Mathématique de la Décantation de Boue Rouge », Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Février 2003, 239 pages.
- [33] Queensland Alumina, « A Flow Chart Process », Queensland Alumina Limited, Gladstone, Australia, 2002
- [34] Queensland Alumina, « The Alumina Production Process », Queensland Alumina Limited, Gladstone, Australia, 2002

- [35] Rousseau, R.W., « Handbook of separation process technology », New York, John Wiley & Sons, 1987, 1010 pages
- [36] Rushton, A., Ward, A.S., Holdich, R.G., 2000, Solid-Liquid Filtration and Separation Technology, 2<sup>ième</sup> édition, Wiley-VCH, République fédérale d'Allemagne, 587 p.
- [37] Scales, P., De Krester, R., « Washer/Settler Performance Characterisation Some thoughts. », Particulate Fluids Processing Centre, Dept. of Chemical Engineering, University of Melbourne, Melbourne, Australia,
- [38] Scott, K.J., « Trans.I.M.M. », 77, 1968, 186 pages
- [39] Scott, K.J., « Experimental study of continuous thickening of flocculated silicate slurry », Ind. Eng. Chem. Fund., 7, 582, 1979
- [40] Shook,C.A. et Roco, M.C., « Slurry Flow, Principles and Practice », Boston, Butterworth-Heinemann, 1991, 322 pages
- [41] Somasundaran, P., « Fine Particule Process, volume 2 », Baltimore, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. 1980, 1865 pages

- [42] Sutalo, I.D., Paterson, D., Rudman, M., «Flow visualisation and computational prediction in thickener rake model», Thermal and Fluids Engineering, CSIRO, Minerals Engineering, Vol.16, no.2 , 2003, p.93-102
- [43] Svarovsky, Ladislav. « Solid-Liquid Separation », Chemical Engineering Series, London, Éditions Butterwoths, 1977, 333 pages.
- [44] Verwey, E. J. et Overbeck, J. Th. G., « Theory of the stability of lyophobic colloids », New York, Elsevier, 1948
- [45] White, F.M., « Fluid Mechanics », Princeton, McGraw-Hill, third edition, 1994, 736 pages.
- [46] Zazubin, A.I., Barshchevskayz, A.N., Potapova, G.M., « Complex Reprocessing of redmud », Tr. Inst. Met., Russie, Obogashch, Akad. Nauk Kaz., SSR 25, 3-7, 1967