



Maîtrise en Ingénierie

Département des sciences appliquées

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la Maîtrise en Ingénierie

Étude sur la clarté d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer à l'aide d'un appareil de Couette

Par :

Marie-Louise Bouchard

Date :

Été 2006,
Le 25 Août 2006



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.

RÉSUMÉ

L'alumine est extraite de la bauxite grâce au procédé Bayer. Au cours de l'étape de décantation de ce procédé, les particules de boues rouges sont séparées de la liqueur contenant l'aluminate par des agents de flocculation. Ces agents permettent l'agglomération des particules en agrégats plus volumineux, qui sédimentent plus rapidement, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité de l'étape de séparation solide/liquide. Cependant, les méthodes actuelles de flocculation ne permettent pas d'éliminer complètement les matières particulières présentes dans la liqueur surnageante. Conséquemment, une étape de filtration est nécessaire pour réduire la quantité de matières particulières en suspension à une concentration d'environ 10 mg/L.

Ce mémoire présente une étude effectuée dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie de l'Université du Québec à Chicoutimi, portant sur les principales variables susceptibles d'améliorer la clarté d'une suspension de boues rouges par flocculation. Les variables à l'étude sont le type d'agents de flocculation, la séquence d'injection des agents ainsi que le niveau et la durée d'agitation appliqués à la suspension flokulée. Ce travail de recherche a été effectué en collaboration avec le Groupe de Recherche Universitaire de Séparation Solide/Liquide (GRUSSL) et le Centre de Recherche et de Développement Arvida (CRDA). L'objectif principal de cette étude consiste à effectuer des essais de flocculation en changeant les variables afin d'établir les conditions optimales de séparation solide/liquide, et ainsi réduire la quantité de matières particulières en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à celui retrouvé en usine. Un montage expérimental, basé sur

la géométrie Couette, a été élaboré afin de permettre l'étude en continu de la flocculation et de déterminer les conditions optimales d'utilisation des agents de flocculation.

Les essais de flocculation ont été réalisés sous des conditions généralement retrouvées dans les circuits de lavage du procédé Bayer. Les résultats obtenus ont démontré que les conditions d'agitation requises pour obtenir une turbidité minimale dépendent de la nature du polymère et/ou des agents de flocculation. L'emploi de mélanges doubles de polymère et/ou d'agents de flocculation, utilisé sous des conditions d'agitation optimales, permet d'obtenir des niveaux de turbidité exceptionnellement bas. En effet, l'utilisation d'une double addition de polymère a permis de réduire la turbidité résiduelle de la surverse d'environ 47%, comparativement à une simple addition de polymère. Néanmoins, les niveaux de turbidité les plus bas ont été obtenus par des doubles additions d'agents de flocculation. Le meilleur résultat de turbidité obtenu est 12 NTU et correspond à une concentration en matières particulaires de 6 mg/L. Par conséquent, le mélange d'agents de flocculation est très efficace puisqu'il permet d'obtenir des concentrations inférieures à celles obtenues en usine après filtration. L'efficacité des mélanges doubles résulte probablement d'interactions entre les polymères et/ou les agents de flocculation.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier Michel J. Gagnon, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et directeur du présent projet de maîtrise, pour son aide, ses conseils et ses explications sur les différents domaines reliés à la flocculation.

Merci aussi à tous les membres du groupe universitaire GRUSSL (Groupe de Recherche Universitaire en Séparation Solide/Liquide) ; techniciens, chercheurs et professeurs pour leurs supports dans la réalisation de ce projet.

L'auteur remercie également la société Alcan International Limitée, CRDA (Centre de Recherche et de Développement Arvida) pour son support financier.

L'auteur tient également à adresser un remerciement tout particulier à François Girard, technicien à l'université du Québec à Chicoutimi (GRUSSL) pour sa contribution au cours des travaux expérimentaux.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE 1 | 1 |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 <i>La problématique</i> | 1 |
| 1.2 <i>Les objectifs</i> | 5 |
| 1.3 <i>Travaux antérieurs et aspects originaux de la recherche</i> | 6 |
| 1.3.1 <i>La flocculation</i> | 6 |
| 1.3.2 <i>La géométrie du système Couette</i> | 10 |
| CHAPITRE 2 | 16 |
| LE PROCÉDÉ BAYER | 16 |
| 2.1 <i>La bauxite</i> | 16 |
| 2.2 <i>Le procédé Bayer</i> | 18 |
| 2.2.1 <i>Broyage de la bauxite</i> | 18 |
| 2.2.2 <i>Mélange</i> | 19 |
| 2.2.3 <i>Digestion</i> | 20 |
| 2.2.4 <i>Séparation solide/liquide</i> | 23 |
| 2.2.5 <i>TraITEMENT des boues rouges</i> | 24 |
| 2.2.6 <i>Filtration</i> | 25 |
| 2.2.7 <i>Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium</i> | 26 |
| 2.2.8 <i>Calcination et traitement du produit</i> | 29 |
| CHAPITRE 3 | 30 |
| LES PROCÉDÉS DE SÉPARATION SOLIDE/LIQUIDE | 30 |
| 3.1 <i>La sédimentation</i> | 30 |
| 3.1.1 <i>Sédimentation diluée</i> | 32 |
| 3.1.2 <i>Sédimentation par flocculation</i> | 36 |
| 3.1.3 <i>Sédimentation retardée</i> | 37 |
| 3.2 <i>Les techniques de traitement préliminaire</i> | 40 |
| 3.2.1 <i>Stabilité des suspensions colloïdales</i> | 40 |
| 3.2.2 <i>Théorie de la double couche</i> | 43 |
| 3.2.2.1 <i>Potentiels Zéta et Nernst</i> | 46 |
| 3.2.3 <i>Agrégation</i> | 48 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.3.1 Agrégation par mouvement brownien | 48 |
| 3.2.3.2 Agrégation par gradient de vitesse..... | 49 |
| 3.2.3.2.1 Régime laminaire..... | 50 |
| 3.2.3.2.2 Régime turbulent..... | 50 |
| 3.2.4 La coagulation..... | 51 |
| 3.2.4.1 Coagulation électrostatique (compression de la double couche)..... | 52 |
| 3.2.4.2 Coagulation par adsorption (neutralisation de charge) | 52 |
| 3.2.4.3 Coagulation par entraînement..... | 53 |
| 3.2.5 La floculation | 53 |
| 3.2.5.1 Neutralisation de charge | 55 |
| 3.2.5.2 Pontage inter-particulaire..... | 55 |
| 3.2.5.3 Étapes de réaction de la floculation | 56 |
| 3.2.5.4 Facteurs influençant la floculation..... | 57 |
| 3.2.5.4.1 Floculation dans le procédé Bayer..... | 58 |
| CHAPITRE 4 | 60 |
| MÉTHODES D'AGITATION DES SUSPENSIONS FLOCULÉES..... | 60 |
| <i>4.1 Rappels théoriques.....</i> | <i>61</i> |
| 4.1.1 Loi fondamentale | 61 |
| 4.1.1.1 Contrainte de cisaillement | 61 |
| 4.1.1.2 Gradient de vitesse ou taux de déformation..... | 61 |
| 4.1.1.3 Viscosité..... | 63 |
| 4.1.2 Type de fluide | 63 |
| 4.1.2.1 Fluide newtonien..... | 63 |
| 4.1.2.2 Fluide non newtonien..... | 64 |
| 4.1.2.3 Propriétés physiques du milieu..... | 65 |
| 4.1.2.3.1 Liqueur Bayer | 65 |
| 4.1.2.3.2 Boues rouges | 66 |
| 4.2 Appareil de Couette | 66 |
| 4.2.1 Hypothèse de la couche limite | 67 |
| 4.2.2 Écoulement entre deux plaques | 68 |
| 4.2.3 Écoulement entre deux cylindres coaxiaux | 71 |
| 4.2.4 Instabilités du système Couette..... | 76 |
| 4.2.4.1 Écoulement et instabilités de Taylor..... | 78 |
| 4.2.4.2 Profil de vitesse et instabilités de Taylor | 80 |
| 4.2.4.3 Propriétés de mélange de l'appareil Couette | 81 |
| 4.2.4.4 Appareil Couette du présent projet | 82 |
| 4.2.4.5 Calcul du gradient de vitesse dans une géométrie Couette | 83 |
| 4.2.4.6 Calcul de la contrainte de cisaillement dans une géométrie Couette..... | 84 |
| 4.3 Agitation dans une conduite | 85 |
| 4.3.1 Écoulement dans une conduite droite | 85 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.1.1 Gradient de vitesse dans une conduite droite..... | 86 |
| 4.3.1.2 Floculation dans une conduite droite | 88 |
| 4.3.2 Écoulement dans une conduite torsadée | 88 |
| CHAPITRE 5 | 91 |
| MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE..... | |
| <i>5.1 Principe de fonctionnement</i> | <i>91</i> |
| <i>5.2 Montage expérimental</i> | <i>92</i> |
| 5.2.1 Appareil Couette | 92 |
| 5.2.2 Réervoir de sédimentation..... | 94 |
| <i>5.3 Protocole expérimental.....</i> | <i>95</i> |
| <i>5.4 Variables du système Couette</i> | <i>98</i> |
| 5.4.1 Polymères et produits polymériques | 98 |
| 5.4.2 Concentration des solutions de polymère et produits polymériques | 99 |
| 5.4.3 Dosage | 99 |
| 5.4.4 Séquence d'injection des polymères et/ou produits polymériques | 100 |
| 5.4.5 Niveau d'injection..... | 100 |
| 5.4.5.1 Injection dans le Couette..... | 100 |
| 5.4.5.2 Injection dans les conduites torsadées | 102 |
| 5.4.6 Variation du niveau d'agitation (rpm) | 103 |
| <i>5.5 Paramètres</i> | <i>103</i> |
| 5.5.1 Concentration de la liqueur Bayer | 103 |
| 5.5.2 Concentration de la suspension de boues rouges..... | 104 |
| 5.5.3 Débit d'alimentation de la suspension de boues rouges | 105 |
| <i>5.6 Mesures</i> | <i>105</i> |
| 5.6.1 Turbidité..... | 105 |
| 5.6.2 Quantité de matières en suspension retenue par filtration | 106 |
| 5.6.3 Filtrabilité..... | 107 |
| 5.6.4 Concentration en matières particulières du sédiment | 108 |
| 5.6.5 Vitesse de sédimentation | 109 |
| <i>5.7 Reproductibilité de la méthode</i> | <i>110</i> |
| CHAPITRE 6 | 114 |
| RÉSULTATS ET DISCUSSION | |
| <i>6.1 Simple addition de polymère A</i> | <i>114</i> |
| 6.1.1 Test du cylindre | 114 |
| 6.1.2 Niveau et durée d'agitation dans le système Couette | 118 |
| 6.1.2.1 Injection dans le Couette..... | 119 |

| | |
|--|-----|
| 6.1.2.2 Injection dans les conduites torsadées | 123 |
| 6.1.3 Variation du dosage dans le système Couette..... | 128 |
| 6.1.3.1 Hauteur moyenne de la couche de sédiment..... | 130 |
| 6.1.4 Type de boue..... | 131 |
| 6.2 <i>Simple addition de polymère B</i> | 134 |
| 6.2.1 Test du cylindre | 134 |
| 6.2.2 Niveau et durée d'agitation dans le système Couette | 136 |
| 6.2.2.1 Injection dans le Couette..... | 136 |
| 6.2.2.2 Injection dans les conduites torsadées | 141 |
| 6.2.3 Variation du dosage dans le système Couette..... | 145 |
| 6.2.3.1 Hauteur moyenne de la couche de sédiment..... | 146 |
| 6.3 <i>Double addition d'un mélange de polymère</i> | 148 |
| 6.3.1 Test du cylindre | 148 |
| 6.3.2 Double addition dans le système Couette | 151 |
| 6.3.2.1 Proportion de mélange idéale dans le système Couette..... | 152 |
| 6.3.2.1.1 Hauteur moyenne de la couche de sédiment..... | 155 |
| 6.3.2.1.2 Vitesse moyenne de sédimentation des particules | 156 |
| 6.3.2.2 Séquence d'injection optimale dans le système Couette | 156 |
| 6.3.2.3 Niveau d'agitation optimal dans le système Couette..... | 158 |
| 6.4 <i>Agent de flocculation D</i> | 161 |
| 6.4.1 Test du cylindre | 161 |
| 6.4.1.1 Simple addition de l'agent D | 161 |
| 6.4.1.2 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation | 162 |
| 6.4.1.3 Triple addition d'un mélange d'agents de flocculation | 163 |
| 6.4.2 Simple addition dans le système Couette | 165 |
| 6.4.3 Double addition dans le système Couette | 165 |
| 6.4.3.1 Dosage idéal du mélange double DA | 166 |
| 6.4.3.2 Séquence d'injection optimale du mélange double DA..... | 168 |
| 6.4.3.3 Niveau d'agitation optimal du mélange double DA | 171 |
| 6.4.4 Triple addition dans le système Couette | 174 |
| 6.5 <i>Agent de flocculation I</i> | 176 |
| 6.5.1 Test du cylindre | 176 |
| 6.5.1.1 Simple addition de l'agent I..... | 176 |
| 6.5.1.2 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation | 176 |
| 6.5.1.3 Triple addition d'un mélange d'agents de flocculation | 178 |
| 6.5.2 Simple addition dans le système Couette | 180 |
| 6.5.3 Double addition dans le système Couette | 180 |
| 6.5.3.1 Séquence d'injection optimale d'un mélange double IA | 181 |
| 6.5.3.2 Niveau d'agitation optimal du mélange double IA..... | 183 |
| 6.5.3.3 Dosage idéal du mélange double IA | 185 |
| 6.5.3.4 Concentration en matières particulières de la suspension de boues rouges | 187 |
| 6.5.3.5 Essai longue durée | 189 |
| 6.5.4 Triple addition dans le système Couette | 191 |

| | |
|---|------------|
| 6.6 Synthèse | 193 |
| 6.6.1 Turbidité..... | 193 |
| 6.6.1.1 Simple addition de polymère | 193 |
| 6.6.1.2 Double addition de polymère..... | 195 |
| 6.6.1.3 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation | 195 |
| 6.6.2 Vitesse de sédimentation | 196 |
| 6.6.2.1 Simple addition de polymère | 196 |
| 6.6.2.2 Double addition de polymère..... | 197 |
| 6.6.2.3 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation | 198 |
| 6.6.3 Hauteur de la couche de sédiment | 199 |
| 6.6.3.1 Simple addition de polymère | 199 |
| 6.6.3.2 Double addition de polymère..... | 199 |
| 6.6.3.3 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation | 199 |
| 6.6.4 Concentration en matières particulaires de la surverse..... | 200 |
| CONCLUSION | 201 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 207 |
| LISTE DES SYMBOLES..... | 214 |
| ANNEXE A..... | 218 |
| RAPPELS MATHÉMATIQUES..... | 218 |
| A.1 Vitesse et accélération..... | 218 |
| A.2 Vitesse angulaire | 219 |
| A.2.1 Rotationnel..... | 220 |
| A.2.2 Vorticité | 220 |
| A.3 Équation de continuité..... | 222 |
| A.3.1 Équations de continuité en coordonnées cylindriques | 224 |
| A.4 Équation de quantité de mouvement | 225 |
| A.4.1 Détermination des forces de surface et de corps..... | 228 |
| A.4.2 Équation de quantité de mouvement en coordonnées cylindriques | 230 |
| ANNEXE B | 232 |
| PRÉPARATION DES SOLUTIONS..... | 232 |
| B.1 Préparation de la liqueur Bayer | 232 |

| | |
|---|------------|
| <i>B.1.1 Utilisation de la liqueur Bayer</i> | 233 |
| <i>B.2 Préparation de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer</i> | 233 |
| <i>B.3 Préparation des solutions de polymère</i> | 234 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 - Le procédé Bayer | 2 |
| Figure 1.2 - Copolymère d'acrylamide et d'acrylate de sodium | 7 |
| Figure 1.3 - Schématisation de l'effet du pH sur la configuration du polymère | 8 |
| Figure 1.4 - Structure des agrégats | 9 |
| Figure 2.1 - La bauxite..... | 17 |
| Figure 2.2 - Schéma typique d'une unité de broyage | 19 |
| Figure 2.3 - Schéma du mélange de bauxite, de chaux et de liqueur usée | 20 |
| Figure 2.4 - Schéma de la digestion..... | 21 |
| Figure 2.5 - Schéma de la séparation solide/liquide | 23 |
| Figure 2.6 - Schéma de l'étape de filtration..... | 26 |
| Figure 2.7 - Schéma détaillé de l'étape de précipitation..... | 28 |
| Figure 3.1 - Forces influençant la vitesse de sédimentation d'une particule | 32 |
| Figure 3.2 - Schéma des phases de sédimentation en test du cylindre | 38 |
| Figure 3.3 - Rencontre de deux particules de même signe | 42 |
| Figure 3.4 - Stabilité d'une suspension colloïdale | 43 |
| Figure 3.5 - Théorie de la double couche | 44 |
| Figure 3.6 - Schématisation de la double couche | 45 |
| Figure 3.7 - Schématisation de la variation du potentiel en fonction de l'emplacement autour de la particule..... | 47 |
| Figure 3.8 - Mécanismes de collision des particules | 48 |
| Figure 3.9 - Floculation par pontage et par mosaïque | 54 |
| Figure 3.10 - Ponts entre particules | 56 |
| Figure 3.11 - Étapes de la floculation | 57 |
| Figure 3.12 - Représentation schématique du mécanisme d'adsorption d'un floculant 100 % anionique sur la surface de l'hématite à pH élevé | 59 |
| Figure 4.1 - Modèle de plaques parallèles illustrant la déformation du fluide | 62 |
| Figure 4.2 - Surfaces cisaillées dans un écoulement visqueux | 63 |
| Figure 4.3 - Courbes d'écoulement pour différents types de matériel..... | 65 |
| Figure 4.4 - Vue de profil d'un appareil Couette..... | 67 |
| Figure 4.5 - Hypothèse de la couche limite | 68 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.6 - Écoulement visqueux entre deux plaques planes | 69 |
| Figure 4.7 - Écoulement d'un fluide visqueux incompressible dans un système de cylindres coaxiaux | 72 |
| Figure 4.8 - Vortex toroïdaux dans l'espace annulaire Couette | 76 |
| Figure 4.9 - Écoulement tangentiel à faible nombre de Taylor | 78 |
| Figure 4.10 - Phénomène observé dans l'espace annulaire | 79 |
| Figure 4.11 - Écoulement tangentiel à nombre de Taylor modérément élevé | 79 |
| Figure 4.12 - Écoulement tangentiel à nombre de Taylor élevé | 80 |
| Figure 4.13 - Écoulement laminaire dans une conduite droite | 86 |
| Figure 4.14 - Conduite torsadée | 88 |
| Figure 4.15 - Écoulement secondaire dans une conduite torsadée | 89 |
| Figure 5.1 - Appareil Couette | 93 |
| Figure 5.2 - Montage expérimental | 95 |
| Figure 5.3 - Schéma de l'ensemble du montage expérimental | 97 |
| Figure 5.4 - Vue de profil des injecteurs sur l'appareil de Couette | 101 |
| Figure 5.5 - Conduite torsadée avec différents injecteurs de polymère | 102 |
| Figure 5.6 - Variation de la concentration moyenne en matières particulières en fonction de la turbidité | 107 |
| Figure 5.7 - Schématisation du montage lors de la mesure de la vitesse de sédimentation | 110 |
| Figure 5.8 - Variation de la turbidité en fonction du temps pour 6 essais de flocculation dans le système Couette | 111 |
| Figure 5.9 - Turbidité moyenne obtenue pour 6 essais de flocculation et dispersion des résultats | 112 |
| Figure 6.1 - Variation de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée en fonction du dosage de polymère A (0,01 % p/p) en test du cylindre | 115 |
| Figure 6.2 - Variation de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration de la solution de polymère A pour un dosage de 48 g/t en test du cylindre | 118 |
| Figure 6.3 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère A, 180 minutes d'expérimentation | 119 |
| Figure 6.4 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère A, 180 minutes d'expérimentation | 123 |

| | |
|---|-----|
| Figure 6.5 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère A, 180 minutes d'expérimentation | 124 |
| Figure 6.6 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère A, 180 minutes d'expérimentation | 126 |
| Figure 6.7 - Variation de la turbidité en fonction du dosage ajouté pour trois niveaux d'agitation, polymère A, 180 minutes d'expérimentation | 128 |
| Figure 6.8 - Variation de la hauteur moyenne de la couche de sédiment et de la turbidité en fonction du dosage de polymère A, 180 minutes d'expérimentation | 130 |
| Figure 6.9 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour deux types de boue, polymère A, injecteur 2, 180 minutes d'expérimentation | 132 |
| Figure 6.10 - Variation de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée en fonction du dosage du polymère B (0,01 % p/p) en test du cylindre. | 134 |
| Figure 6.11 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère B, 180 minutes d'expérimentation | 137 |
| Figure 6.12 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère B, 180 minutes d'expérimentation | 140 |
| Figure 6.13 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère B, 180 minutes d'expérimentation | 142 |
| Figure 6.14 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère B, 180 minutes d'expérimentation | 143 |
| Figure 6.15 - Variation de la turbidité en fonction du dosage ajouté pour deux injecteurs Couette, polymère B, 180 minutes d'expérimentation | 145 |
| Figure 6.16 - Variation de la hauteur moyenne de la couche de sédiment et de la turbidité en fonction du dosage de polymère B, 180 minutes d'expérimentation..... | 147 |
| Figure 6.17 - Variation de la turbidité en fonction de la proportion des polymères dans le mélange AB en test du cylindre | 149 |
| Figure 6.18 - Variation de la turbidité en fonction de la proportion des polymères dans le mélange BA en test du cylindre | 151 |
| Figure 6.19 - Variation de la turbidité en fonction des proportions de polymère dans le mélange AB, système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 153 |
| Figure 6.20 - Variation de la turbidité en fonction des proportions de polymère dans le mélange BA, système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 154 |
| Figure 6.21 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange de polymère BA (30-12), système Couette, 180 minutes d'expérimentation..... | 157 |

| | |
|---|-----|
| Figure 6.22 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour une double addition de polymère BA (30-12), système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 159 |
| Figure 6.23 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double d'agents de flocculation en test du cylindre..... | 163 |
| Figure 6.24 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange triple d'agents de flocculation en test du cylindre | 164 |
| Figure 6.25 - Variation de la turbidité en fonction du dosage du mélange double DA dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 167 |
| Figure 6.26 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double DA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 169 |
| Figure 6.27 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation du mélange double DA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 171 |
| Figure 6.28 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection d'un mélange triple dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation..... | 175 |
| Figure 6.29 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double d'agents de flocculation en test du cylindre..... | 177 |
| Figure 6.30 - Variation de la turbidité en fonction des proportions des agents dans le mélange double IA en test du cylindre..... | 178 |
| Figure 6.31 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange triple d'agents de flocculation en test du cylindre | 179 |
| Figure 6.32 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double IA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 182 |
| Figure 6.33 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation du mélange double IA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation..... | 184 |
| Figure 6.34 - Variation de la turbidité en fonction du dosage du mélange double IA dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 186 |
| Figure 6.35 - Variation de la turbidité en fonction de la concentration en matières particulières de la boue pour le mélange double IA dans le système Couette | 188 |
| Figure 6.36 - Variation de la turbidité en fonction de la durée d'expérimentation pour le mélange double IA dans le système Couette | 190 |
| Figure 6.37 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour des mélanges triples dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation | 192 |
| Figure A.1 - Déformation d'un élément fluide | 219 |

| | |
|--|------------|
| Figure A.2 - Variation d'un élément dans le temps | 223 |
| Figure A.3 - Visualisation pour la transformation en coordonnées cylindriques | 224 |
| Figure A.4 - Notation pour les contraintes | 228 |
| Figure A.5 - Tenseur des contraintes | 229 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 2.1 - Composition chimique des bauxites (composants majeurs)..... | 18 |
| Tableau 3.1 - Temps de décantation de différentes particules..... | 41 |
| Tableau 5.1 - Mesures associées à la calibration du système Couette..... | 113 |
| Tableau 6.1 - Séquences d'injection possibles pour la double addition de polymère | 152 |
| Tableau 6.2 - Séquences d'injection possibles pour la double addition de polymère A et d'agent de flocculation D..... | 166 |
| Tableau 6.3 - Séquences d'injection possibles pour la double addition de polymère A et d'agent de flocculation I | 181 |
| Tableau 6.4 - Conditions optimales et niveaux de turbidité les plus bas obtenus au cours des expérimentations | 196 |
| Tableau 6.5 - Concentration en matières particulières associée aux niveaux de turbidité les plus bas obtenus au cours des expérimentations | 200 |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 La problématique

L'aluminium est l'un des éléments métalliques les plus abondants dans le monde. Il constitue environ 8 % de la croûte terrestre et se présente généralement sous forme d'oxydes. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour l'obtention de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. Ce minerai provenant surtout de régions tropicales est facile à extraire mais sa transformation en aluminium métallique s'avère assez complexe.

L'alumine est extraite de la bauxite grâce au procédé Bayer, procédé inventé par Karl-Joseph Bayer en 1887. La première étape de ce procédé est le broyage de la bauxite. La seconde étape consiste à mélanger dans des autoclaves la bauxite broyée (poudre) à une solution de soude caustique (liqueur Bayer). Ainsi, dans des conditions spécifiques de température et de pression, l'oxyde d'aluminium est solubilisé dans la liqueur Bayer sous forme d'aluminate de sodium tandis que les impuretés demeurent à l'état solide. Ces résidus inertes, communément appelés boues rouges, contiennent principalement des oxydes de fer, de silicium et de titane. La décantation (séparation des solides en suspension par gravité) est le moyen le plus utilisé pour retirer les résidus inertes de la liqueur contenant

l'aluminate. L'utilisation d'agents de flocculation permet d'accélérer l'étape de décantation en augmentant considérablement la vitesse de sédimentation des particules.

Par la suite, la boue sera lavée afin de récupérer la liqueur, puis acheminée vers des sites d'empilement prévus à cette fin. La liqueur surnageante contenant l'aluminate de sodium est pompée et filtrée afin de retirer les matières particulaires résiduelles en suspension. L'aluminate de sodium est ensuite précipité sous forme de cristaux en utilisant du trihydrate d'alumine comme amorce. Finalement, les cristaux sont calcinés afin d'en retirer toutes traces d'eau. L'oxyde d'aluminium ainsi obtenu est sous forme de poudre blanche communément appelée alumine (Al_2O_3). Il est intéressant de mentionner qu'il faut entre quatre et cinq tonnes de bauxite pour obtenir environ deux tonnes d'alumine qui donnent une tonne d'aluminium. La Figure 1.1 présente le schéma du procédé Bayer.

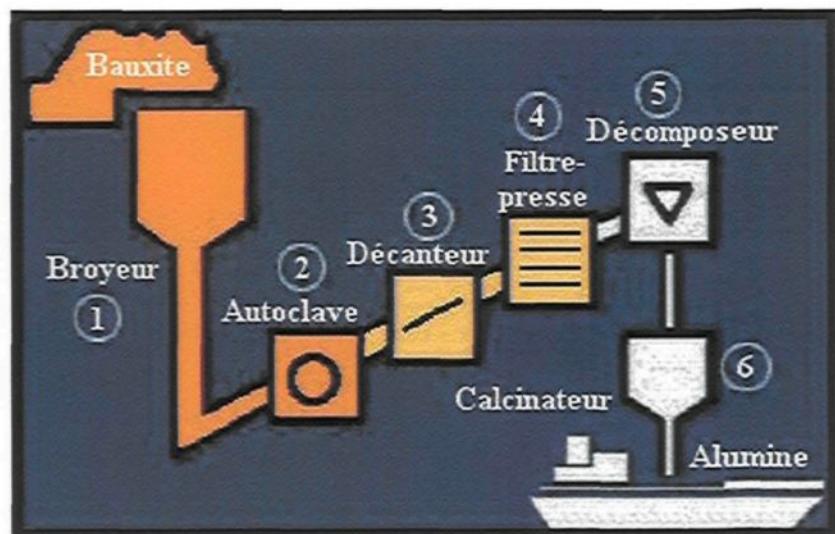


Figure 1.1 - Le procédé Bayer

La décantation est une étape clé du procédé Bayer. Afin d'en améliorer l'efficacité, il y a ajout d'agents de flocculation. Les agents de flocculation employés par l'industrie de l'aluminium sont principalement des copolymères d'acrylamide et d'acrylate de sodium⁽¹⁾⁽²⁾. Ces agents ont pour fonction d'agglomérer les particules en suspension sous forme de flocons (flocs) et ainsi augmenter la vitesse de sédimentation. Cependant, les méthodes actuelles de flocculation ne permettent pas d'éliminer complètement les matières particulières présentes dans la liqueur surnageante. Conséquemment, une étape de filtration est nécessaire pour réduire la quantité de matières particulières en suspension. Plus il y a de particules en suspension et plus l'étape de filtration est laborieuse et dispendieuse. La filtration est donc une étape importante dans le procédé Bayer qui permet d'éviter la contamination de l'alumine.

La problématique principale de cette étude consiste à développer une méthodologie permettant de diminuer la quantité de matières particulières présentes dans la surverse d'un décanteur de boues rouges et ainsi améliorer la clarté de la liqueur Bayer. Une flocculation efficace est donc essentielle à cette étape de décantation. L'amélioration de l'efficacité de la flocculation aide à l'élimination des matières en suspension tout en diminuant les problèmes associés à l'étape de filtration (diminution des coûts associés à la filtration et amélioration du rendement du procédé). D'autre part, l'augmentation de l'efficacité de la flocculation pourrait entraîner une réduction de la consommation des floculants synthétiques coûteux, une augmentation de la concentration en matières particulières à la sortie des décanteurs

(% solide) ainsi qu'une diminution des pertes en caustique dans l'environnement (plus grande récupération de liqueur).

Des essais préliminaires⁽¹⁾, réalisés au moyen de cylindres gradués, démontrent une réduction de la quantité de matières particulaires en suspension dans la liqueur par l'emploi de combinaisons adéquates de polymères. Cependant, plusieurs variables influencent l'efficacité des combinaisons telles que le mode et la séquence d'introduction des agents de flocculation ainsi que le niveau et la durée de l'agitation.

En somme, ce projet vise à étudier les différentes variables pouvant améliorer la clarté d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. Les variables à l'étude sont : les différents types de polymère ou agents de flocculation, la séquence d'injection des flocculants, la concentration en matières particulaires de la suspension, la concentration de la solution de flocculant, la concentration de la liqueur Bayer, le dosage du polymère, les effets du cisaillement sur la clarté de la suspension (niveau d'agitation) et la durée du cisaillement sur la suspension flokulée.

1.2 Les objectifs

- Effectuer des essais de flocculation dans un système Couette modifié en contrôlant les principales variables afin d'établir les conditions optimales de séparation solide/liquide.
- Valider les travaux préliminaires, effectués au moyen du test du cylindre, par des essais en continu.
- Minimiser la quantité de matières particulaires en suspension du surnageant à une valeur inférieure à 10 mg/L (niveau retrouvé en usine après filtration).
- Étudier la nature des matières particulaires en suspension dans la surverse.

1.3 Travaux antérieurs et aspects originaux de la recherche

1.3.1 La floculation

Historiquement, l'amidon a été utilisé comme floculant pour aider à la sédimentation des boues rouges dans l'industrie de l'aluminium. Dans les années 1960, l'efficacité des polymères synthétiques comme agents de floculation de la boue rouge a été reconnue. Pour cette raison, au cours des 30 dernières années, l'utilisation de ces polymères a gagné en importance dans l'industrie de l'aluminium. Ces polymères permettent d'améliorer la vitesse de sédimentation ainsi que la clarté de la liqueur Bayer⁽²⁾. Un des principaux avantages des polymères synthétiques est que leurs compositions et leurs poids moléculaires peuvent être modifiés pour répondre aux exigences industrielles. Par conséquent, les quantités de polymères synthétiques utilisées en industrie sont beaucoup moins importantes que celles en amidon⁽²⁾. Cette diminution du dosage (quantité de polymère nécessaire pour floculer une tonne métrique de matières sèches) a permis de réduire les coûts associés à la fabrication de l'aluminium tout en améliorant l'efficacité de la floculation⁽¹⁾.

Il existe plusieurs types de polymères synthétiques mais ceux utilisés dans l'industrie minière sont principalement des copolymères d'acrylamide et d'acrylate de sodium⁽²⁾. Ces copolymères peuvent posséder différents niveaux d'anionicité (légèrement, modérément ou fortement anionique). Ce niveau d'anionicité fait référence au ratio d'acrylamide et d'acide acrylique présent dans le copolymère⁽²⁾. La Figure 1.2 illustre les unités répétitives des acrylamides et des acrylates de sodium présentes dans le copolymère.

polymérique ont la capacité d'interagir avec les surfaces minérales. La fonction principale du groupement acrylamide est de s'adsorber sur la surface des particules au moyen de pont hydrogène⁽²⁾. Le groupement acrylate, quant à lui, assure un bon étalement de la chaîne de polymère en solution par des répulsions électrostatiques (charges négatives) entre les groupements fonctionnels du polymère⁽²⁾. Cet étalement facilite la création des ponts interparticulaires. La Figure 1.3 présente les effets du pH sur la configuration des polymères en suspension.

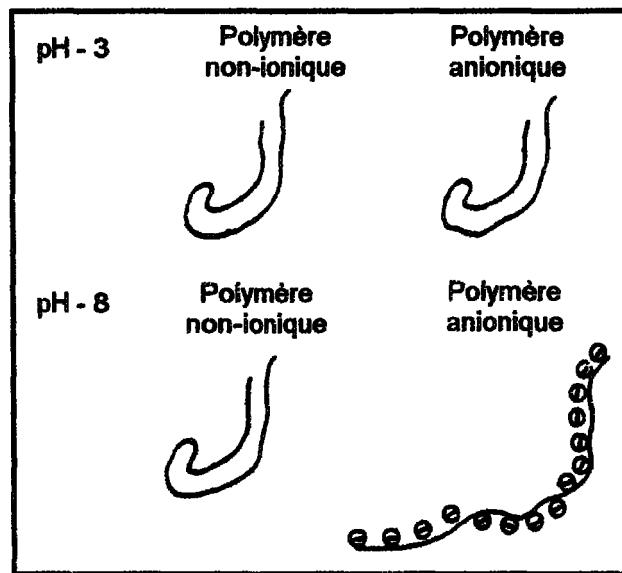


Figure 1.3 - Schématisation de l'effet du pH sur la configuration du polymère

À pH élevé, l'acide acrylique est hydrolysé en acrylate, tandis qu'à bas pH, l'acrylate est en équilibre chimique avec la forme acide. Ce comportement acide-base permet d'expliquer l'influence que le pH possède sur l'activité des polymères anioniques conventionnels⁽²⁾.

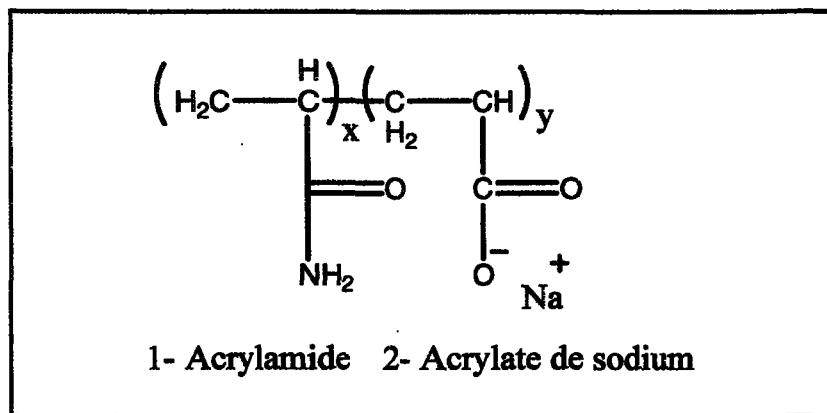


Figure 1.2 - Copolymère d'acrylamide et d'acrylate de sodium

Le choix d'un flocculant efficace, dans des conditions spécifiques d'opération, dépend de la nature chimique de la solution. Par exemple, le décanteur à haut rendement (DHR) après la digestion contient de la liqueur à très haute teneur en caustique ($\sim 230 \text{ g/L}$). Ainsi, un polymère hautement anionique doit y être utilisé. Subséquemment, des polymères moins anioniques peuvent être utilisés dans les laveurs puisque la teneur en caustique de la liqueur diminue ($\sim 10 \text{ g/L}$). Cependant, malgré l'utilisation d'un polymère adéquat, il faut également considérer l'activité du polymère. Le polymère atteint son activité maximum lorsque les chaînes de polymère se sont complètement dispersées dans la solution. Pour atteindre une dispersion complète des chaînes de polymère, il faut porter une attention particulière à la préparation des solutions⁽¹⁾⁽³⁾.

Différents mécanismes de flocculation ont été proposés. Peu importe celui utilisé, le principe de base reste le même et consiste en la création de ponts entre les particules en suspension et le polymère. En effet, les groupements fonctionnels sur la molécule

Différentes formes d'agrégats (flocs) sont créées par la formation de liens entre les particules en suspension et le polymère. La Figure 1.4 schématise la structure des agrégats. Ces formes sont soit compactes et denses ou de nature ouverte et de moindre densité. Les deux caractéristiques physiques les plus importantes d'un floc sont sa densité et sa taille⁽⁴⁾.

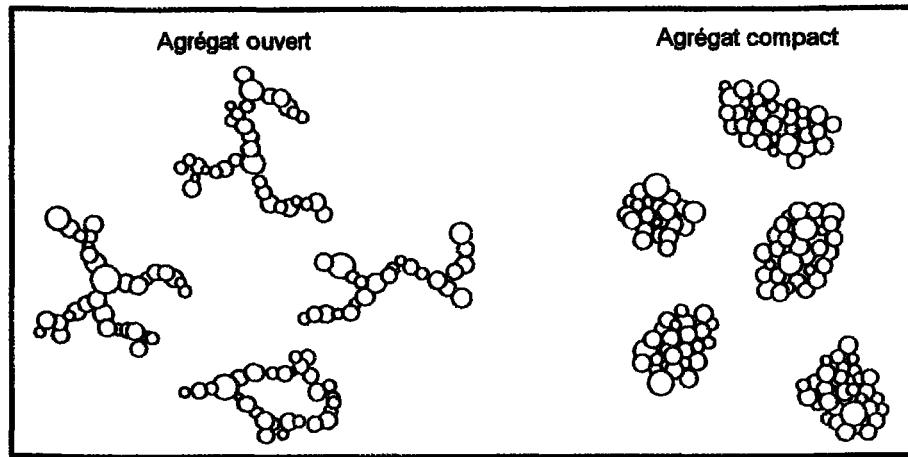


Figure 1.4 - Structure des agrégats

Considérant la nature des groupements fonctionnels liés à la chaîne de polymère et les mécanismes d'adsorption s'y reportant⁽⁵⁾, une combinaison de deux floculants entraîne une synergie au niveau de la flocculation. La flocculation obtenue par l'addition de deux floculants semble produire un excellent pontage inter-particulaire par des interactions de type polymère-polymère⁽¹⁾⁽⁵⁾. Des résultats obtenus dans nos laboratoires⁽¹⁾ ont démontré l'efficacité de certains polymères et agents de flocculation à réduire de façon significative la quantité de matières particulaires en suspension dans la liqueur Bayer. L'usage adéquat de certaines combinaisons de polymères et d'agents de flocculation a permis de réduire la concentration particulaire à moins de 5 mg/L⁽¹⁾.

1.3.2 La géométrie du système Couette

Le test du cylindre est une norme internationale en technique de séparation solide/liquide permettant de déterminer l'efficacité des floculants⁽⁶⁾. Ce test consiste à floculer une suspension de boue, pour un dosage de polymère donné, dans un cylindre gradué à l'aide d'un plongeur ou par inversion du cylindre. Trois paramètres importants sont déterminés par cette méthodologie : la vitesse de sédimentation, la clarté du liquide surnageant (turbidité résiduelle) et la concentration de solides dans le sédiment. La vitesse de sédimentation des particules est une indication qualitative de la taille des agrégats. La turbidité résiduelle est obtenue lorsque la plupart des agrégats ont sédimenté et elle est un indice de la capacité du polymère à « capturer les particules ».

La reproductibilité du test du cylindre est affectée par différents paramètres. Premièrement, le test du cylindre est une procédure discontinue alors que la flocculation industrielle se produit normalement de façon continue. Lors d'une flocculation continue, il est possible d'ajuster la quantité de polymères afin de répondre aux variations rencontrées dans le processus (variation de la concentration en matières particulières). A l'inverse, dans un test du cylindre, la quantité de polymères est fixe et ne peut être modifiée à l'intérieur d'un essai. Conséquemment, le test du cylindre est grandement affecté par la concentration en matières particulières de la suspension de chaque échantillon. De plus, le test du cylindre semble dépendre du niveau d'agitation fourni par le plongeur ou le nombre d'inversion. En effet, des chercheurs⁽⁷⁾ ont démontré que le niveau d'agitation affecte considérablement l'efficacité de la flocculation. Par conséquent, un faible niveau d'agitation résulte en une

mauvaise dispersion du polymère dans la solution, ce qui amène une flocculation inefficace⁽⁸⁾. Considérant que le niveau d'agitation peut varier d'un expérimentateur à l'autre, la reproductibilité du test du cylindre s'en trouve affectée⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

Une méthode alternative au test du cylindre a été proposée⁽⁷⁾. Cette méthode consiste à floculer la suspension de boues rouges de façon continue dans un espace annulaire situé entre un cylindre intérieur rotatif et un cylindre extérieur fixe (géométrie Couette). Les travaux expérimentaux consistaient à floculer la boue dans le système Couette, puis à la transférer dans une colonne de sédimentation. Une amélioration de la reproductibilité au niveau de la mesure des vitesses de sédimentation a été obtenue avec la géométrie Couette comparativement au test du cylindre⁽⁷⁾. L'erreur obtenue sur la variation de la vitesse de sédimentation est de 6,3 % pour le test du cylindre et de 1,3 % pour la géométrie Couette. Pour ce qui est de la turbidité résiduelle, la différence est moins significative soit 8,2 % pour la géométrie Couette et 14,0 % pour le test du cylindre. En somme, le niveau d'agitation semble plus facile à reproduire avec la géométrie Couette que dans un cylindre gradué. Donc, les mesures obtenues à l'aide de la géométrie Couette sont plus reproductibles que celles obtenues avec le test du cylindre.

Une étude subséquente⁽³⁾, portant sur la flocculation effectuée dans une géométrie Couette, a permis d'observer l'impact du cisaillement sur la taille des particules et la vitesse de sédimentation. Une application excessive de cisaillement (niveau d'agitation élevé) au cours d'une flocculation effectuée avec un polymère à haut poids moléculaires, provoquerait

une rupture des chaînes du polymère réduisant ainsi la capacité du polymère à effectuer des liaisons entre les particules (diminution de l'activité des solutions de polymère)⁽³⁾. Conséquemment, la taille des agrégats et la vitesse de sédimentation diminuent. C'est pourquoi il est possible de déterminer un niveau d'agitation optimal pour chaque type de polymère dans le but d'améliorer la flocculation.

Une étude sur les effets du cisaillement sur les polymères⁽⁹⁾ démontre que l'activité et la viscosité de la solution de polymère diminuent avec l'augmentation du temps de cisaillement (intensité de l'agitation). La diminution de la viscosité est expliquée par la rupture des chaînes de polymère sous l'effet de cisaillement. La performance des polymères anioniques semble moins affectée par la diminution de l'activité. En effet, le polymère anionique a une plus grande résistance au cisaillement que le polymère non ionique. Plus le degré d'anionicité est élevé, plus la résistance au cisaillement est grande. Ces chercheurs⁽⁹⁾ ont émis l'hypothèse que la résistance du polymère anionique au cisaillement pourrait s'expliquer par des différences entre les mécanismes de flocculation des polymères anioniques et non ioniques⁽⁹⁾.

Farrow J.B. et Swift J.D.⁽¹⁰⁾ ont observé l'impact de la durée et de l'intensité du niveau d'agitation sur la flocculation dans un système Couette. Les conditions d'agitation (durée et intensité) dépendent principalement de la nature de la suspension à l'étude (type de minéraux) et de la nature du polymère⁽¹⁰⁾. D'autre part, les résultats⁽¹⁰⁾ obtenus ont démontré que la performance de la flocculation est directement reliée au niveau d'agitation.

Ainsi, l'intensité et la durée de l'agitation sont des facteurs importants influençant la vitesse de sédimentation et la turbidité résiduelle de la suspension flokulée. Un niveau d'agitation élevé augmenterait la turbidité résiduelle. Cependant, une augmentation du dosage permettrait de compenser les effets néfastes d'un niveau d'agitation trop élevé. La durée de l'agitation est exprimée comme un temps de résidence au cours duquel les agrégats sont soumis au cisaillement dans l'espace annulaire Couette. L'augmentation du temps de résidence favorise l'apparition d'agrégats de tailles similaires (dégradation des gros agrégats et formation d'agrégats de plus petite taille par les fines particules)⁽¹⁰⁾. En somme, il est évident que chaque polymère requiert des conditions d'agitation spécifiques pour atteindre une flocculation optimale.

Des résultats similaires⁽¹¹⁾ démontrent que la formation des flocs dépend du degré de cisaillement (niveau d'agitation) du système et du temps de résidence (durée). Le cisaillement est produit par une géométrie Couette (système de cylindres coaxiaux) similaire à celle décrite précédemment. Des essais en laboratoire⁽¹¹⁾ ont démontré une relation entre le niveau d'agitation (cisaillement) et la turbidité. Ainsi, pour un niveau d'agitation spécifique, il a été possible d'obtenir de bas niveaux de turbidité. Ceci permet de supposer que le cisaillement est une force agissant à la fois sur la formation et/ou la destruction des flocs dépendamment de la durée et de l'intensité de l'agitation. L'atteinte d'un équilibre entre ces forces pourrait expliquer l'obtention d'une turbidité minimale. Le même phénomène peut également être observé dans le cas de la vitesse de sédimentation, c'est-à-dire qu'elle décroît linéairement en fonction de l'augmentation du niveau d'agitation.

(un niveau d'agitation trop grand provoque une diminution générale de la taille des agrégats (flocs) entraînant ainsi une diminution de la vitesse de sédimentation)⁽¹¹⁾.

Ces chercheurs⁽¹²⁾ ont observé que la taille des agrégats, pour un niveau d'agitation et un type de polymère donnés, varie selon une distribution granulométrique. En utilisant un système d'imagerie vidéo ainsi qu'une colonne de sédimentation, il a été possible d'évaluer la taille, la forme et la vitesse de sédimentation des particules. Donc, plus le niveau d'agitation augmente, plus les agrégats deviennent petits et vice versa⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. Ainsi, pour une vitesse de sédimentation donnée, une population d'agrégats correspondante est observée. L'élaboration d'un modèle fractal, basé sur la relation entre la densité et la taille des particules, permet d'obtenir une meilleure compréhension des phénomènes de flocculation⁽¹²⁾.

Il est également possible d'évaluer la performance des polymères commerciaux grâce au système Couette. Des chercheurs⁽¹⁵⁾ ont observé que le dosage des polymères joue un rôle important dans la performance de la flocculation. Ainsi, la vitesse de sédimentation des particules varie linéairement avec le dosage de polymère. De plus, l'augmentation du dosage, pour certains types de polymère, favorise la diminution de la turbidité. Cependant, le niveau de turbidité dépend non seulement du dosage mais également du niveau d'agitation (taux de cisaillement). Les polymères ne réagissent pas de la même façon au niveau d'agitation, ce qui entraîne des variations de la turbidité résiduelle observée. Dans un cas spécifique⁽¹⁵⁾, une diminution de la turbidité résiduelle en fonction de l'augmentation

du dosage a été observée. Cette relation est plus prononcée pour des dosages plus élevés. Ainsi, le polymère semble moins efficace à capturer les particules en suspension (augmentation de la turbidité) à un dosage élevé et à un faible niveau d'agitation. Cependant, pour des niveaux d'agitation élevés, l'effet de la variation du dosage semble moins significatif sur les résultats de turbidité.

CHAPITRE 2

LE PROCÉDÉ BAYER

Les principales étapes du procédé Bayer ont été énumérées et décrites brièvement au chapitre 1. Dans ce chapitre, les étapes du procédé seront décrites plus en profondeur⁽¹⁶⁾.

2.1 La bauxite

L'aluminium est l'un des éléments métalliques le plus abondant dans le monde. Il constitue environ 8 % de la croûte terrestre et se présente généralement sous forme d'oxydes. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour l'obtention de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. Ce minerai fut découvert en 1821 aux Baux-de-Provence par Pierre Berthier. Le nom de bauxite lui fut attribué en 1861 par Henry Sainte-Claire Deville et il désigne tous les minerais contenant des quantités importantes d'oxyde d'aluminium⁽¹⁷⁾.

La bauxite est une roche sédimentaire alumineuse de structure variée contenant des proportions variables d'hydrates d'alumine, de kaolinite, de silice et d'oxydes de fer qui lui confèrent sa coloration rouge caractéristique⁽¹⁷⁾. L'alumine contenue dans la bauxite se présente principalement sous deux formes : trihydratée comme la gibbsite ou monohydratée

telle que la boéhmite ou le diaspore. La gibbsite trihydratée ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) provient principalement des bauxites tropicales et est la plus économique à traiter. La boéhmite et le diaspore monohydraté ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) proviennent des bauxites dites européennes et chinoises et elles nécessitent des conditions de température et de pression beaucoup plus élevées que la gibbsite pour être traitées⁽¹⁶⁾.

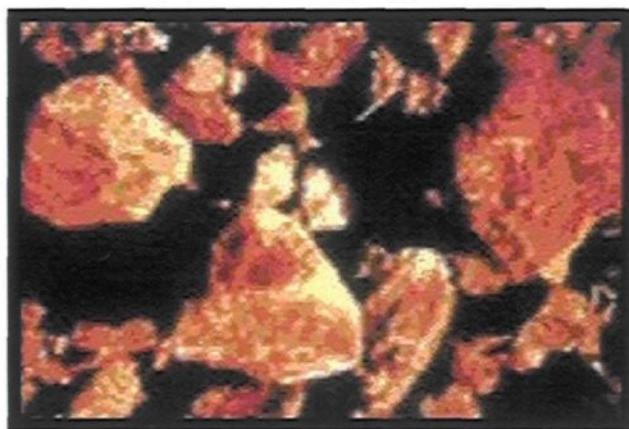


Figure 2.1 - La bauxite

En général, la concentration d'oxyde d'aluminium hydraté dans la bauxite se situe entre 40 et 60 %. La fraction restante est constituée d'impuretés présentes dans la bauxite telles que les oxydes de fer, de silice et de titane. Le tableau 2.1 présente les principaux constituants de la bauxite. D'autres impuretés se retrouvent dans la bauxite mais en quantité infime (traces inférieures à 1 ppm)⁽¹⁸⁾. La présence de ces impuretés telles que le carbone organique, le phosphate, l'arsenic, le fluorure et bien d'autres peut interférer dans le bon fonctionnement du procédé Bayer puisqu'elles peuvent se solubiliser dans la liqueur au cours de la digestion et précipiter avec l'hydrate dans une étape ultérieure.

| Minéral | Formule | Proportion |
|----------------|---|-------------|
| Gibbsite | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 30,0 - 60,0 |
| Hématite | Fe_2O_3 | 1,0 - 30,0 |
| Boehmite | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 0,2 - 20,0 |
| Anatase/Rutile | TiO_2 | 0,3 - 10,0 |
| Argile | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 0,3 - 60,0 |
| Quartz | SiO_2 | 0,2 - 10,0 |

Tableau 2.1 - Composition chimique des bauxites (composants majeurs)

2.2 Le procédé Bayer

Le procédé Bayer a été inventé en 1887 par Karl Joseph Bayer. Ce procédé permet d'extraire l'alumine, contenue dans la bauxite, grâce à une dissolution par de la soude. Le procédé Bayer est utilisé dans la fabrication de l'aluminium puisqu'il est le moyen le plus économique d'extraire l'alumine. La section suivante porte sur les étapes principales du procédé Bayer.

2.2.1 Broyage de la bauxite

Cette étape consiste à diminuer la taille du minerai afin de faciliter la mise en solution de l'alumine contenue dans la bauxite. Ainsi, le minerai est tamisé et broyé. Les grosses particules sont recirculées, puis broyées de nouveau afin d'atteindre la taille souhaitée. La Figure 2.2 illustre les étapes de fonctionnement d'une unité de broyage. Un broyage grossier signifie que l'alumine contenue dans la bauxite n'aura pas été extraite en totalité.

Par contre, un broyage trop fin indique qu'il y a une plus grande dépense d'énergie, ce qui augmente les coûts du procédé.

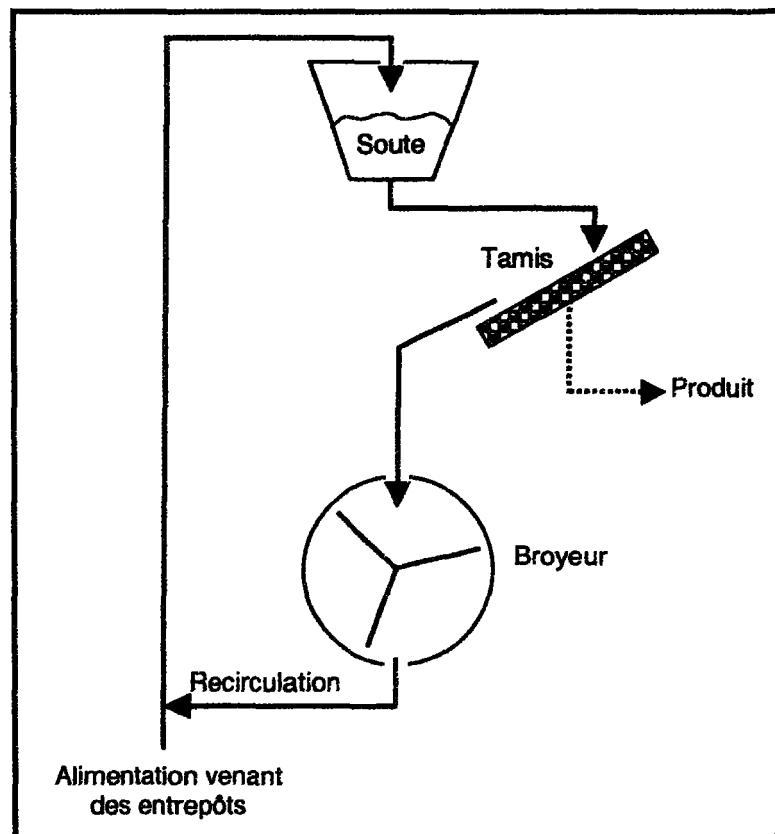


Figure 2.2 - Schéma typique d'une unité de broyage

2.2.2 Mélange

La bauxite, une fois broyée, est mélangée à de la chaux afin de faire précipiter le phosphate extrait de la bauxite et ainsi atténuer le risque de précipitation de l'hydrate d'alumine durant l'étape de séparation solide/liquide. De plus, la présence de phosphate dans l'alumine aurait pour conséquence de diminuer l'efficacité du courant dans le procédé d'électrolyse. Par la suite, le mélange chaux/bauxite est ajouté à de la liqueur usée arrivant

des décanteurs de l'étape de séparation solide/liquide blanc. La pulpe ainsi produite par le mélange de la liqueur usée, de la bauxite broyée et de la chaux contient environ 50 % de matières solides et est à une température de 85 °C. La Figure 2.3 illustre l'étape du mélange.

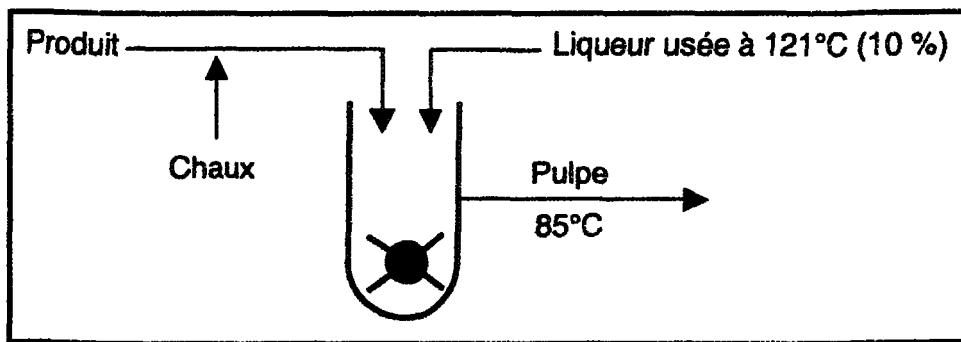


Figure 2.3 - Schéma du mélange de bauxite, de chaux et de liqueur usée

2.2.3 Digestion

La digestion est une étape importante du procédé Bayer. En effet, le rôle principal de la digestion consiste à dissoudre le trihydrate d'alumine dans la liqueur caustique (liqueur usée chaude). Ainsi, au cours de l'étape de la digestion, la pulpe (mélange de bauxite broyée, liqueur et chaux) à 85 °C est dirigée vers les autoclaves. De la liqueur usée, préchauffée à 154 °C par la vapeur vive via un échangeur de chaleur, est aussi injectée dans les autoclaves. Sous des conditions spécifiques de température (143 °C) et de pression (300 - 450 KPa), l'alumine contenue dans la bauxite se solubilisera dans la liqueur Bayer à travers une série d'autoclaves. Les autoclaves peuvent être horizontaux ou verticaux et ils permettent d'assurer un temps de résidence suffisamment long (environ une heure) pour

permettre la solubilisation du trihydrate d'alumine et la dessilicatation (précipitation de la silice). Le produit issu de l'étape de la digestion s'appelle la pulpe d'extraction. La Figure 2.4 présente le schéma de l'étape de digestion.

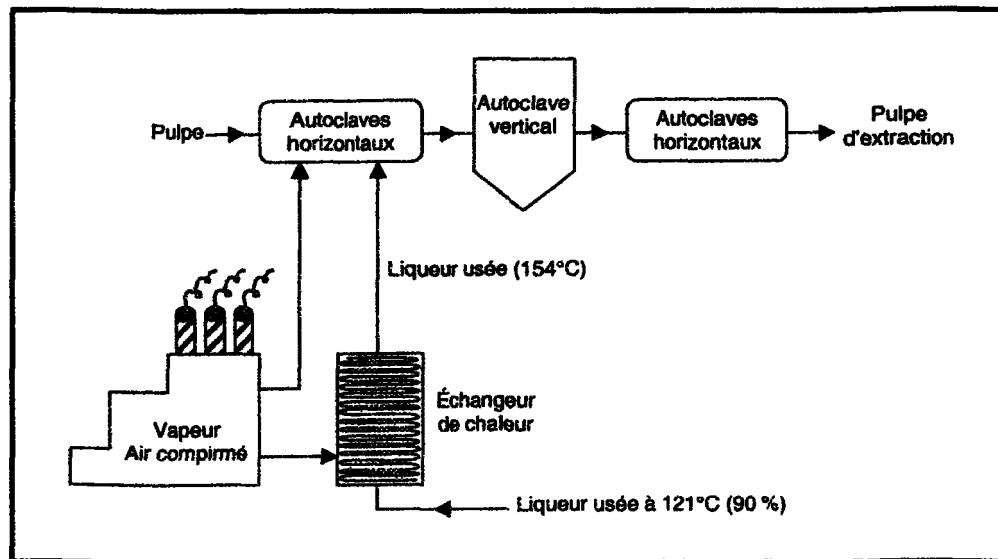
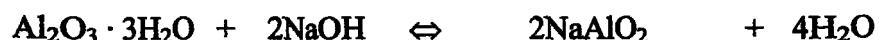


Figure 2.4 - Schéma de la digestion

Plusieurs réactions chimiques se produisent au cours de l'étape de digestion. Voici les deux principales réactions :

- La première réaction chimique implique la dissolution dans la liqueur Bayer du trihydrate d'alumine présent dans la bauxite.



- La seconde réaction implique que l'argile (composé de silice), présente dans la bauxite sous forme de kaolinite, est d'abord dissoute puis précipitée dans la liqueur pour former le produit de dessilication (sodalite) du procédé Bayer.



La sodalite formée au cours de la seconde réaction sera rejetée dans la boue lors de la séparation solide/liquide. Par conséquent, une quantité de caustique sera perdue durant le procédé. En effet, la conversion de 1,0 kg de silice (SiO_2 sous forme de kaolinite) en sodalite occasionne la perte de 1,0 kg de caustique (Na_2CO_3) et de 0,13 kg d'alumine⁽¹⁸⁾. Les coûts de production augmentent donc avec l'augmentation du contenu en silice de la bauxite.

Par ailleurs, le temps de digestion du procédé Bayer est gouverné par le taux de précipitation du silicate. En effet, une trop grande concentration de silicate dans la pulpe conduira à une contamination de l'alumine⁽¹⁸⁾. Plusieurs facteurs peuvent influencer le taux de dessilication tels que la concentration initiale de silicate dans la bauxite, la température de l'étape de la digestion et la concentration en caustique de la liqueur Bayer. La digestion de la bauxite entraînera d'autres réactions telles que la dissolution de la gibbsite, la réversion de la boéhmite, la dissolution partielle des matières organiques et bien d'autres.

2.2.4 Séparation solide/liquide

La séparation solide/liquide ou décantation a pour objectif d'éliminer la majorité des particules solides en suspension dans la pulpe d'extraction afin d'obtenir une surverse la plus claire possible et une sousverse contenant un pourcentage de solides élevé et stable. Ainsi, avant d'être amenée au décanteur, la pulpe d'extraction doit passer par trois détendeurs qui vont abaisser la pression de la pulpe à 140 kPa, 70 kPa et 7 kPa. Cette détente va produire une vapeur qui est réutilisée pour réchauffer la liqueur usée. Par la suite, la pulpe est dirigée vers les décanteurs où les matières insolubles qui contiennent la majorité des impuretés (soit Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , P_2O_3 , etc.) seront retirées par sédimentation.

La Figure 2.5 présente un schéma de l'étape de séparation solide/liquide.

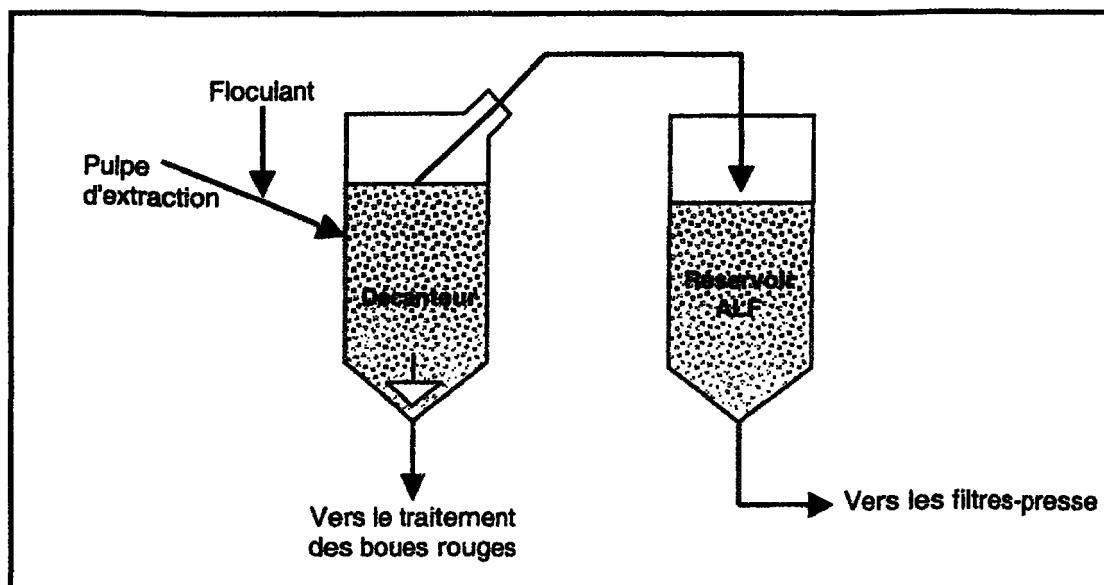


Figure 2.5 - Schéma de la séparation solide/liquide

Plusieurs facteurs peuvent influencer la décantation tels que la quantité de particules solides en suspension, la dimension moyenne des particules en suspension (plus les particules sont fines, plus le temps de décantation est long) et le niveau de turbulence dans le décanteur. Un floculant synthétique est généralement ajouté lors de l'étape de décantation afin de faciliter l'agglomération des matières particulaires en suspension en flocons plus volumineux et ainsi augmenter la vitesse de décantation. La problématique principale de la flocculation est la fragilité des flocons formés. En effet, les flocons se brisent lorsqu'ils subissent une contrainte de cisaillement au-dessus d'une valeur critique engendrant ainsi une diminution de rendement pour l'étape de décantation. Les sédiments (sousverse) sont dirigés vers le site de traitement des boues rouges. Le surnageant (liqueur mère), qui contient le NaAlO_2 en solution, est dirigé dans le réservoir d'alimentation des filtres.

2.2.5 Traitement des boues rouges

Le sédiment issu de l'étape de décantation et qui contient les impuretés se nomme boues rouges et la composition de celui-ci dépend de la source de bauxite utilisée. L'objectif de cette étape consiste à récupérer le plus de caustique de la boue avant d'envoyer cette dernière au site de disposition. Ainsi, les boues rouges sont lavées et épaissies avec des floculants à travers cinq épaississeurs, afin de réduire la concentration en caustique.

2.2.6 Filtration

Le surnageant, provenant de l'étape de séparation solide/liquide, est ensuite filtré pour en retirer les impuretés encore présentes. Du lait de chaux est ajouté à la surverse des décanteurs comme aide filtrant afin de stabiliser le NaAlO_2 dans la liqueur. Ainsi, la surverse additionnée de lait de chaux est filtrée sous pression (400 kPa) au moyen de filtres contenant des toiles en polypropylène. Les particules retenues à la surface de la toile forment une couche appelée « gâteau filtrant ». Ce dernier sert de médium filtrant car il permet de retenir les plus petites particules en suspension dans le liquide à filtrer. Lorsque le gâteau devient trop épais et trop dense, la pression dans les filtres devient très élevée et le filtre doit être nettoyé. Les impuretés accumulées sur le filtre (gâteau) seront dirigées vers le site de traitement des boues rouges. À la sortie des filtres, le filtrat ou liqueur mère est à une température de 107 °C et est dirigé vers l'étape de précipitation. Le filtrat obtenu contient environ 0,01 g/L de solides⁽¹⁹⁾. La Figure 2.5 présente un schéma de l'étape de filtration.

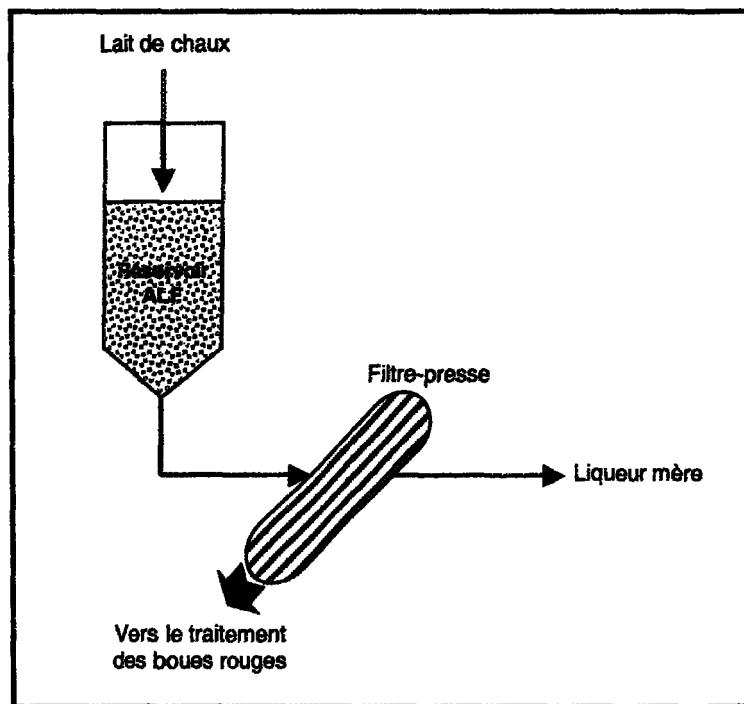


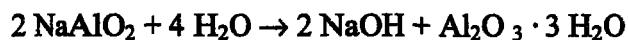
Figure 2.6 - Schéma de l'étape de filtration

2.2.7 Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium

La liqueur mère provenant de l'étape de filtration est refroidie entre 60 et 85 °C dans un détendeur qui récupère la vapeur pour réchauffer la liqueur usée retournant vers les autoclaves. La liqueur est ensuite entreposée dans des réservoirs où s'amorcent la précipitation par l'ajout des particules d'hydrate récupérées en aval et ayant une taille insuffisante pour être dirigée vers la calcination. Il y a trois types de précipiteur qui alimentent chacun un classificateur.

- Le précipiteur spécial reçoit les plus petites amorces provenant du décanteur à plateaux. La solution est dirigée vers le classificateur spécial. La sousverse de ce dernier contient les amorces de taille moyenne. La surverse contient les plus fines amorces qui sont dirigées vers le décanteur à plateaux.
- Le précipiteur primaire reçoit la liqueur mère et les amorces moyennes provenant du classificateur spécial. La sousverse du classificateur primaire contient les grosses amorces tandis que la surverse contient les plus petites amorces qui sont dirigées vers le décanteur à plateaux.
- Le précipiteur secondaire reçoit la liqueur mère et les grosses amorces provenant du classificateur primaire. La surverse du classificateur secondaire contient de grosses amorces qui sont dirigées vers le classificateur primaire. La sousverse contient les particules d'hydrate suffisamment grosses pour être classées en tant que produit.

Ainsi, le NaAlO_2 en solution est précipité sous forme de cristaux grâce à la dilution et au refroidissement graduel de la liqueur mère. Les cristaux sont ensuite séparés de la soude caustique par sédimentation et filtration. La réaction de précipitation du NaAlO_2 est la suivante :



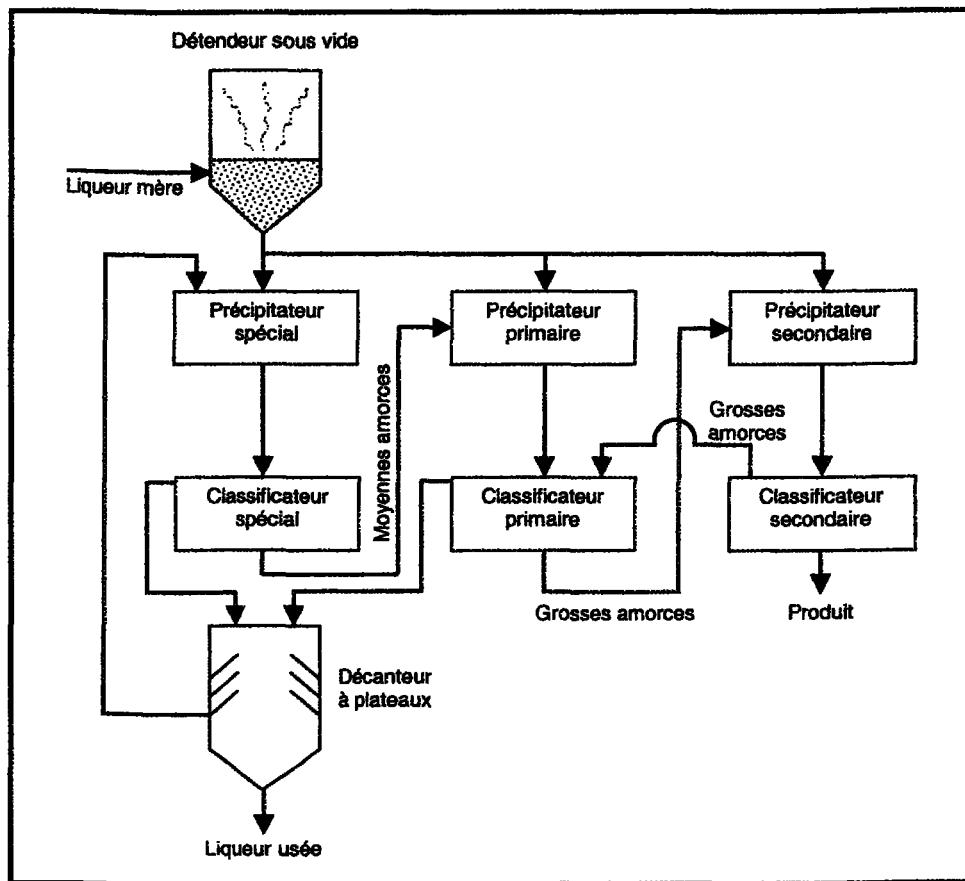


Figure 2.7 - Schéma détaillé de l'étape de précipitation

Lors de la précipitation, la solution dans les précipiteurs est lentement agitée afin d'uniformiser les sites de germination dans le liquide. La réaction de précipitation nécessite entre 20 et 80 heures. Le décanteur à plateaux est un réservoir de longue durée permettant la séparation des plus fines particules d'hydrate. La durée de la décantation des particules submicroniques prend plusieurs jours. La succession de plateaux est utilisée pour minimiser la distance et donc le temps de décantation. La surverse des plateaux est la liqueur usée qui sera recyclée.

2.2.8 Calcination et traitement du produit

Une fois que les cristaux d'hydrate d'alumine sont formés, une série d'étapes ultérieures est requise afin de fournir un produit fini. Voici les six étapes du traitement du produit.

1. Lavage de l'hydrate pour diminuer la concentration de la soude caustique transportant le trihydrate d'alumine.
2. Décantation pour récupérer l'hydrate solide.
3. L'hydrate est déposé sur des filtres pour être lavé à nouveau et ainsi éliminer toute trace de caustique.
4. L'hydrate est séché à 150 °C dans des fours, ce qui élimine l'eau libre. Après le séchage, des cyclones sont utilisés pour séparer les gaz des solides.
5. L'hydrate est transporté dans un four rotatif pour y être calciné entre 1000 – 1200 °C. L'eau liée à l'hydrate est éliminée à des températures supérieures à 600 °C tandis que l'alumine recristallise à 1100 °C.



6. L'alumine est ensuite refroidie dans des lits fluidisés puis transportée dans des silos d'entreposage. L'oxyde d'aluminium obtenu sous forme de poudre blanche est appelé alumine calcinée. Le diamètre des particules d'alumine varie entre 20 – 200 µm.

CHAPITRE 3

LES PROCÉDÉS DE SÉPARATION SOLIDE/LIQUIDE

Les techniques de séparation jouent un rôle prédominant dans les procédés chimiques industriels. Il existe deux principaux types de séparation solide/liquide : la filtration et la sédimentation. Dans le cadre du présent projet, seule la sédimentation est utilisée. Conséquemment, les notions de base de la sédimentation ainsi que les techniques de traitement préliminaires s'y rattachant seront détaillées dans ce chapitre. Mentionnons également qu'afin d'alléger le texte, chaque variable n'est défini qu'une seule fois et le symbole utilisé pour la représenter reste le même tout au long du document.

3.1 La sédimentation

La sédimentation est utilisée pour séparer les matières particulières en suspension dans un liquide sous l'action de la force gravitationnelle⁽²⁰⁾⁽²¹⁾. Deux objectifs peuvent être atteints par la sédimentation soient la clarification du liquide surnageant et/ou l'épaississement du solide. Le but de la clarification est de retirer le plus de matières en suspension afin d'obtenir une surverse la plus claire possible. L'épaississement, quant à lui, consiste à augmenter la concentration solide de la sousverse. Les équipements nécessaires à la sédimentation varient en fonction de l'objectif recherché. En effet, un puits

d'alimentation profond, un grand réservoir de surverse et l'utilisation d'agents de flocculation peuvent permettre d'améliorer la clarté tandis que l'utilisation d'un système de râteau est nécessaire à l'augmentation de la concentration solide. De façon générale, les procédés de séparation sont affectés par des facteurs tels que la taille et la densité des particules (nature des particules), la concentration volumétrique des particules ainsi que la densité et la viscosité du liquide sous des conditions d'opération données (température, pression, etc.).

Il existe trois principaux types de sédimentation : la sédimentation diluée, la sédimentation par flocculation et la sédimentation retardée⁽²²⁾⁽²³⁾. La sédimentation diluée s'effectue dans une suspension solide à basse concentration et où les particules sont capables de sédimerter individuellement sans interaction avec les particules voisines. Ainsi, chaque particule possède une vitesse de sédimentation qui lui est propre et qui est indépendante des autres particules. Pour la sédimentation par flocculation, la suspension est encore diluée mais les particules vont être flokulées durant cette période. Conséquemment, les particules s'agglomèrent, deviennent plus volumineuses et ont une vitesse de sédimentation plus élevée. Le dernier type de sédimentation se produit lorsqu'il y a une concentration en matières solides élevée et où la vitesse de sédimentation est reliée à la concentration plutôt qu'à la taille des particules⁽²⁰⁾.

3.1.1 Sémentation diluée

La décantation d'une particule non floculée dans une suspension diluée peut être décrite par l'emploi des lois classiques de la sémentation établies par Newton et Stokes. Considérant une particule seule, la vitesse de sémentation de cette dernière sera uniquement fonction des propriétés du fluide qui l'entoure et des caractéristiques de la particule. La Figure 3.1 illustre les trois forces régissant la particule ; F_g (force gravitationnelle), F_b (force de flottabilité) et les F_f (force de friction).

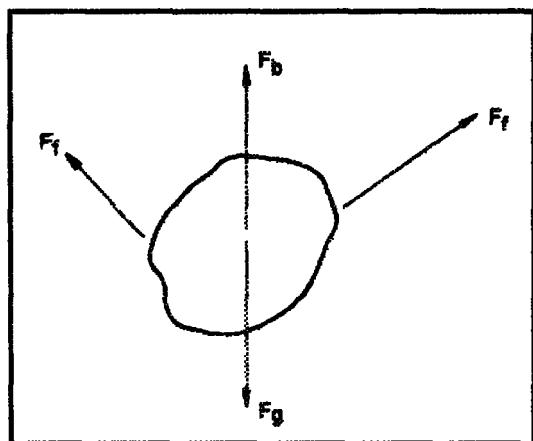


Figure 3.1 - Forces influençant la vitesse de sémentation d'une particule

L'équation générale du mouvement d'une petite particule solide dans un liquide peut être obtenue en appliquant la seconde loi de Newton⁽²⁰⁾⁽²²⁾⁽²⁴⁾ :

$$m \frac{d\nu_s}{dt} = F_g - F_b - F_f \quad (3-1)$$

où ν_s est la vitesse de sémentation de la particule, m est la masse de la particule et t le temps.

La force de gravité agissant sur la particule peut se définir comme suit :

$$F_g = \rho_{particule} \times Vol \times g \quad (3-2)$$

où $\rho_{particule}$ est la densité de la particule, Vol le volume de la particule et g est l'accélération gravitationnelle.

La force de flottabilité due à la poussée d'Archimède s'exprime comme suit :

$$F_b = \rho_{fluide} \times Vol \times g \quad (3-3)$$

où ρ_{fluide} est la densité du fluide.

La force de friction (ou de traînée) est fonction des différents paramètres de la particule tels que la taille, la forme et la vitesse de la particule ainsi que la densité et la viscosité du fluide. Elle se décrit comme suit :

$$F_f = \frac{C_d \times A \times \rho_{fluide} \times v_s^2}{2} \quad (3-4)$$

où C_d est le coefficient de traînée qui est fonction du nombre de Reynolds et de la forme de la particule et où A est l'aire projetée d'une particule dans la direction de l'écoulement. En substituant l'équation (3-2), (3-3) et (3-4) dans l'équation (3-1), il est possible d'obtenir une expression pour le comportement dynamique de la particule :

$$m \frac{dv_s}{dt} = g(\rho_{particule} - \rho_{fluide})Vol - \frac{C_d \times A \times \rho_{fluide} \times v_s^2}{2} \quad (3-5)$$

Lorsqu'une particule est introduite dans un fluide, cette dernière accélère jusqu'à ce que les forces de friction et de flottabilité exercées par le fluide soient en équilibre avec les forces gravitationnelles sur la particule. Par la suite, la vitesse de sédimentation de la particule est constante et l'accélération devient nulle. Cette vitesse est dite vitesse de sédimentation terminale. En simplifiant, l'équation (3-5) devient :

$$v_s = \left(\frac{2g(\rho_{particule} - \rho_{fluide}) \times Vol}{C_d \times \rho_{fluide} \times A} \right)^{1/2} \quad (3-6)$$

Si la particule est sphérique et que le diamètre de celle-ci est d , alors le volume et l'aire de la particule deviendront :

$$Vol = \frac{\pi d^3}{6} \quad \text{et} \quad A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3-7)$$

Il devient possible de simplifier le terme Vol/A de l'équation (3-6) et l'équation générale de la vitesse de sédimentation est résolue comme suit :

$$v_s = \left(\frac{4g(\rho_{particule} - \rho_{fluide})d}{3C_d \rho_{fluide}} \right)^{1/2} \quad (3-8)$$

Le nombre de Reynolds qui caractérise la nature du débit autour de la particule se définit comme suit :

$$Re = \frac{d\rho_{fluide}v_s}{\mu} \quad (3-9)$$

où μ est la viscosité du fluide et d le diamètre de la particule.

Le coefficient de traînée C_d caractérise la résistance qu'oppose un fluide à un corps en mouvement par rapport à ce fluide. Comme il a été mentionné, le coefficient de traînée est fonction du nombre de Reynolds et de la forme de la particule mais il peut aussi être exprimé comme étant le ratio de τ , force par unité de surface de la particule, mesurée perpendiculairement à la direction du mouvement, par rapport à l'énergie cinétique du liquide.

$$C_d = \frac{2\tau}{\rho_{fluide} V_s^2} \quad (3-10)$$

La valeur du coefficient de traînée diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Différents travaux⁽²⁰⁾⁽²²⁾⁽²⁴⁾ ont permis d'établir des équations pour décrire la relation entre C_d et Re . Ainsi, pour un nombre de Reynolds inférieur à 1, la relation peut être approximée comme $C_d \approx 24/Re$. Cette approximation provient de la résolution des équations de Navier-Stokes qui décrivent le comportement d'un élément infinitésimal dans un fluide incompressible. Pour $1 < Re < 10^3$, C_d équivaut à :

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad (3-11)$$

Pour des valeurs de Re entre 10^3 et 10^5 , la valeur de C_d est constante à 0,44. Cependant, la valeur de C_d chute brusquement à 0,1 lorsque Re atteint 10^5 . Cette baisse de la valeur de C_d s'explique par le changement du régime d'écoulement autour de la particule sphérique qui passe de laminaire à turbulent.

En générale, dans une sédimentation diluée, le nombre de Reynolds est habituellement inférieur à 1. Ainsi, en remplaçant C_d par la relation 24/Re dans l'équation (3-8), la vitesse de sédimentation de la particule devient :

$$v_s = \frac{g}{18\mu} (\rho_{particule} - \rho_{fluide}) d^2 \quad (3-12)$$

Cette équation est connue comme étant la loi de Stokes appliquée à des particules sphériques. Il y a deux restrictions à l'applicabilité de la loi de Stokes. La première restriction concerne les effets de la concentration qui doivent être faibles afin que le comportement de sédimentation des particules ne soit pas affecté par la présence des particules voisines. La seconde restriction concerne le nombre de Reynolds qui devrait être inférieur à 0,2. Si ces deux conditions sont respectées, la sédimentation est appelée sédimentation libre et l'équation (3-12) peut être utilisée. La sédimentation libre est caractérisée par une interface non distincte entre les solides qui sédimentent et le liquide surnageant (suspension nuageuse qui s'éclaircie avec le temps) et par une couche de sédiment à la base du récipient. Lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 0,2 mais inférieur à 1, le coefficient de traînée est exprimé par la loi de Newton :

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re\right) \quad (3-13)$$

3.1.2 Sédimentation par flocculation

La sédimentation par flocculation consiste à la formation d'agrégats de différentes tailles et de vitesses de sédimentation variables suite aux collisions de particules. Des agents de flocculation peuvent être ajoutés à la suspension pour aider à la flocculation. Ce

type de sédimentation est privilégié par les procédés de séparation industriels puisqu'il permet de réduire le temps de sédimentation. Plusieurs facteurs influencent la flocculation tels que : la profondeur du bassin de sédimentation, le gradient de vitesse dans le système, la concentration de particules, le type de floculant utilisé et bien d'autres⁽²²⁾.

Pour le moment, il n'existe pas de modèle théorique adéquat qui permet de prédire le taux de flocculation dans une suspension⁽²²⁾⁽²⁴⁾. Des essais de sédimentation par flocculation en laboratoire sont nécessaires afin de caractériser le comportement de la suspension à l'étude.

3.1.3 Sédimentation retardée

En général, la sédimentation varie en fonction de l'augmentation de la concentration⁽²⁰⁾. Lorsque cette dernière est suffisamment élevée, les particules ne sédimentent plus de façon individuelle et de ce fait s'influencent les unes les autres (les particules commencent à interagir entre elles). Conséquemment, les particules individuelles passent ainsi dans une zone de transition où se forme des agrégats. À partir d'une certaine concentration, les agrégats sédimentent en masse, formant une interface (ligne de boue) entre le liquide claire surnageant et les particules solides qui sédimentent. Ce type de sédimentation, nommée sédimentation retardée, est observé dans les essais en test du cylindre. À titre d'exemple, le test du cylindre est utilisé dans les industries de l'aluminium afin d'étudier la flocculation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. La Figure 3.2 présente les phases de sédimentation en test du cylindre ainsi qu'une analogie

avec la théorie de Kynch (variation de la hauteur de l'interface en fonction du temps) (théorie de Kynch⁽¹⁴⁾).

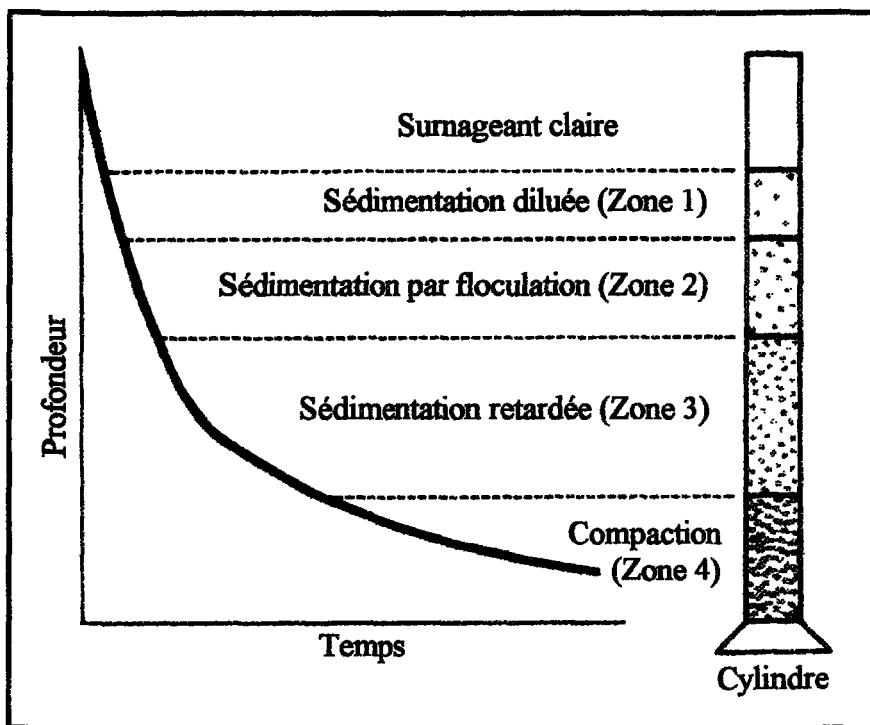


Figure 3.2 - Schéma des phases de sédimentation en test du cylindre

Ainsi, la zone 1 de la Figure 3.2 représente la sémentation diluée où les particules sédimentent librement. La zone 2 schématise la sémentation par floculation où les particules commencent à s'agglomérer entre elles par collision. La zone 3 se rapporte à la sémentation retardée où, considérant la quantité de particules, il se forme une interface entre le liquide surnageant et le solide qui sédimente. Lors de la sémentation, une couche de particules commence à se former à la base du cylindre. Les particules dans cette région sont physiquement très proches les unes des autres. Au fur et à mesure de la sémentation,

d'autres couches de sédiment s'accumuleront successivement. La concentration en solide des couches varie en fonction de leur emplacement ; ainsi, les couches les plus concentrées se retrouvent au fond du cylindre et les couches de faibles concentrations se situent sur la partie supérieure du sédiment. Par conséquent, la zone de compression (zone 4) est l'endroit où le poids des particules des couches supérieures compresse les couches inférieures.

Chacune des zones est reportée sur la courbe d'un graphique qui illustre le changement de type de sédimentation dans un cylindre en fonction du temps. C'est la théorie de Kynch⁽¹⁴⁾ qui est utilisée pour décrire les phénomènes de sédimentation apparaissant en test du cylindre. Cette dernière stipule que la vitesse de sédimentation d'une couche de particules est uniquement fonction de sa concentration et ne dépend pas des couches amont ou aval, ainsi :

$$S = U \times C \quad (3-14)$$

où S est défini comme étant le flux de particules, U la vitesse de sédimentation d'une couche de particule et C la concentration des solides.

3.2 Les techniques de traitement préliminaire

Les matières en suspension sont généralement constituées de particules solides de tailles variables. Les plus grandes vont sédimerter par gravité dans un temps respectable. Par contre, les plus petites particules, telles que les colloïdes, sédimereront beaucoup trop lentement pour des opérations industrielles. La présence de colloïdes dans la suspension influencera donc la performance du procédé mais aussi la qualité du produit de fabrication. C'est pourquoi l'utilisation de techniques de traitement préliminaire à la sédimentation, comme la flocculation et la coagulation, permet de modifier le comportement du système afin de faciliter la séparation solide/liquide.

3.2.1 Stabilité des suspensions colloïdales

Le terme colloïde est généralement employé pour caractériser les particules plus petites que $1\mu\text{m}$. Ces petites particules peuvent provenir de différents types de matériaux tels que les argiles, les sables, les limons et bien d'autres. Le temps de décantation de ces particules est calculé par la loi de Stokes⁽²⁰⁾⁽²²⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾. Cette loi régit le mouvement d'une particule dans un fluide par une balance des forces agissant sur la particule sphérique (voir équation 3-12). Étant donné que la vitesse de sédimentation des particules est proportionnelle au carré de leur diamètre (plus la particule est petite plus le temps de décantation est long), il est facile de concevoir que l'agglomération de deux particules pourrait faciliter la séparation solide/liquide. Le tableau 3.1 présente la variation du temps de décantation en fonction de la taille de la particule.

| Diamètre de particule | | | Type de particule | Temps de décantation pour 1 m d'eau | Surface spécifique $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ |
|-----------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------------------------|---|
| mm | μm | A° | | | |
| 10 | 10^4 | 10^8 | Gravier | 1 seconde | $6 \cdot 10^2$ |
| 1 | 10^3 | 10^7 | Sable | 10 secondes | $6 \cdot 10^3$ |
| 10^{-1} | 10^2 | 10^6 | Sable fin | 2 minutes | $6 \cdot 10^4$ |
| 10^{-2} | 10^1 | 10^5 | Argile | 2 heures | $6 \cdot 10^5$ |
| 10^{-3} | 1 | 10^4 | Bactérie | 8 jours | $6 \cdot 10^6$ |
| 10^{-4} | 10^{-1} | 10^3 | Colloïde | 2 ans | $6 \cdot 10^7$ |
| 10^{-5} | 10^{-2} | 10^2 | Colloïde | 20 ans | $6 \cdot 10^8$ |
| 10^{-6} | 10^{-3} | 10 | Colloïde | 200 ans | $6 \cdot 10^9$ |

Tableau 3.1 - Temps de décantation de différentes particules

Ce tableau indique également que plus la particule est petite, plus sa surface spécifique est grande. La surface spécifique est la surface totale des grains de matières contenues dans la particule (m^2/m^3) (volume réel).

Il est par conséquent très difficile de décanter de façon naturelle (par gravité) les suspensions colloïdales. De plus, les phénomènes de surface jouent un rôle important dans la stabilité de ces suspensions⁽²⁶⁾. Ces phénomènes de surface s'expliquent par la rencontre de deux particules sphériques tel que démontré sur la Figure 3.3. Les particules de cette figure possèdent des charges résiduelles négatives. La charge résiduelle de la particule peut être positive ou négative mais, dans la nature, les particules sont souvent chargées négativement (cas de la bauxite). L'origine de cette charge peut provenir d'adsorption préférentielle d'ions petits et fortement polarisables, d'une ionisation des groupes chimiques sur la paroi de la particule ou d'ions formés par réaction entre la particule et le liquide⁽²⁵⁾⁽²⁷⁾.

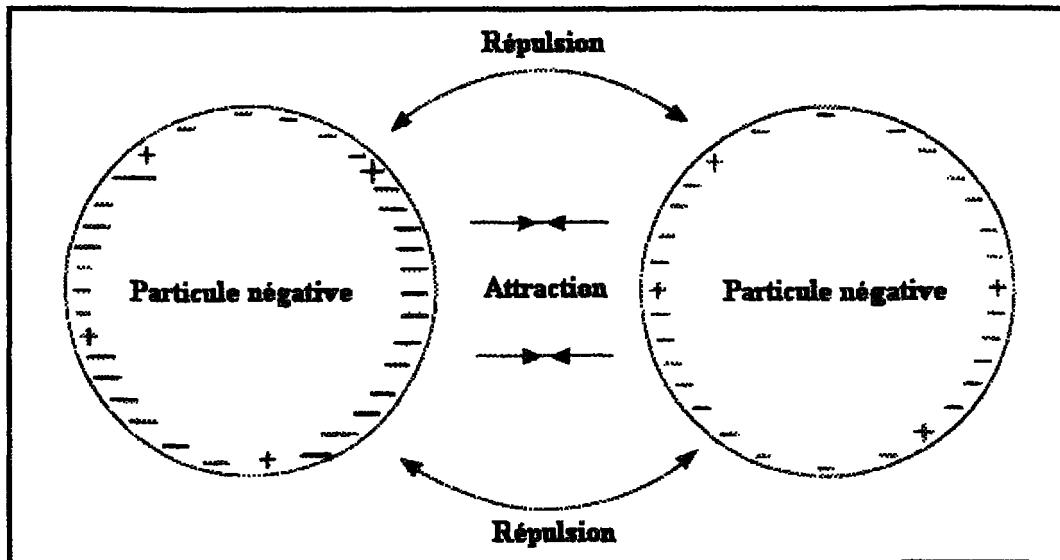


Figure 3.3 - Rencontre de deux particules de même signe

Il y a deux types de force qui influencent la particule. Les forces d'attraction, telles que les forces de London et Van der Waals qui sont de courte portée. Si deux particules viennent en contact, elles s'agglomèrent en un flocon stable qui se comporte comme une particule unique. Ces forces sont liées à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu (E_A)⁽²⁹⁾. Le second type de force agissant sur les particules colloïdales représente les forces de répulsion électrostatique. Ces forces sont liées aux charges superficielles des colloïdes (E_B) et sont principalement responsables de la stabilité des suspensions colloïdales. Conséquemment, la stabilité d'une suspension colloïdale dépend donc du bilan (E) des forces d'attraction et de répulsion :

$$E = E_A + E_B \quad (3-15)$$

Cette relation est schématisée sur la Figure 3.4.

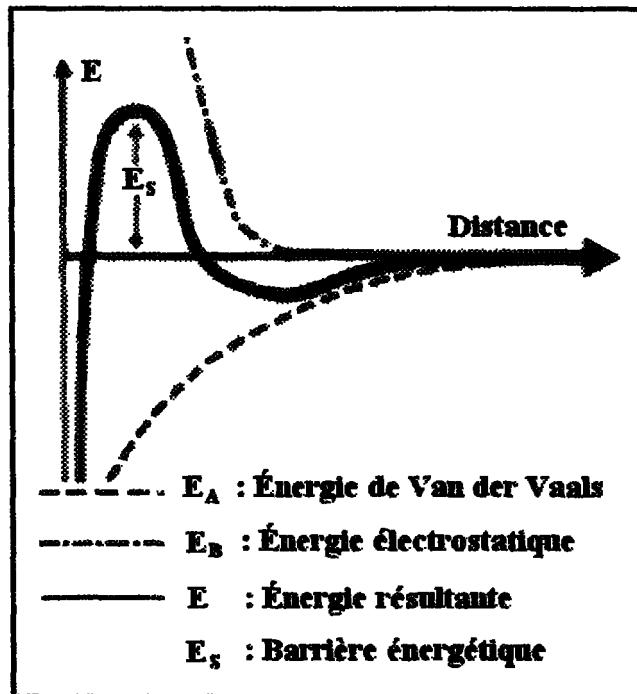


Figure 3.4 - Stabilité d'une suspension colloïdale

Ainsi, comme la portée des forces d'attraction et de répulsion est différente, leur résultante passe généralement par un maximum répulsif, appelé barrière d'énergie (E_s). Si l'énergie résultante (E) dépasse la barrière d'énergie (E_s), la suspension est déstabilisée. Pour y parvenir, il faut donc diminuer les forces de répulsion électrostatique entre les particules.

3.2.2 Théorie de la double couche

Afin de neutraliser la charge négative de la particule, les ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde. Diverses théories ont

été avancées pour décrire le comportement de la double couche et sont représentées à la Figure 3.5⁽²⁶⁾.

- **Théorie de Helmholtz** : propose qu'une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche adhérente).
- **Théorie de Gouy-Chapman** : la couche d'ions positifs est intégralement répartie autour du colloïde; la neutralité est obtenue à une plus grande distance (couche diffuse).
- **Théorie de Stern** : rassemble les deux précédentes théories et considère la formation d'une double couche. La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement. La seconde couche est plus diffuse, avec une diminution plus lente du potentiel.

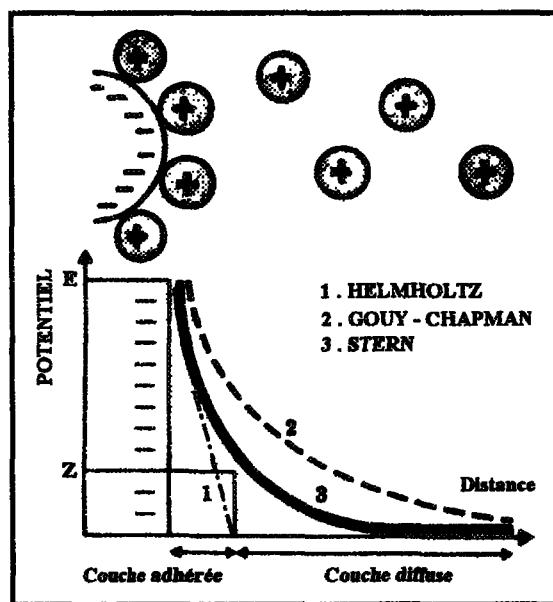


Figure 3.5 - Théorie de la double couche

La Figure 3.6 illustre la double couche autour d'une particule sphérique. Ainsi, la particule est entourée d'une première couche d'ions de signe contraire, nommée couche de Stern. Par la suite, la couche devient plus diffuse due à l'agitation thermique. Cette couche déformable et mobile est constituée de contre-ions qui vont se raréfier en fonction de la distance (couche de Gouy). Tout autour de ces deux couches se retrouve la masse du liquide.

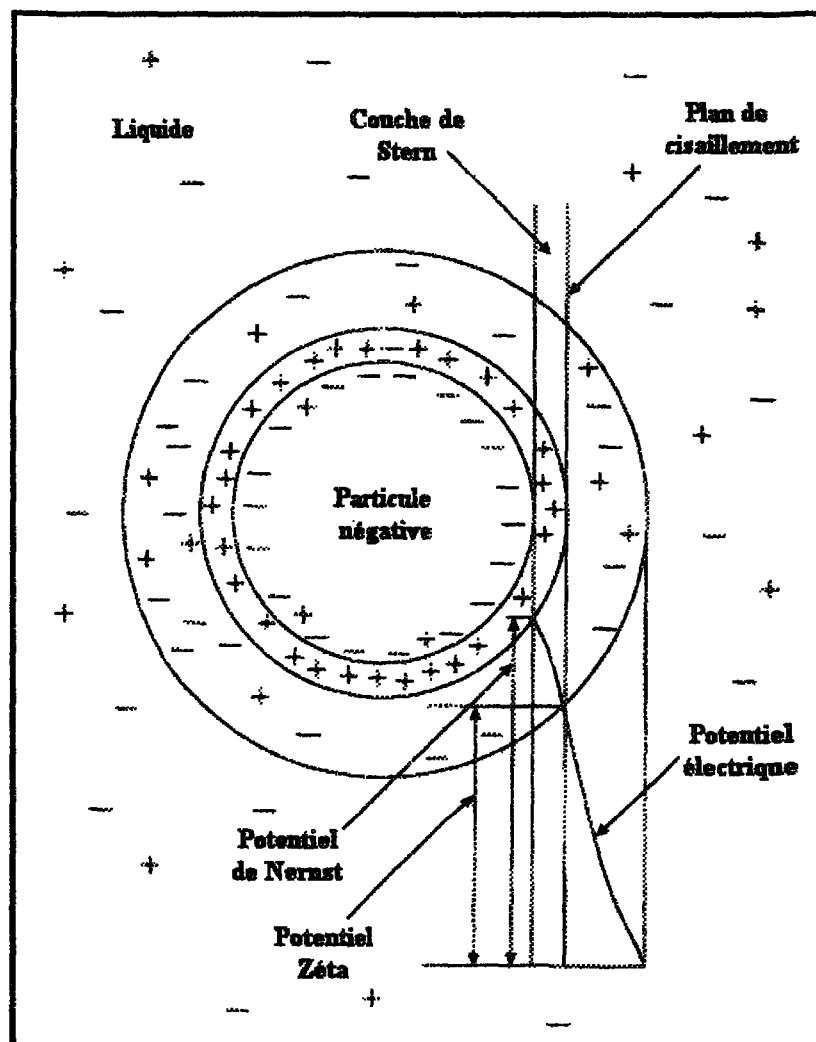


Figure 3.6 - Schématisation de la double couche

3.2.2.1 Potentiels Zéta et Nernst

Certains potentiels peuvent être identifiés sur la Figure 3.6. En effet, le colloïde se caractérise par la présence de deux potentiels de surface. Tout d'abord, la couche de cisaillement, qui est le plan de glissement entre la double couche et le médium liquide (situé dans la couche diffuse) ainsi,

- **Le potentiel Zéta (ζ)** est le potentiel existant à la surface du plan de cisaillement. Il peut également être nommé potentiel électrocinétique.
- **Le potentiel de Nernst** est le second potentiel qui existe entre le plan de cisaillement et la surface solide du colloïde. Ce potentiel de surface peut également être nommé comme potentiel thermodynamique.

Le potentiel Zéta est très important et il peut être mesuré par différentes techniques comme l'électrophorèse. La valeur de ce potentiel ζ est utilisée pour caractériser la stabilité de la suspension. En effet, ce dernier régit le déplacement des colloïdes et leur interaction mutuelle⁽²⁶⁾. L'équation (3-16) permet de calculer la valeur de ζ grâce à une mesure d'électrophorèse.

$$me = \frac{\varepsilon \zeta}{cte \mu} \quad (3-16)$$

où me est la mobilité électrophorétique, ε la constante diélectrique du milieu, μ la viscosité dynamique et cte prend la valeur de 4 ou 6 suivant les hypothèses.

La Figure 3.7 illustre la variation du potentiel en fonction de son emplacement autour du colloïde telle que schématisée à la Figure 3.6. Dans la couche fixe de Stern, le potentiel décroît linéairement, puisque les ions y sont empilés uniformément⁽²⁷⁾. Dans la couche diffuse de Gouy, la décroissance du potentiel suit la loi de Poisson. À la limite entre les deux couches règne le potentiel de Stern.

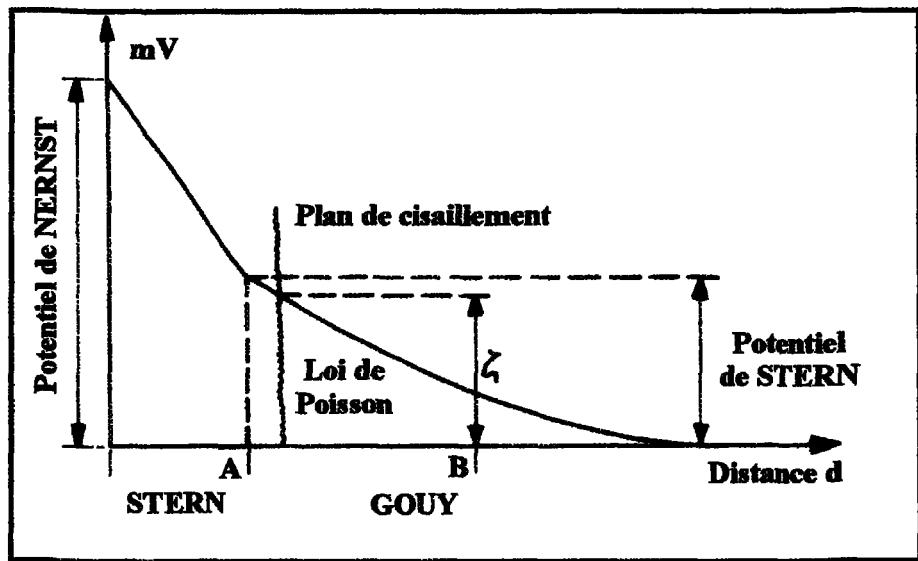


Figure 3.7 - Schématisation de la variation du potentiel en fonction de l'emplacement autour de la particule

Un peu plus loin dans la couche diffuse existe un plan de cisaillement délimitant la zone de déformabilité, et où règne le potentiel ζ ⁽²⁷⁾. La valeur de ce potentiel peut varier mais lorsque ζ est près de zéro (0 ± 5 mV), la suspension commence à être instable et le liquide va se clarifier par coagulation.

3.2.3 Agrégation

Le processus d'agrégation résulte de collisions entre les particules suite à la diminution des charges sur celles-ci. Les énergies cinétiques nécessaires aux collisions des particules peuvent être obtenues spontanément par mouvement Brownien et par sédimentation différentielle, lorsqu'une grosse particule rattrape dans sa chute une particule plus lente. Elles peuvent également être communiquées délibérément aux particules par gradient de vitesse. La Figure 3.8 illustre les trois principaux types de collision entre les particules.

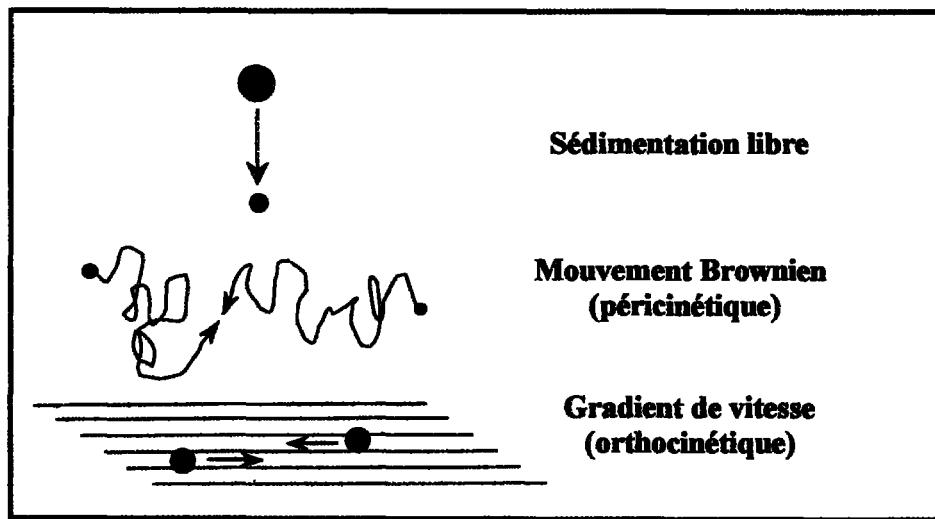


Figure 3.8 - Mécanismes de collision des particules

3.2.3.1 Agrégation par mouvement brownien

Lorsque les particules ont été préalablement déstabilisées au point de vue électrique, elles peuvent floculer grâce à l'énergie des chocs browniens, qui ont lieu dans toutes les directions. Le mouvement brownien est un mouvement saccadé aléatoire des molécules en

suspension dans un fluide. Ainsi, le mouvement brownien peut rapprocher suffisamment certaines particules pour permettre aux forces attractives de surface de lier ensemble ces particules en petits agglomérats. L'agrégation (floculation ou coagulation) est dite péricinétique lorsqu'elle est seulement induite par le mouvement brownien. Selon la théorie de Smoluchowski⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾, la vitesse d'agrégation péricinétique ou variation du nombre de particules au cours du temps est donnée par :

$$-\frac{dn}{dt} = \alpha \frac{4kT}{3\mu} n^2 \quad (3-17)$$

où n est le nombre de particules par unité de volume, α la fraction des chocs efficaces, k la constante de Boltzmann, T la température absolue et μ la viscosité du fluide. Ce type d'agrégation n'intervient que pour de petites particules dont la taille est inférieure à 1 micron.

3.2.3.2 *Agrégation par gradient de vitesse*

L'agitation d'une suspension peut provoquer l'augmentation du taux d'agrégation. Ainsi, lorsque le contact entre les particules est dû au mouvement du fluide (présence d'un gradient de vitesse), l'agrégation (floculation ou coagulation) est dite orthocinétique.

3.2.3.2.1 *Régime laminaire*

Le gradient de vitesse ou taux de cisaillement (taux de variation de vitesse par unité de longueur (voir section 4.1.1.2.)) varie en fonction de la vitesse de l'écoulement. Pour un écoulement laminaire, la vitesse d'agrégation orthocinétique est :

$$-\frac{dn}{dt} = \alpha \frac{4}{3} n^2 G d^3 \quad (3-18)$$

où G est le gradient de vitesse ou taux de cisaillement et d le diamètre de la particule.

3.2.3.2.2 *Régime turbulent*

Dans un milieu turbulent, la dissipation d'énergie se fait par une cascade de tourbillons de plus en plus petits, jusqu'à la dissipation finale en chaleur dans les petits tourbillons, qui n'ont plus de direction et sont isotropes. Ces petits tourbillons se divisent en microtourbillons de dissipation visqueuse et en tourbillons plus gros de convection par inertie. La limite entre les deux est appelée échelle de microturbulence de Kolmogoroff⁽²⁷⁾. Ainsi, les particules sont entraînées dans les tourbillons qui sont plus grands qu'elles. Pour qu'il y ait agrégation, il faut des collisions, donc un mouvement relatif des particules ; les deux particules ne doivent pas être dans le même tourbillon.

Le taux d'agrégation des particules dans les écoulements turbulents est beaucoup plus complexe qu'en écoulement laminaire. Plusieurs modèles ont été proposés; cependant, l'équation (3-18) est toujours applicable, mais la valeur du gradient de vitesse doit être

adaptée à l'écoulement turbulent. Le gradient de vitesse est donc un paramètre important agissant sur la probabilité de rencontre des particules. Il n'est pas possible de l'augmenter indéfiniment. En effet, pour des valeurs trop élevées de G , l'agrégat formé subit un cisaillement mécanique entraînant sa destruction. Conséquemment, il y a une gamme de gradient de vitesse ou taux de cisaillement qui favorise l'agrégation des particules.

3.2.4 La coagulation

Il a déjà été mentionné que les particules d'une suspension sont principalement chargées négativement et se repoussent entre elles, causant ainsi la stabilité de la suspension. La coagulation est le processus par lequel les particules en suspension sont déstabilisées par l'ajout d'un réactif chimique (coagulant), pour former des agrégats qui sédimentent à une vitesse satisfaisante. Il existe trois principaux types de coagulation :

- **La coagulation électrostatique (compression de la double couche)** consiste à diminuer les forces de répulsion électrostatiques, provoquées par l'ajout d'électrolytes, qui compriment le nuage ionique autour de la particule.
- **La coagulation par adsorption (*neutralisation de charge*)** d'ions de signe contraire, fortement chargés, qui diminuent le potentiel à la limite de la couche de Stern.
- **La coagulation par entraînement**, pour les suspensions diluées dont les particules sont captées et entraînées dans un précipité de formation rapide.

3.2.4.1 Coagulation électrostatique (compression de la double couche)

Ce type de coagulation consiste à ajouter des électrolytes à la suspension afin d'augmenter la force ionique et ainsi dissiper les forces de répulsion par compression de la double couche. Lorsque l'épaisseur de la double couche est suffisamment petite, les particules peuvent s'approcher assez près les unes des autres pour que les forces d'attraction de Van der Waal puissent causer l'agrégation. L'épaisseur δ de la double couche se définit comme suit :

$$\delta = 0,33 \times 10^{-2} \left(\frac{\epsilon}{I} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-19)$$

où I est la force ionique de la solution et ϵ la constante diélectrique de la solution. Lorsque l'épaisseur δ de la double couche diminue, le potentiel ζ diminue également (équation (3-16)) facilitant l'agrégation des particules.

3.2.4.2 Coagulation par adsorption (neutralisation de charge)

Les produits adsorbés sont soit les ions mêmes du coagulant, soit leurs produits de réaction avec le milieu liquide. La coagulation adsorpitive est nettement plus efficace que la coagulation électrostatique. Ainsi, l'adsorption électrostatique d'ions de signe contraire neutralise les particules. L'adsorption se produit dans la couche de Stern; ainsi, la charge à l'extérieur de la couche de cisaillement est réduite, ce qui diminue le potentiel de surface. Cependant, une concentration élevée de coagulant peut résulter à une réversion de charge, due à l'adsorption excessive d'ions, ayant pour résultat de restabiliser les colloïdes⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾.

3.2.4.3 *Coagulation par entraînement*

Ce processus concerne les suspensions tellement diluées que les conditions cinétiques pour la coagulation sont défavorables (nombre de chocs trop réduit). Le potentiel ζ n'est ici d'aucune considération⁽²⁷⁾. Lorsqu'une quantité importante de coagulant est ajoutée à la solution, de larges agrégats peuvent se former et sédimerter⁽²⁸⁾. Au fur et à mesure que les particules sédimentent, elles captent et entraînent les plus petites particules telles que les colloïdes. L'efficacité de ce type de coagulation dépend de la concentration en colloïdes et du dosage du coagulant. La coagulation par entraînement est beaucoup plus rapide que la coagulation par adsorption, mais elle fournit un agrégat moins compact et moins résistant.

3.2.5 La floculation

La floculation n'est qu'un cas particulier de la coagulation par adsorption, où le coagulant est un polyélectrolyte ou une macromolécule⁽²⁷⁾. Ainsi, le floculant est une molécule polymérique à longues chaînes portant de nombreux groupes chargés. Les floculants peuvent être d'origine naturelle ou synthétique. Il est possible de les classer selon leur poids moléculaire et leur densité de charge. Il existe trois principales classes de floculant : les non-ioniques, anioniques et cationiques. Le choix d'un polymère est influencé par les caractéristiques de la boue, la distribution de particule et le pH de la suspension⁽²⁵⁾.

La floculation optimale des particules se produit lorsque $\pm 50\%$ de la surface des particules est couverte par le polymère. La seconde moitié de l'aire non couverte par le polymère est ainsi disponible pour permettre à d'autres particules d'être adsorbées et de former des ponts. L'emploi d'un polymère à poids moléculaire élevé et de faible densité est une condition favorisant la floculation. Si le poids moléculaire du polymère est insuffisant, les chaînes (molécules) sont courtes, la molécule ne peut pas s'étendre dans la solution et il n'y a pas de ponts entre les particules (pontage inter-particulaire section 3.2.5.2). Par ailleurs, un polymère à faible poids moléculaire et de forte densité de charge a tendance à s'adsorber à plat sur la particule. Il laisse alors des zones non neutralisées et la surface finale est une mosaïque de zones positives et négatives (neutralisation de charge section 3.2.5.1). Deux particules peuvent alors se neutraliser et floculer. La Figure 3.9 illustre la distinction entre une mosaïque ou le pontage inter-particulaire.

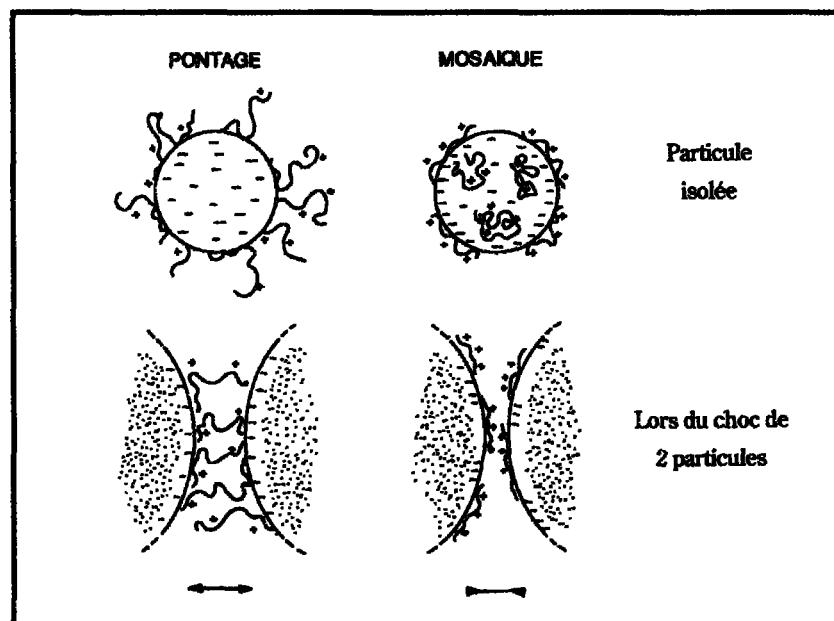


Figure 3.9 - Floculation par pontage et par mosaïque

3.2.5.1 Neutralisation de charge

Ce mécanisme de flocculation consiste à déstabiliser les particules en suspension par une neutralisation des charges sur les particules. Contrairement à la coagulation par adsorption (section 3.2.4.2), les charges sont neutralisées par un groupement actif du polyélectrolyte. Ce groupement doit être de signe opposé aux charges sur la particule (polymère anionique ou cationique). L'adsorption du polyélectrolyte se fait de façon aléatoire formant ainsi une mosaïque de zones positives et négatives sur la particule. Ainsi, lorsque deux particules se rencontrent, les sites non neutralisés d'une particule se lient aux sites neutralisés d'une autre particule pour former des agrégats (flocs). Ce mécanisme d'interaction peut agir simultanément avec le mécanisme de pontage inter-particulaire.

3.2.5.2 Pontage inter-particulaire

Le pontage inter-particulaire consiste en la formation de ponts ou de série de ponts entre les particules. En effet, pour être efficace, la molécule de polymère doit contenir un groupement fonctionnel capable d'interagir avec la surface de la particule colloïdale⁽²⁰⁾⁽²⁹⁾. Ainsi, lorsque le polymère vient en contact avec la particule, certains de ces groupements s'adsorbent à la surface de la particule, laissant le reste de la molécule étendue dans la solution. Si une seconde particule entre en contact avec cette molécule étendue (polymère), il se produit un complexe particule-polymère-particule où le polymère agit comme un pont entre les particules. Les liens inter-particulaires augmentent la taille des flocs favorisant ainsi une sédimentation plus rapide. La Figure 3.10 illustre l'adsorption d'une molécule de polymère sur la surface d'une particule.

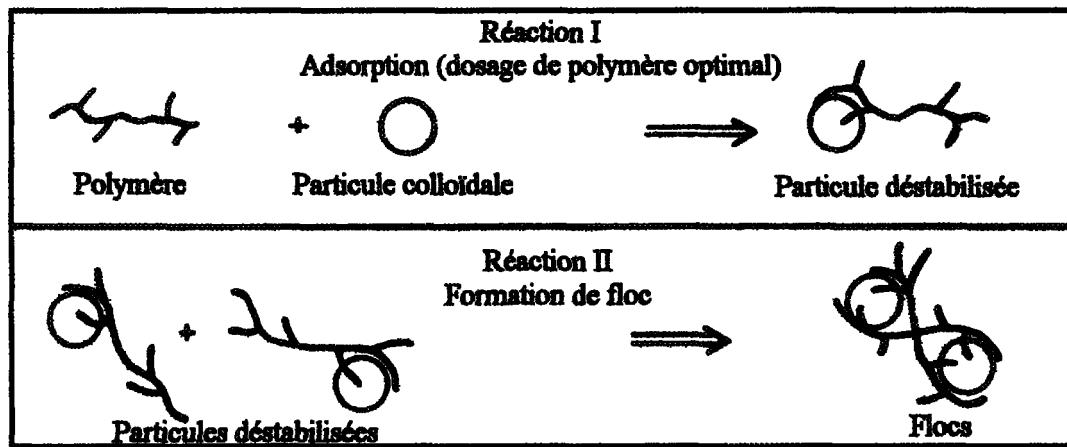


Figure 3.10 - Ponts entre particules

3.2.5.3 Étapes de réaction de la floculation

La floculation peut être considérée comme une séquence d'étapes de réaction⁽¹²⁾.

Initialement, les molécules (chaînes) de polymère se lient avec les particules en suspension. Par la suite, ces particules activées s'agglomèrent avec d'autres particules activées, grâce aux molécules de polymère, pour former des microflocs. Les flocs sont ensuite formés par l'association de ces microflocs. Un niveau d'agitation adéquat est nécessaire pour permettre la formation de ces flocs. L'agitation permet de disperser le polymère à travers la suspension afin d'augmenter le taux de collision entre les particules. Par contre un niveau d'agitation trop élevé entraîne une diminution de la taille des flocs (bris des plus gros flocs). Donc, un taux de cisaillement optimal, pour un dosage et une concentration donnés, exprime un état d'équilibre entre la formation et la désagrégation des flocs⁽¹²⁾.

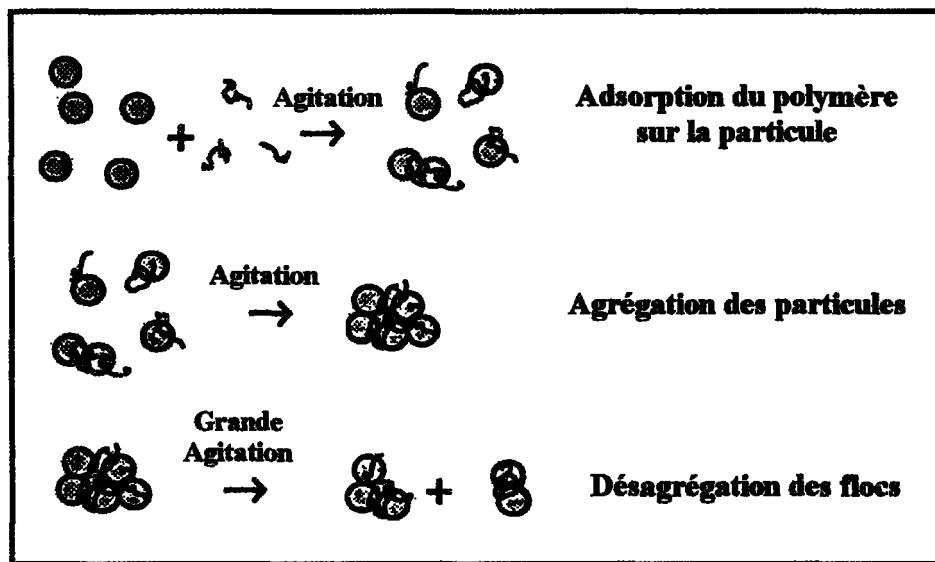


Figure 3.11 - Étapes de la flocculation

3.2.5.4 Facteurs influençant la flocculation

Plusieurs facteurs peuvent influencer la flocculation tels que le pH, la turbidité, le type de floculant, la température, les conditions de mélange et bien d'autres. Le pH est cependant l'un des facteurs les plus importants puisqu'il affecte les caractéristiques du système polymère-suspension. Par exemple, la valeur du pH influence le signe et la magnitude des charges de surface des particules. Conséquemment, l'influence du pH est très appréciable sur le mécanisme d'adsorption du polymère.

De plus, pour certains systèmes, il a été démontré que la dose optimale de polymère diminue lorsque le pH s'éloigne du point isoélectrique (pH correspondant à la charge nette nulle). En général, la présence de nombreuses charges de surface entrave l'adsorption du polyélectrolyte possédant des charges de même signe, mais améliore dans le cas des

charges opposées. Une très grande quantité de charges de surface pourrait même empêcher les collisions particulières. Cependant l'augmentation de la quantité de polymère adsorbée sur les particules peut contrer l'effet de la répulsion⁽²⁰⁾.

La présence de certains ions produit une diminution du potentiel à l'interface solide/liquide qui en retour provoque une diminution de la répulsion mutuelle permettant ainsi le pontage entre les particules et les molécules de polymère par les forces d'attraction d'où l'amélioration de l'efficacité de la flocculation⁽²⁰⁾⁽²⁴⁾. L'effet de certains sels sur la réaction globale est également relié à la contribution des charges présentes ainsi qu'à la configuration de la chaîne de polymère et à l'interaction entre cette chaîne et le solvant⁽¹⁾⁽²⁰⁾. Ainsi, dans certaines applications, un double système coagulation-flocculation peut être nécessaire pour atteindre une flocculation optimale.

3.2.5.4.1 Flocculation dans le procédé Bayer

Dans le procédé Bayer, la flocculation se fait sous des conditions particulières. En effet, la liqueur Bayer est hautement caustique, possède une force ionique très élevée et elle peut contenir une grande variété d'impureté. Généralement, les polymères à haut poids moléculaires sont utilisés pour floculer les suspensions de boues rouges et de liqueur Bayer. Les principaux floculants utilisés sont des copolymères d'acrylamide et d'acrylate de sodium (section 1.3.1). La principale fonction du groupement amide est de s'adsorber sur les particules au moyen de ponts hydrogène tandis que le groupement acrylate assure un bon étalement de la chaîne de polymère en solution. L'adsorption du polymère sur la

surface des particules dans ces conditions présente une situation particulière puisque les charges de surface des particules en suspension sont considérées négatives, due à la causticité élevée du milieu, et le polymère utilisé est généralement très anionique (peu de groupement amide). Ainsi, les particules et le polymère possèdent les mêmes charges. Des travaux de recherche⁽³⁰⁾⁽³¹⁾ ont démontré que l'adsorption d'un polymère anionique dans des conditions où le pH et la force ionique sont élevés est possible grâce à la présence des cations tels que le sodium. En effet, l'augmentation de NaCl (concentration en électrolyte) de la liqueur Bayer faciliterait l'adsorption du polyacrylate à pH élevé. Ainsi, les ions sodium s'adsorbent préférentiellement sur les particules de charges négatives, changeant la charge de surface et facilitant le pontage inter-particulaire. La Figure 3.12 illustre l'adsorption d'un polymère anionique sur une particule d'hématite grâce à la présence d'ions sodium (l'hématite est un constituant de la bauxite).

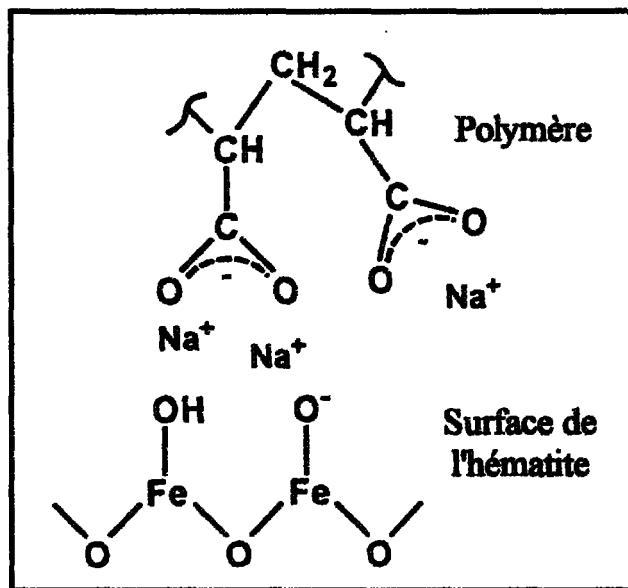


Figure 3.12 - Représentation schématique du mécanisme d'adsorption d'un floculant 100 % anionique sur la surface de l'hématite à pH élevé

CHAPITRE 4

MÉTHODES D'AGITATION DES SUSPENSIONS FLOCULÉES

Les méthodes d'agitation jouent un rôle important dans les procédés de séparation industriels puisqu'elles favorisent l'agrégation des particules en suspension diminuant ainsi le temps de sédimentation. Lorsqu'un gradient de vitesse induit par agitation aide à l'agrégation des particules, la floculation est dite orthocinétique (section 3.2.3.2). Différents modes d'agitation peuvent être utilisés pour aider à la floculation des suspensions. Par exemple, dans le test du cylindre le piston ou le nombre d'inversions du cylindre produit un gradient de vitesse. Dans le cadre du présent projet, deux types d'agitation ont été utilisés : l'agitation induite par un viscosimètre de type Couette et l'agitation induite par un système de conduites torsadées. Les notions d'écoulement et de cisaillement se rattachant à chacune de ces méthodes d'agitation seront discutées dans le présent chapitre.

4.1 Rappels théoriques

Certains rappels théoriques s'imposent pour aider à la compréhension des écoulements se produisant dans un appareil de Couette ou dans une conduite torsadée.

4.1.1 Loi fondamentale

Isaac Newton découvrit les lois fondamentales de la viscosité. Ces lois décrivent le comportement en écoulement d'un fluide idéal⁽³²⁾.

$$\tau = \mu * G \quad (4-1)$$

où τ est la contrainte de cisaillement, G le gradient de vitesse ou taux de déformation et μ la viscosité.

4.1.1.1 Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement ou seuil de cisaillement (shear stress) s'exprime comme étant les forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface (τ représente la force F par unité de surface A et il s'exprime en Pa)⁽³²⁾.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4-2)$$

4.1.1.2 Gradient de vitesse ou taux de déformation

Le taux de déformation ou de cisaillement (shear rate) est représenté par G (γ) et il se définit comme étant la diminution de la vitesse V le long d'une épaisseur donnée. Il se nomme également gradient de vitesse et il s'exprime en seconde⁻¹⁽³²⁾.

$$G = \frac{dV}{dy} \quad (4-3)$$

La Figure 4.1 schématise le taux de déformation (gradient de vitesse) entre deux plaques parallèles.

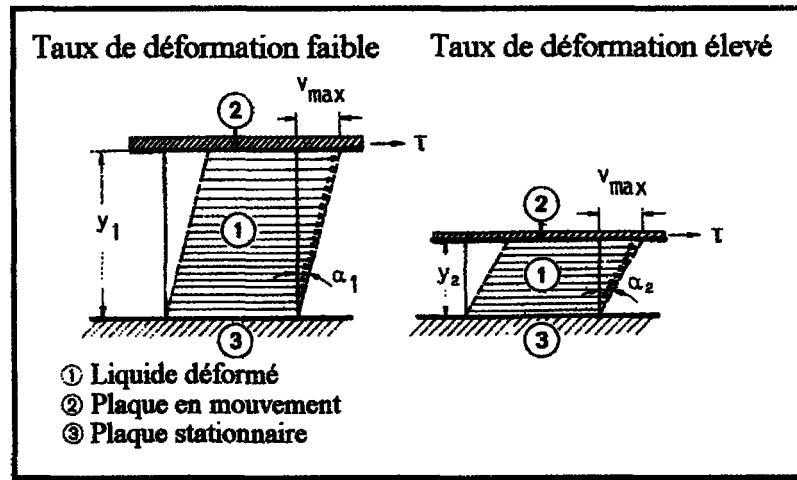


Figure 4.1 - Modèle de plaques parallèles illustrant la déformation du fluide

Le mouvement d'un fluide s'accompagne de la déformation de celui-ci, comme dans le cas d'un solide élastique. Ces déformations donnent lieu à un système de contraintes normales et tangentielles. Les contraintes normales correspondent aux efforts de pression, tandis que les contraintes tangentielles se reportent aux forces de friction existant entre les couches du liquide déformées. Généralement, les surfaces cisaillées sont perpendiculaires au gradient de vitesse G . La Figure 4.2 illustre une surface cisaillée dans un écoulement visqueux.

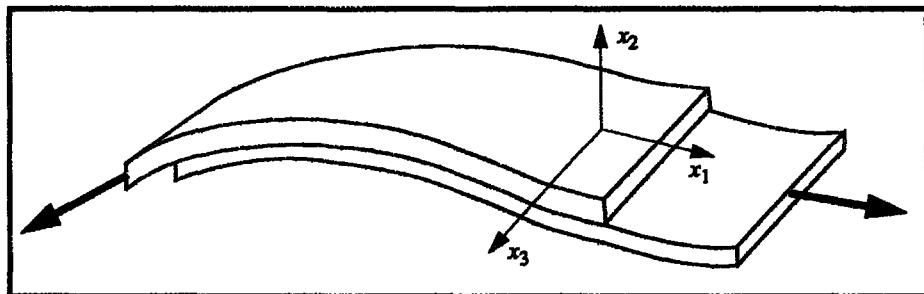


Figure 4.2 - Surfaces cisaiillées dans un écoulement visqueux

4.1.1.3 *Viscosité*

La viscosité dynamique μ quantifie la quantité de liquide déplacée par une contrainte de cisaillement (résistance du liquide à la déformation). La viscosité se définit comme étant le ratio entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse G et elle s'exprime en (Pa*s) :

$$\mu = \frac{\tau}{G} \quad (4-4)$$

4.1.2 Type de fluide

Il existe deux principaux types de comportement pour les fluides : newtonien et non newtonien. En voici une courte description.

4.1.2.1 *Fluide newtonien*

Un fluide a un comportement newtonien lorsque la contrainte de cisaillement τ augmente proportionnellement avec le gradient de vitesse G . Ce type de comportement a pour base la loi de Newton (équation 4-1) où la viscosité μ est considérée constante. Cette

loi n'est valable que pour un certain nombre de substances caractérisées par des structures de basse molécularité, comme l'eau par exemple.

4.1.2.2 *Fluide non newtonien*

Dans un fluide non newtonien, il n'existe pas de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse G . Dans ce cas, la viscosité dynamique μ dépend non seulement des propriétés thermodynamiques du fluide mais également de la viscosité dynamique apparente μ_a du milieu (valeur de la viscosité pour une température et un gradient de vitesse donné). Lorsque μ_a tend vers zéro, le fluide se comporte comme un fluide parfait (non visqueux).

Dans la plupart des cas, la connaissance d'une loi générale liant les contraintes τ aux gradients de vitesse G est trop complexe pour être explicitée. Il est alors permis d'utiliser des lois de comportement. Ces lois, qui sont d'origines expérimentales, ne sont valables que dans le domaine pour lequel elles ont été établies et ne doivent pas être extrapolées. La Figure 4.3 illustre les courbes d'écoulement qu'il est possible de rencontrer dans les fluides newtoniens et non newtoniens.

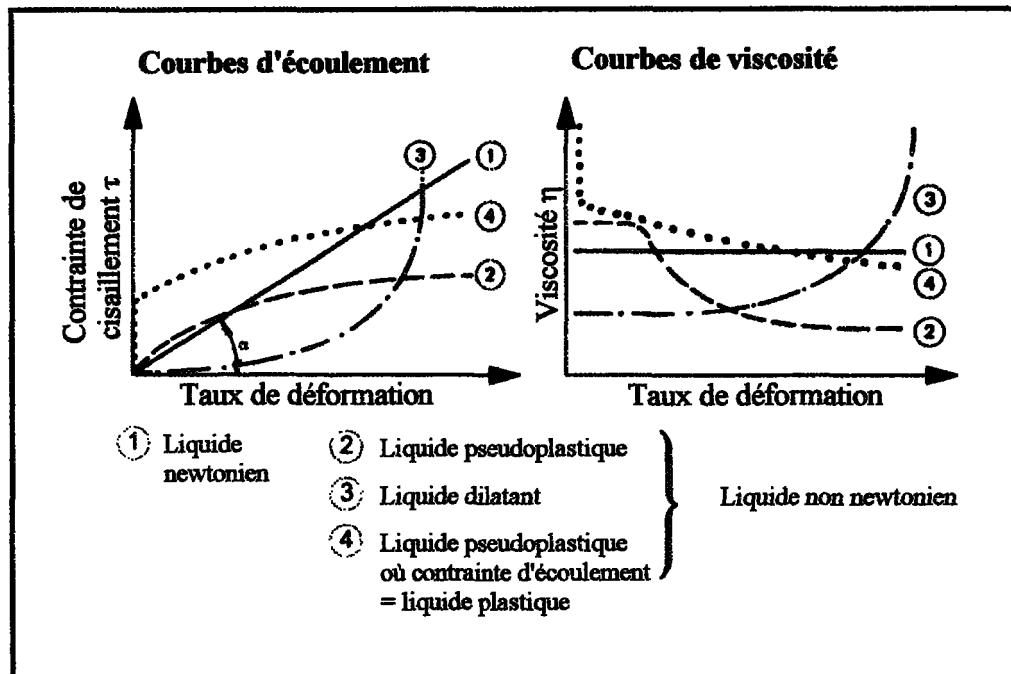


Figure 4.3 - Courbes d'écoulement pour différents types de matériel

4.1.2.3 Propriétés physiques du milieu

4.1.2.3.1 Liqueur Bayer

La liqueur Bayer est un fluide de nature visqueuse. Sa concentration en caustique varie en fonction de son emplacement en usine (laveur, décanteur). Elle peut varier entre 10 et 230 g/L mais la concentration visée par les expérimentations est de 15 g/L. Puisque la concentration utilisée n'est pas très élevée, la valeur de la viscosité est considérée très près de celle de l'eau. Il est donc possible de supposer que le comportement de ce fluide est de nature newtonienne, incompressible (densité de la liqueur ne varie pas dans le temps et dans l'espace) et visqueuse.

4.1.2.3.2 *Boues rouges*

Les boues rouges sont considérées comme un fluide non newtonien, c'est-à-dire qu'une valeur de viscosité différente est obtenue pour chacune des contraintes appliquées. De plus, pour que les boues entrent en écoulement, il faut dépasser un seuil de contrainte minimum appelé contrainte d'écoulement (résistance opposée au cisaillement « yield stress »). Plusieurs modèles rhéologiques peuvent être utilisés pour exprimer mathématiquement la courbe d'écoulement des boues rouges tels que Hershel-Bulkley, Bingham et la loi de puissance. Pour des raisons historiques, le modèle Hershel-Bulkley est le plus utilisé chez Alcan.

$$\tau = \tau_y + K * G^b \quad (4-5)$$

L'équation (4-5) représente le modèle d'Hershel-Bulkley où τ_y est la contrainte d'écoulement, K est l'indice de consistance et b est un indice d'écoulement.

4.2 Appareil de Couette

L'appareil de Couette est un viscosimètre qui permet d'étudier et de mesurer la viscosité d'un fluide ou d'une suspension. Il peut également être utilisé afin d'observer l'influence des cisaillements sur une suspension par la mesure de la contrainte de cisaillement et du gradient de vitesse. Il existe différents types de modèle comme les systèmes de cylindres coaxiaux (Searle ou Couette), le système cône/plateau, le système à ouverture simple ou double et bien d'autres. Dans le cadre du présent projet, seul l'appareil de Couette basé sur un système de cylindres coaxiaux est étudié⁽³³⁾.

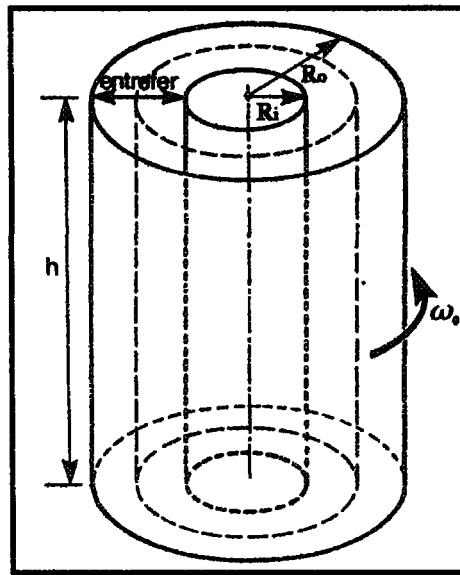


Figure 4.4 - Vue de profil d'un appareil Couette

L'appareil de Couette est constitué de deux cylindres coaxiaux et est équipé d'un senseur rotatif (rotor) qui assure la rotation d'un des cylindres. La suspension à l'étude est introduite entre les deux cylindres coaxiaux, de rayon R_i et R_o , et d'une hauteur h . Le cisaillement est obtenu en induisant à l'un des deux cylindres un mouvement de rotation, de vitesse angulaire donnée, pendant que l'autre demeure immobile. Ce type de rhéomètre est le plus fréquemment utilisé.

4.2.1 Hypothèse de la couche limite

L'hypothèse de la couche limite spécifie que la portion de la suspension en contact avec la surface solide se déplace à la même vitesse que celle-ci. Deux couches limites existent aux frontières du matériel : l'une se déplaçant avec la surface mobile et l'autre immobile. Entre ces deux couches limites se forment une infinité de couches, glissant les

unes sur les autres à des vitesses différentes. La Figure 4.5 illustre l'hypothèse de la couche limite entre deux plaques parallèles dont l'une est en mouvement⁽³³⁾.

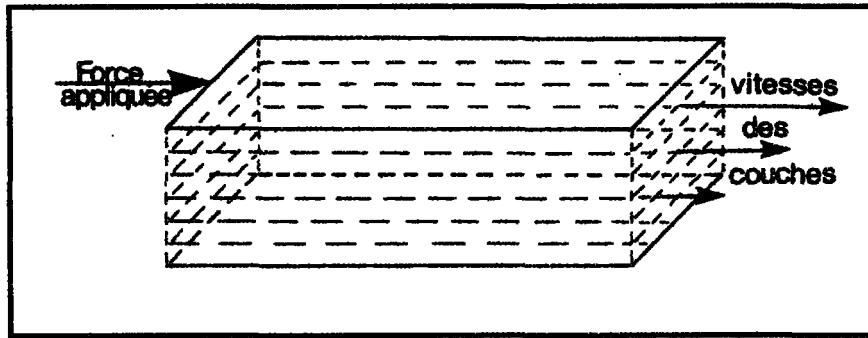


Figure 4.5 - Hypothèse de la couche limite

4.2.2 Écoulement entre deux plaques

La théorie relative à l'écoulement d'un fluide entre deux plaques parallèles est nécessaire pour faciliter la compréhension des écoulements Couette. Supposons un fluide newtonien, incompressible et de nature visqueuse dont l'écoulement est à l'équilibre et en régime laminaire. Ce fluide occupe l'espace entre les deux plaques planes, où la plaque inférieure est fixe et la plaque supérieure se déplace à une vitesse constante V . La distance entre les deux plaques est donnée par h ⁽³⁴⁾.

Où ρ est la densité, p la pression et g_x la composante « x » de l'accélération gravitationnelle. Ainsi, l'équation du mouvement devient :

$$\frac{d^2u}{dy^2} = 0 \quad \text{où} \quad u = C_1y + C_2 \quad (4-10)$$

En appliquant les conditions de non glissement sur les plaques :

$$\text{À } y = h \quad u = V = C_1h + C_2 \quad (4-11)$$

$$\text{À } y = 0 \quad u = 0 = C_1 * 0 + C_2 \quad (4-12)$$

L'expression du profil de vitesse linéaire est retrouvée telle que présentée à la Figure 4.6. Ce type d'équation n'est valable que pour un système en régime permanent et à l'équilibre.

$$u(y) = V \frac{y}{h} \quad (4-13)$$

4.2.3 Écoulement entre deux cylindres coaxiaux

Supposons un fluide de densité et de viscosité constante introduit entre deux cylindres concentriques, tel qu'illustré dans la Figure 4.7. Certaines conditions limites s'imposent à ce type d'écoulement. Tout d'abord, il n'y a pas de mouvement axial ou d'effet de fin, c'est-à-dire que les extrémités du Couette n'affectent pas les écoulements ($v_z = 0$). Le cylindre intérieur tourne à une vitesse angulaire constante Ω et le cylindre extérieur est fixe. De plus, la symétrie des cylindres garantit qu'en régime permanent la vitesse peut seulement varier radialement (ne peut pas varier selon θ).

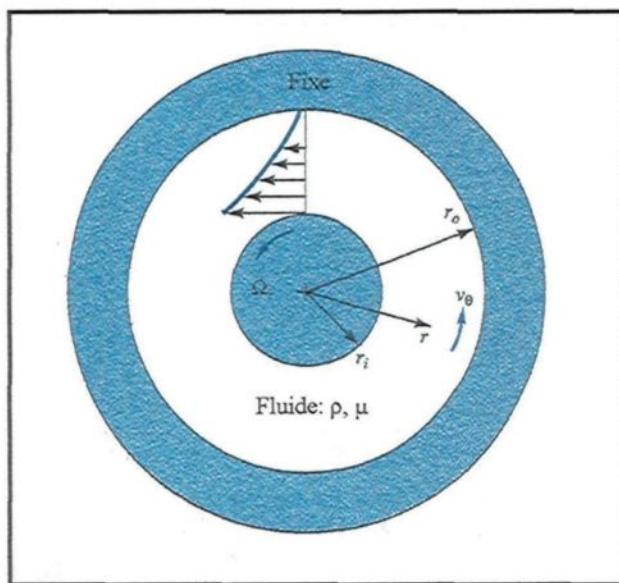


Figure 4.7 - Écoulement d'un fluide visqueux incompressible dans un système de cylindres coaxiaux

L'analyse et la compréhension de l'écoulement dans un viscosimètre de Couette nécessitent l'utilisation de l'équation de continuité en coordonnées cylindriques pour un fluide incompressible (liqueur) (Annexe A.3.1).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = 0 \quad \text{où} \quad r v_r = \text{cte} \quad (4-14)$$

La vitesse azimutale v_θ ne varie pas avec l'angle θ (angle constant) mais bien avec le rayon r . La vitesse radiale v_r , quant à elle, est nulle sur les deux cylindres (interne et externe) et par conséquent, nulle en tout point. Il en résulte donc que le mouvement produit à l'intérieur du Couette ne peut seulement qu'être d'origine rotationnelle ($v_\theta = v_\theta(r)$). Voici l'équation du mouvement selon les trois composantes en coordonnées cylindriques (Annexe A.4.2).

Mouvement selon θ :

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + (V \cdot \nabla)v_\theta + \frac{1}{r}v_r v_\theta = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + g_\theta + \nu \left(\nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \quad (4-15)$$

Mouvement selon r :

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + (V \cdot \nabla)v_r - \frac{1}{r}v_\theta^2 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \nu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (4-16)$$

Mouvement selon z :

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (V \cdot \nabla)v_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \nabla^2 v_z \quad (4-17)$$

Étant donné que $v_r = 0$, les termes qui contiennent v_r peuvent donc être supprimés.

De plus, puisque l'écoulement est à l'équilibre, il n'y a pas de variation dans le temps. En réarrangeant l'équation du mouvement selon θ (équation 4-15) devient :

$$\rho(V \cdot \nabla)v_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left(\nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{r^2} \right) \quad (4-18)$$

Cependant, selon les conditions initiales préalablement déterminées stipulant que les cylindres sont parfaitement symétriques, que $v_r = 0$, qu'il n'y a pas d'effets aux extrémités du Couette et en supposant que les forces d'inertie et de gravité sont négligeables, tous les termes seront nuls excepté le dernier. Mentionnons que pour un fluide visqueux, $\tau_r = \tau_\theta = 0$; ainsi l'équation (4-18) se simplifie et devient :

$$\nabla^2 v_\theta = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_\theta}{dr} \right) = \frac{v_\theta}{r^2} \quad (4-19)$$

En suivant une démarche similaire les équations (4-16) et (4-17) se simplifient comme suit :

Selon r :

$$-\frac{1}{r}v_\theta^2 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4-20)$$

Selon z :

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \quad (4-21)$$

Ainsi, l'équation du mouvement selon θ fournit la distribution de vitesse. La même équation selon z fournit les effets de gravité et de la pression (les effets hydrostatiques) sur le système. La composante r , quant à elle, indique comment les forces centrifuges affectent la pression. Cependant, pour le problème actuel qui consiste à décrire les écoulements Couette, seule la composante θ est analysée.

L'équation du mouvement selon θ est une équation différentielle linéaire de deuxième ordre qui a pour solution :

$$\frac{1}{r} \left(\frac{d(rv_\theta)}{dr} \right) = C_1 \quad (4-22)$$

$$\left(\frac{d(rv_\theta)}{dr} \right) = C_1 r \quad (4-23)$$

En intégrant, l'équation (4-23) devient :

$$rv_\theta = \frac{1}{2} C_1 r^2 + C_2 \quad (4-24)$$

En réarrangeant l'équation (4-24) la solution suivante est obtenue :

$$v_\theta = \frac{1}{2} C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (4-25)$$

Note : la valeur $\frac{1}{2}$ pourrait être intégrée à l'intérieur de la constante C_1 .

Les valeurs des constantes C_1 et C_2 peuvent être trouvées en appliquant les conditions de non glissement sur le cylindre intérieur et extérieur :

$$\text{À } r = r_o, \quad v_\theta = 0 = C_1 r_o + \frac{C_2}{r_o} \quad (4-26)$$

$$\text{À } r = r_i, \quad v_\theta = \Omega_i r_i = C_1 r_i + \frac{C_2}{r_i} \quad (4-27)$$

La solution finale pour la distribution de vitesse du cylindre rotatif intérieur en régime laminaire est ainsi obtenue :

$$v_\theta = \Omega_i r_i \frac{\frac{r_o}{r} - \frac{r}{r_o}}{\frac{r_o}{r_i} - \frac{r_i}{r_o}} \quad (4-28)$$

Note : dans l'éventualité où le cylindre extérieur pivote (inverse de la situation présente), l'équation (4-28) demeure valide en interchangeant les indices « i » et « o ».

4.2.4 Instabilités du système Couette

L'équation (4-28) permet de décrire le profil de vitesse d'un écoulement dans une géométrie Couette pour de petites valeurs de vitesse angulaire Ω_i (régime laminaire). Cependant, lorsque la vitesse angulaire atteint une valeur critique, le fluide développe un écoulement secondaire, qui est superposé à l'écoulement (tangential) primaire et est périodique dans la direction axiale. Il se forme ainsi un système très ordonné de vortex toroïdaux, appelés « Vortex de Taylor »^(35 à 41). La Figure 4.8 illustre bien la présence des vortex de Taylor dans l'espace annulaire du système Couette.

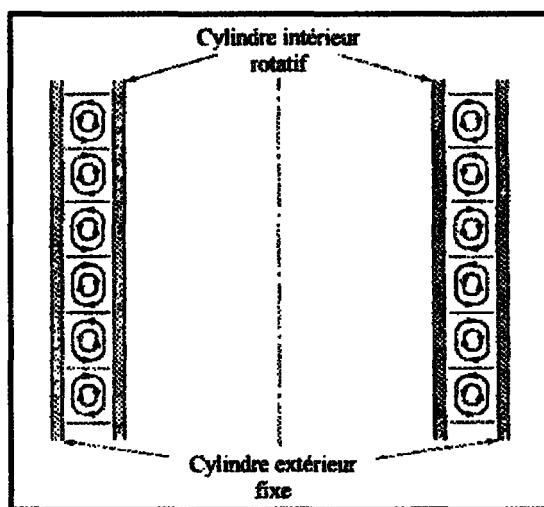


Figure 4.8 - Vortex toroïdaux dans l'espace annulaire Couette

Les premières études portant sur le problème des instabilités du système Couette ont été investiguées théoriquement et expérimentalement par G.I.Taylor en 1923^(35 à 41). Ce dernier a formulé une théorie permettant de prédire le comportement des instabilités dans un écoulement Couette par l'emploi du nombre de Taylor.

$$Ta = \frac{r_i(r_o - r_i)^3 \Omega_i^2}{\nu^2} \quad (4-29)$$

Le nombre de Taylor est adimensionnel et il quantifie l'importance du degré de rotation autour d'un axe vertical. Lorsque le nombre de Taylor est suffisamment petit, c'est-à-dire inférieur au nombre de Taylor critique « Ta_c », toutes les perturbations sont atténuées sous l'action de la viscosité (le système reste stable). À l'inverse, lorsque $Ta > Ta_c$, les perturbations vont s'amplifier avec le temps jusqu'à établir un régime complètement turbulent. Le nombre de Taylor critique varie en fonction des dimensions de l'espace annulaire entre les deux cylindres. Selon l'équation (4-29) et pour un très petit espace annulaire $(r_o - r_i)/r_i \ll 1$, la valeur de Ta_c serait approximativement de $1700^{(34 \text{ et } 41)}$. Mentionnons également que plus la suspension est diluée, plus la valeur du nombre de Taylor critique (Ta_c) devrait être élevée.

Plusieurs études traitent des instabilités de Taylor et fournissent différentes formules, variant en fonction de la géométrie et du nombre de Reynolds utilisés pour le calcul de ce nombre. Le travail le plus représentatif des analyses du nombre de Taylor pour un système Couette⁽⁴²⁾ démontre qu'un régime complètement turbulent n'est pas atteint tant que le nombre de Taylor est inférieur à 15 000 ($Ta_c \approx 15 000$). Selon cette même étude, le nombre de Taylor pour un appareil Couette devrait plutôt se définir comme suit :

$$Ta = \frac{Re_T}{\pi} \sqrt{\frac{r_o - r_i}{4r_i}} \quad \text{où} \quad Re_T = \frac{v_{\theta \max} \rho (r_o - r_i)}{\mu} \quad (4-30a \text{ et } 4-30b)$$

4.2.4.1 Écoulement et instabilités de Taylor

Tel que mentionné préalablement, l'apparition de vortex de Taylor (instabilités) dans l'écoulement Couette suppose que la vitesse angulaire a dépassé la valeur critique du régime laminaire et que l'écoulement devient turbulent. Pour un régime laminaire (faible nombre de Taylor), les lignes de courant dans un système Couette sont de formes circulaires telles que présentées à la Figure 4.9 (pas d'instabilités radiales).

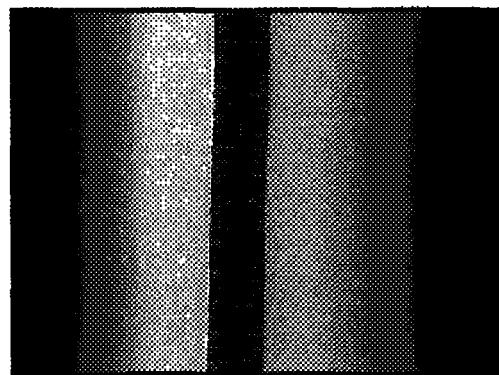


Figure 4.9 - Écoulement tangentiel à faible nombre de Taylor

Au fur et à mesure que la vitesse angulaire augmente, l'écoulement devient instable en fonction du temps et de petits vortex toroïdaux se forment. Le centre de ces vortex est situé sur l'axe commun des cylindres. L'augmentation de la vitesse angulaire a pour conséquence de faire varier la forme des vortex⁽⁴³⁾. Ainsi, pour une vitesse angulaire élevée ($Ta > Ta_c$), la forme des lignes de courant ressemble à des vagues de déplacement, c'est-à-dire que l'écoulement devient périodique dans la direction tangentielle tel qu'illustre sur la Figure 4.10.

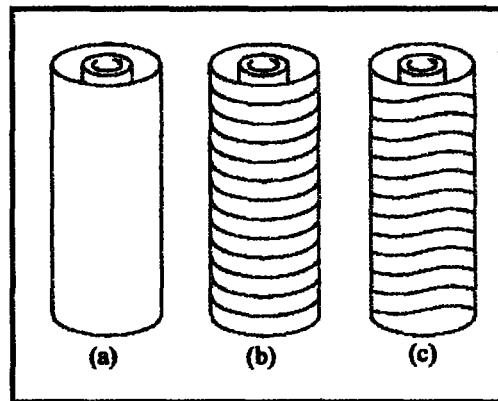


Figure 4.10 - Phénomène observé dans l'espace annulaire

- a) Écoulement purement tangentiel; b) Écoulement périodique;**
- c) Écoulement périodique sous forme de vague**

Il existe différents degrés d'instabilité. En effet, chaque augmentation du taux de rotation du cylindre intérieur provoque l'augmentation du nombre de Taylor. Ainsi, pour chaque nombre de Taylor, il existe un état d'équilibre. Les Figures 4.11 et 4.12 illustrent deux différents degrés d'instabilité.

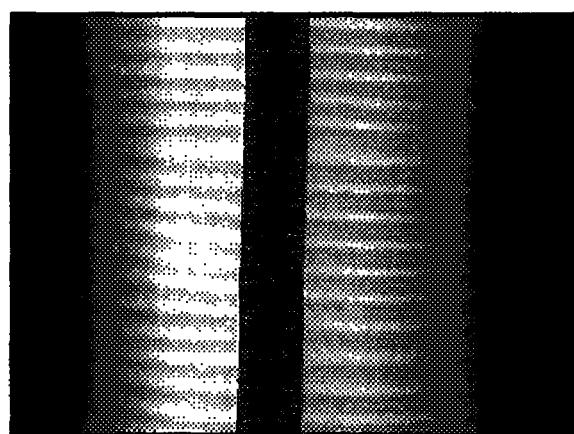


Figure 4.11 - Écoulement tangentiel à nombre de Taylor modérément élevé

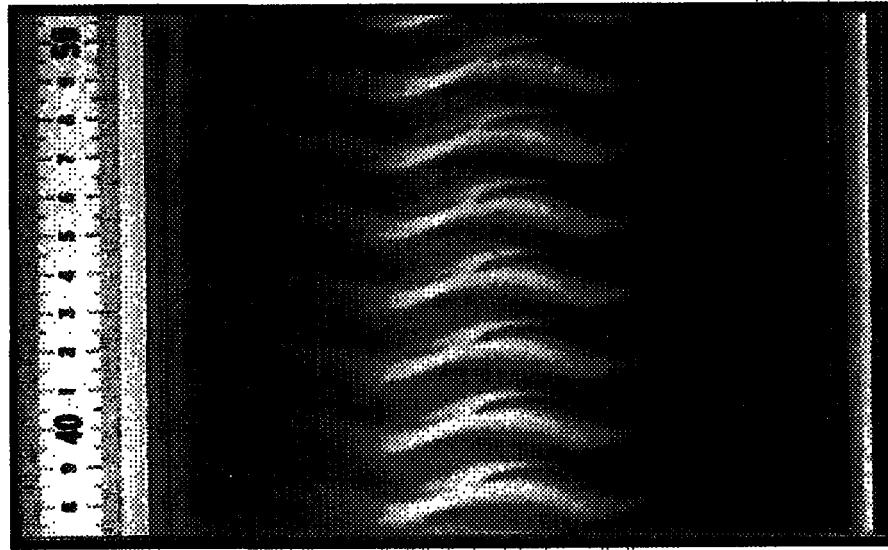


Figure 4.12 - Écoulement tangentiel à nombre de Taylor élevé

Pour des nombres de Taylor modérément élevés, les vortex développent une périodicité circonférentielle mais ils conservent un état d'équilibre stable (Figure 4.11). La turbulence n'apparaît que lorsque le nombre de Taylor est très élevé.

4.2.4.2 *Profil de vitesse et instabilités de Taylor*

Le profil de vitesse de l'écoulement Couette est affecté par la présence de vortex toroïdaux. En effet, le profil de vitesse d'un écoulement Couette laminaire (équation 4-28) devient perturbé par des interactions non-linéaires lorsqu'il y a présence de vortex de Taylor. Pour un système de vortex toroïdaux à l'équilibre (sans turbulence), la distribution de vitesse moyenne peut être obtenue par l'équation suivante selon⁽⁴¹⁾ :

$$\bar{v} = -A_o r + \frac{B_o}{r} + \text{Re} \int_r^a \frac{\bar{u}' \bar{v}'}{r'} dr \times \left(-A_1 r + \frac{B_1}{r'} \right) + \text{Re} \int_r^a \frac{\bar{u}' \bar{v}'}{r'} dr. \quad (4-31)$$

$$\text{où } A_o = \frac{r_i}{r_0 + r_i} \text{ et } B_o = \frac{r_i r_0^2}{(r_0 - r_i)^2 (r_0 + r_i)} \quad (4-32)$$

$$A_1 = \frac{r_0^2}{(r_0 - r_i)(r_0 + r_i)} \quad B_1 = \frac{r_i^2 r_0^2}{(r_0 - r_i)^3 (r_0 + r_i)}$$

et où le nombre de Reynolds se calcule comme suit :

$$\text{Re} = \frac{r_i \Omega_i (r_o - r_i)}{\nu} \quad (4-33)$$

Les deux premiers termes de l'équation (4-31) représentent la distribution de vitesse moyenne juste avant l'apparition des instabilités de Taylor, tandis que les deux derniers termes représentent les variations de l'écoulement dues à la présence des vortex de Taylor.

4.2.4.3. Propriétés de mélange de l'appareil Couette

Des études effectuées sur l'influence des vortex de Taylor sur les propriétés de mélange ont démontré que le mouvement toroïdal du fluide provoque un mélange radial hautement efficace à l'intérieur des vortex. Ainsi, chaque vortex peut être considéré comme étant un contenant à l'intérieur duquel la solution est parfaitement bien mélangée⁽⁴¹⁾. Il est ainsi possible de penser que le niveau d'agitation fournit par un appareil Couette assurerait un mélange efficace des polymères dans la suspension, facilitant ainsi les rencontres particules-polymères (floculation).

4.2.4.4 *Appareil Couette du présent projet*

Chaque appareil de Couette possède des dimensions spécifiques ainsi qu'une vitesse de rotation maximale. Les écoulements Couette varient en fonction de ces caractéristiques. L'appareil de Couette utilisé dans le présent projet est décrit plus précisément dans le prochain chapitre (section 5.2.1.). Néanmoins, considérant la taille de l'espace annulaire de l'appareil Couette utilisée (6 mm) et le nombre de rotation maximum du cylindre intérieur (≈ 145 rpm ou $\approx 15,18$ sec $^{-1}$), la valeur du nombre de Taylor selon l'équation (4-30a) reste toujours en dessous de 15 000. Cependant, pour ce même niveau d'agitation, la vitesse angulaire permettant de conserver un écoulement laminaire dans l'espace annulaire est dépassée (4,02 sec $^{-1}$)⁽⁴⁴⁾. Donc, l'écoulement est transitoire entre un régime laminaire et un régime turbulent. Cet état de transition peut être estimé⁽⁴⁴⁾ par les équations du régime laminaire mais en considérant que l'imprécision se situe à $\pm 10\%$ de la valeur obtenue.

Les valeurs précédentes sont valables pour un écoulement de liquide Bayer de faible viscosité. Cependant, la présence de molécules de polymère peut modifier l'écoulement entre les cylindres coaxiaux, favorisant ainsi l'apparition d'instabilités. Pour ce faire, les quantités de polymère ajoutées dans l'espace annulaire Couette doivent être importantes, ce qui n'est pas le cas du présent projet⁽⁴³⁾. Par ailleurs, la présence d'agrégats provenant de la flocculation des particules de boues rouges par des molécules de polymère peut aussi affecter les écoulements Couette par la création de perturbations dans les vortex de Taylor⁽⁴³⁾. La présence d'agrégats aurait pour conséquence de déplacer l'écoulement vers un état légèrement plus transitoire ce qui amélioreraient les conditions de mélange retrouvées

dans l'appareil Couette. Toutefois, pour une durée d'agitation suffisamment longue, les agrégats seront de tailles similaires (moins d'irrégularité dans la taille des agrégats) diminuant ainsi leurs effets de perturbation sur les écoulements. De plus, il est à noter que l'alimentation du système se fait de façon continue et perpendiculairement aux lignes d'écoulement du fluide ce qui influence la stabilité de l'écoulement Couette. Cependant, les quantités de matières ajoutées ne sont pas importantes par rapport à la taille de l'espace annulaire Couette. Ainsi, il est possible de penser que l'écoulement ne subit que de légères perturbations dans la partie supérieure du Couette.

4.2.4.5 *Calcul du gradient de vitesse dans une géométrie Couette*

La valeur du taux de déformation ou gradient de vitesse peut être obtenue grâce à de simples calculs adaptés pour des géométries de type Couette. La formule suivante permet d'obtenir le gradient de vitesse pour le cylindre intérieur mobile⁽³²⁾ :

$$G_i = -\Omega \frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{où} \quad \Omega = \frac{(2\pi * nbt)}{60} \quad (4-34a \text{ et } 4-34b)$$

où G_i est le gradient de vitesse sur le cylindre intérieur, Ω la vitesse angulaire, nbt le nombre de rotation du cylindre intérieur par minute, r_o le rayon du cylindre extérieur et r_i le rayon du cylindre intérieur. Le signe moins fait référence au système d'axe à partir duquel est calculé le gradient de vitesse, cependant la valeur du gradient de vitesse est toujours exprimée en valeur absolue. Il est également possible d'obtenir le taux de cisaillement en divers points de l'espace annulaire du Couette (G_r). En définissant que $\delta = r_o / r_i$ alors :

$$Gr = - \left(r_i^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_o^2} \right) \right) * \left\{ \frac{\pi}{30} * \left(\frac{\delta^2}{\delta^2 - 1} \right) \right\} * nbt \quad (4-35)$$

L'appareil de Couette produit un taux de cisaillement mesurable et reproductible. Le niveau d'agitation du Couette est fonction du nombre de rotations par minute effectués par le cylindre mobile. De ce fait, l'augmentation de la vitesse de rotation du cylindre intérieur provoque une augmentation du taux de cisaillement et vice versa.

4.2.4.6 *Calcul de la contrainte de cisaillement dans une géométrie Couette*

La valeur de la contrainte de cisaillement peut également être obtenue grâce à de simples calculs adaptés pour des géométries de type Couette⁽³²⁾. Ainsi :

$$\tau_r = \frac{M_d}{2\pi * h * r^2} \quad (4-36)$$

où τ_r est la contrainte de cisaillement à la position radiale r , h la hauteur du cylindre et M_d est la valeur du couple mesuré.

4.3 Agitation dans une conduite

L'appareil de Couette est utilisé afin d'appliquer un cisaillement uniforme et continu sur une suspension flokulée. L'utilisation d'un système de tuyau droit ou torsadé est un autre moyen de favoriser la flocculation orthocinétique. Les systèmes de tuyaux sont utilisés par diverses industries et dans différents domaines tels que la flocculation, les réactions chimiques, le transfert de chaleur et bien d'autres. Un des principaux avantages de la flocculation dans une conduite est qu'il est possible d'utiliser l'énergie cinétique du fluide afin de faciliter la dispersion des agents de flocculation et ainsi contribuer à la formation des agrégats⁽⁴⁵⁾.

4.3.1 Écoulement dans une conduite droite

Plusieurs études⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾ traitent des écoulements linéaires dans une conduite droite. Supposons un fluide visqueux et incompressible en régime laminaire dans une conduite de section circulaire droite. La vitesse du fluide varie radialement passant d'une valeur maximale v_o au centre de l'axe à une valeur nulle sur les parois de la conduite telle que démontrée dans l'équation suivante :

$$v_r = v_o \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (4-37)$$

Cette équation est connue comme étant la formule de Poiseuille (écoulement de Poiseuille) où v_r est la vitesse du fluide à la distance radiale r de l'axe et R le rayon de la conduite. Le profil de vitesse de l'écoulement dans une conduite droite est de forme parabolique tel qu'illustré sur la Figure 4.13.

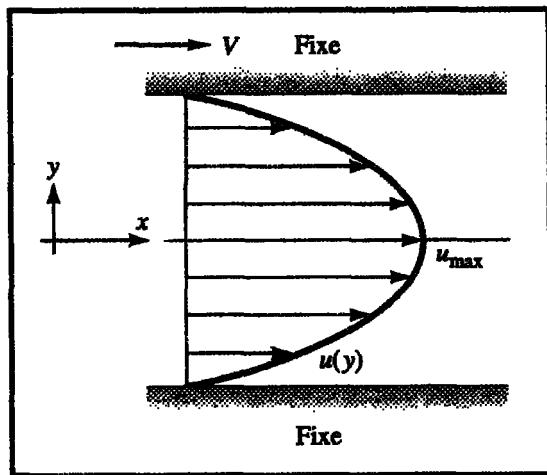


Figure 4.13 - Écoulement laminaire dans une conduite droite

La valeur de la vitesse maximale v_o est obtenue en utilisant l'équation de continuité où la variation de pression s'effectue dans l'axe de la conduite. Ainsi :

$$v_o = -\frac{dp}{dx} \left(\frac{R^2}{4\mu} \right) \quad (4-38)$$

4.3.1.1 Gradient de vitesse dans une conduite droite

Le taux de déformation ou gradient de vitesse G peut être obtenu pour chaque position radial r de la conduite en dérivant l'équation (4-37) ;

$$G_r = \frac{dv_r}{dr} = -\frac{2v_o r}{R^2} \quad (4-39)$$

où G_r est le gradient de vitesse à la position r . Mentionnons que la valeur du gradient de vitesse G_r varie de façon linéaire, passant de zéro sur l'axe de la conduite à une valeur

maximale $2v_o/R$ sur les parois de la conduite. Il est également possible d'obtenir la valeur moyenne du gradient de vitesse \bar{G} de la conduite :

$$\bar{G} = \frac{2v_o}{R^2} \frac{\int_0^R 2\pi r^2 dr}{\int_0^R 2\pi r dr} = \frac{4v_o}{3R} \quad (4-40)$$

L'équation (4-40) fournit une valeur moyenne, représentant environ les 2/3 du gradient de vitesse maximum pour la paroi de la conduite. Dans la littérature⁽⁴⁵⁾, cette équation est également exprimée en fonction du débit volumique de l'écoulement Q : $(\pi R^2 v_o/2)$.

$$\bar{G} = \frac{8Q}{3\pi R^3} \quad (4-41)$$

La variation de pression le long de la conduite se définit comme suit⁽⁴⁵⁾ (L étant la longueur de la conduite) :

$$\Delta_p = \frac{8Q\mu L}{\pi R^4} \quad (4-42)$$

La flocculation produite à l'intérieur d'une conduite dépend du gradient de vitesse ainsi que du temps de résidence au cours duquel le gradient de vitesse est appliqué sur la suspension. Le temps de résidence moyen d'une particule de matière dans une conduite de longueur L se définit comme suit :

$$\bar{t} = \frac{\pi R^2 L}{Q} \quad (4-43)$$

4.3.1.2 *Flocculation dans une conduite droite*

Dans un écoulement laminaire, l'opportunité de contact entre deux particules (\overline{Gt}) dépend seulement des dimensions de la conduite et non du débit de l'écoulement. Par conséquent, les particules se situant sur l'axe central de la conduite sont sujettes à de très bas gradients de vitesse sur une courte période de temps (vitesse maximale) conduisant ainsi à une flocculation peu efficace. À l'inverse, les particules près de la paroi se retrouvent dans une zone à gradients de vitesse élevés sur une plus longue période (vitesse minimale) de temps produisant ainsi un bon niveau de flocculation.

4.3.2 *Écoulement dans une conduite torsadée*

Pour obtenir un bon niveau de flocculation dans une conduite droite, la longueur de celle-ci doit être suffisamment longue pour permettre l'agrégation des particules. Il est cependant possible de réduire la longueur des conduites utilisées par l'emploi de conduite torsadée (tuyau enroulé autour d'un axe) telle qu'illustrée dans la Figure 4.14.

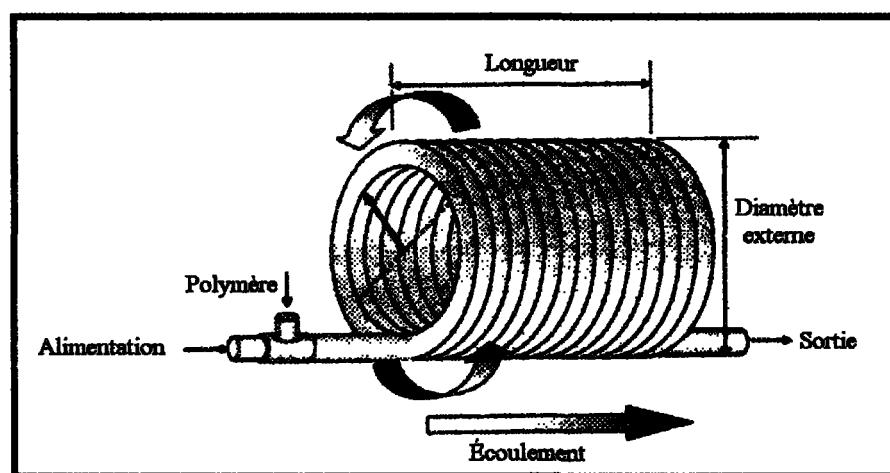


Figure 4.14 - Conduite torsadée

Pour un écoulement dans une conduite torsadée, il se développe un écoulement secondaire (Figure 4.15) qui peut affecter la flocculation de différentes façons⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁸⁾. La magnitude de l'écoulement secondaire est caractérisée par le nombre de Dean (De) où κ est l'indice de courbure de la conduite torsadée et Re le nombre de Reynolds:

$$De = \sqrt{\kappa} Re \quad (4-44)$$

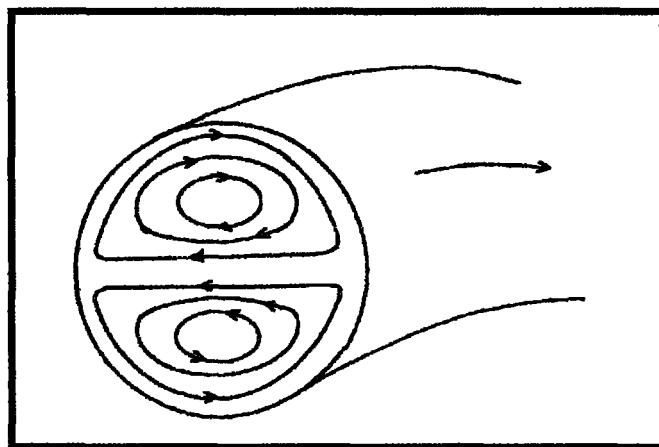


Figure 4.15 - Écoulement secondaire dans une conduite torsadée

À ce jour, peu d'études ont été effectuées sur la flocculation dans des conduites torsadées. Il est cependant permis de penser que la courbure de la conduite a pour conséquence d'augmenter la différence de pression le long de la conduite (pour un débit donné) ce qui favoriserait une augmentation du gradient de vitesse moyen (équation 4-40) et, par conséquent, produirait un niveau de flocculation plus élevé. La position radiale d'une particule introduite dans une conduite torsadée ne reste pas constante (cas laminaire) mais varie en fonction des lignes d'écoulement. De plus, selon une étude⁽⁴⁸⁾, puisque l'écoulement est soumis à des forces centrifuges, les particules vont rester plus longtemps

dans la conduite torsadée que celles situées près du centre d'une conduite droite. L'augmentation du temps de résidence et du niveau d'agitation sont des facteurs qui favorisent la dispersion des polymères dans la suspension et améliorent le taux de rencontre entre les particules. En d'autres mots, les conduites torsadées améliorent la flocculation.

La flocculation dans une conduite torsadée se produit de façon similaire à celle observée dans le système Couette. Dans ce cas, les conditions d'agitation varient avec les dimensions de la conduite. En effet, pour une conduite de diamètre $2R$ et pour un débit fixe, le gradient de vitesse varie en fonction de la longueur du tube. Plus la conduite est longue et plus le gradient de vitesse est élevé. Pour des valeurs élevées de G , l'écoulement peut devenir turbulent. Dans une conduite torsadée, la turbulence est souhaitée puisqu'elle favorise l'augmentation du taux de collisions entre les particules. Néanmoins, les agrégats ne grossissent pas indéfiniment durant une période de cisaillement prolongée mais ont tendance à atteindre un état d'équilibre. C'est pourquoi, il est important de déterminer les conditions optimales (niveau d'agitation et durée de l'agitation) de flocculation afin d'éviter que les agrégats subissent un cisaillement supplémentaire pouvant conduire à leur destruction.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

5.1 Principe de fonctionnement

Dans le procédé Bayer, les agents de flocculation sont introduit dans les conduites et dans le puit d'alimentation afin d'améliorer le rendement de l'étape de séparation solide/liquide. La disposition de ces conduites et du puit d'alimentation, leurs dimensions ainsi que les débits utilisés favorisent la création d'un gradient de vitesse dans l'écoulement. Ce dernier permet de disperser efficacement le polymère dans la suspension et augmente le taux d'interactions entre les particules et les chaînes de polymère. Afin d'étudier les effets du gradient de vitesse sur une suspension flokulée un montage expérimental, basé sur la géométrie Couette, a été élaboré. Ce montage permet de déterminer les conditions de cisaillement optimales pour favoriser la flocculation continue d'une suspension de boues rouges sous les conditions retrouvées dans les circuits de lavages du procédé Bayer, et ainsi, améliorer la clarté du liquide surnageant tout en utilisant des quantités adéquates de polymère. Le présent chapitre porte donc sur la description du montage expérimental, du protocole expérimental, des variables, paramètres et mesures se reportant aux essais en laboratoire ainsi que sur la reproductibilité de la méthode.

5.2 Montage expérimental

5.2.1 Appareil Couette

Tel que décrit dans les chapitres précédents, l'appareil de Couette est utilisé afin d'appliquer un cisaillement reproductible et continu sur une suspension à floculer. Le gradient de vitesse est créé en induisant un mouvement de rotation au cylindre intérieur tandis que le cylindre extérieur demeure immobile. L'appareil de Couette utilisé est constitué de 2 cylindres coaxiaux d'une hauteur de 24,0 cm ($R_{\text{cylindre intérieur}} = 10,0 \text{ cm}$ et $R_{\text{cylindre extérieur}} = 10,6 \text{ cm}$) dont l'espacement entre les cylindres est de 6,0 mm (voir Figure 5.1). Le volume de l'espace disponible entre les 2 cylindres est de 0,93 L. Les cylindres utilisés sont fait d'acier inoxydable poli afin d'éliminer la rugosité pouvant amener une perturbation dans l'écoulement Couette.

Il existe une grande variété de géométries Couette sur le marché. La configuration actuelle est celle qui a été utilisée précédemment⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ au cours d'autres essais en laboratoire et qui a démontré un bon degré d'efficacité pour floculer une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. Un panneau de contrôle, relié au moteur du système Couette (Reliance Electric, Ohio, USA), permet de faire varier le niveau de rotation du cylindre intérieur entre 0-150 rpm. Selon les dimensions de l'appareil Couette (espace annulaire de 6 mm), du débit utilisé ($\approx 0,2 \text{ L/min}$) et du nombre maximal de rotation du cylindre intérieur, l'écoulement entre les deux cylindres est considéré transitoire entre un régime laminaire et turbulent (section 4.2.4.4.). Conséquemment, les équations de la section

4.2.4.5 et 4.2.4.6 peuvent être utilisées afin d'obtenir la valeur du gradient de vitesse et de la contrainte de cisaillement.

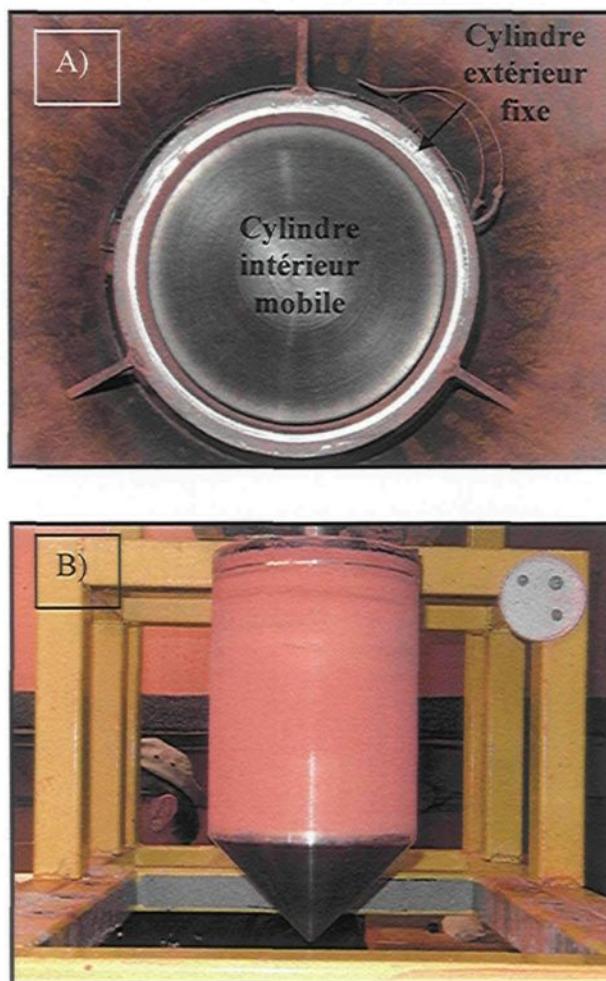


Figure 5.1 - Appareil Couette

A) Vue d'en dessous (espace annulaire) B) Cylindre intérieur mobile

5.2.2 Réservoir de sédimentation

Les agrégats produits à l'intérieur de l'appareil de Couette doivent pouvoir sédimerter de façon similaire à celle rencontrée en usine. Ainsi, un réservoir de sédimentation relativement profond par rapport à la taille du Couette permet aux flocons de sédimerter librement et de se compacter au fond du réservoir (voir Figure 5.2). Le réservoir a une capacité de 110L (1,30 m de hauteur par 0,34 m de diamètre) et est construit de façon à permettre l'observation en continu de la sédimentation. Onze fenêtres, disposées à intervalles réguliers le long du réservoir, permettent d'observer le processus de la sédimentation. L'appareil de Couette, quant à lui, se situe au niveau de la partie supérieure du réservoir et il permet ainsi d'appliquer différents taux de cisaillements (gradient de vitesse) à la suspension à l'étude. Une cavité cylindrique a été aménagée sur les pourtours du réservoir de sédimentation afin de recueillir la surverse au cours des expérimentations. De plus, le réservoir de sédimentation possède une porte afin de faciliter le nettoyage du réservoir.

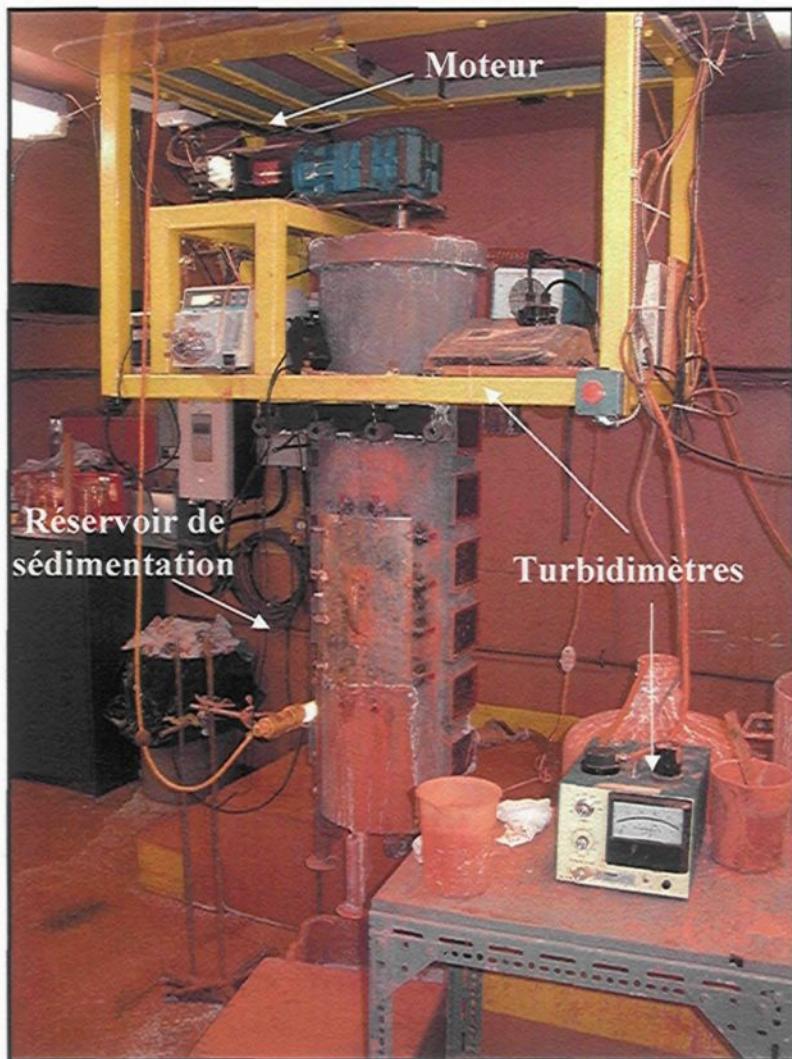


Figure 5.2 - Montage expérimental

5.3 Protocole expérimental

Les travaux expérimentaux sont effectués dans le laboratoire pilote de l'Université du Québec à Chicoutimi qui possède toutes les installations nécessaires à la réalisation de ce projet telles que des réservoirs de liqueur Bayer et de boues rouges, des pompes etc. Chaque essai comporte trois étapes : la préparation, l'expérimentation et le nettoyage.

La première étape consiste à préparer la suspension de boues rouges et la solution de polymère, à sélectionner le type d'injection, à positionner le récipient d'échantillonnage et la colonne de sédimentation et à remplir le réservoir de sédimentation de liqueur Bayer. Au cours de cette étape, il est également important de vérifier et d'ajuster les débits des pompes (débit de la solution de polymère, de la suspension de boues rouges) puisqu'un débit variable pourrait avoir des conséquences imprévisibles sur la turbidité résiduelle de la surverse.

L'étape suivante est l'expérience proprement dite : le cylindre de l'appareil de Couette tourne au rpm désiré, la suspension se mélange au floculant et il y a apparition de flocons dans le réservoir de sédimentation. Le temps d'expérimentation est suffisamment long (environ 3 heures) pour atteindre une bonne stabilité du système (turbidité constante). Des lectures de turbidité sont effectuées aux 10 minutes sur la surverse au moyen d'une cellule de lecture en continu. Un turbidimètre d'appoint, en série avec le turbidimètre principal, a également été utilisé pour vérifier les valeurs les plus basses de turbidité obtenues. De plus, des séquences vidéo sont effectuées aux 40 minutes afin d'observer la vitesse de sédimentation des particules. La Figure 5.3 présente un schéma du montage expérimental lors d'un essai.

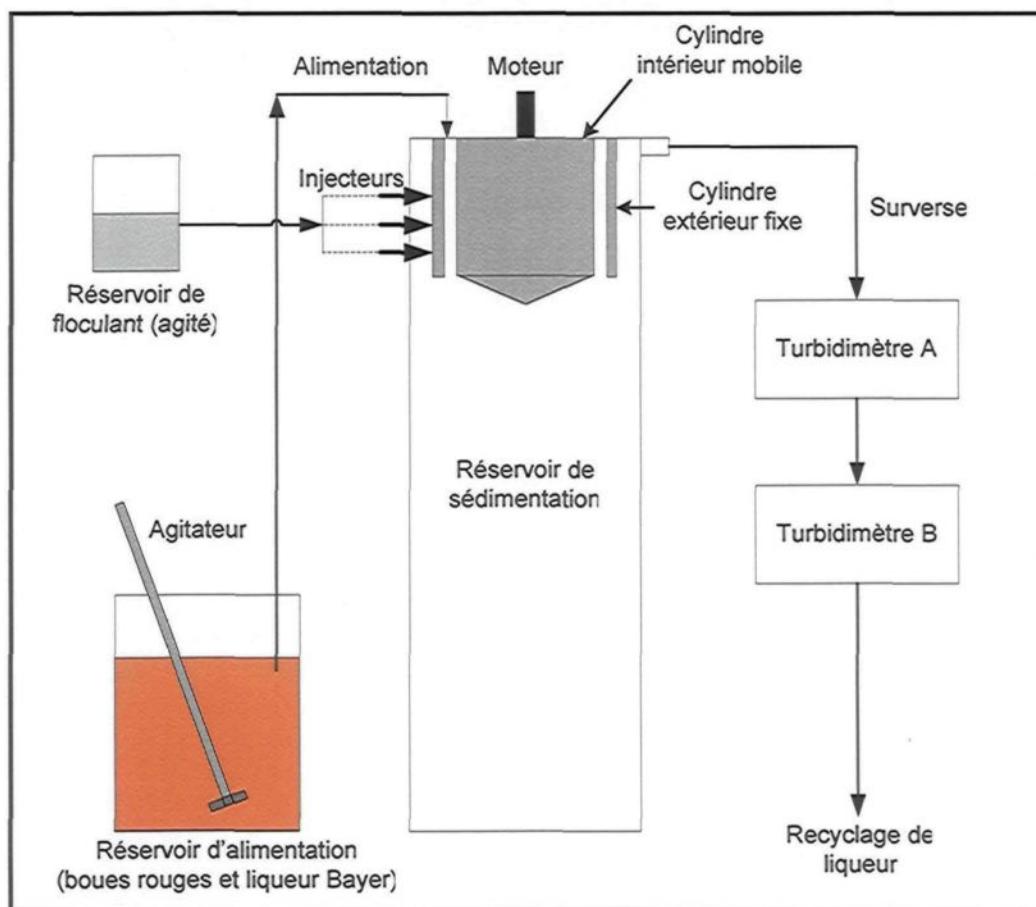


Figure 5.3 - Schéma de l'ensemble du montage expérimental

Finalement, après chaque essai, les débits et la concentration de la suspension sont vérifiés de nouveau. Le récipient d'échantillonnage est également retiré du réservoir de sédimentation afin de mesurer la hauteur du sédiment. La dernière étape consiste à nettoyer le système Couette. Cette étape est très importante puisque la présence de saletés ou de résidus influence la concentration en matières particulières initiale de la liqueur Bayer de l'essai suivant.

5.4 Variables du système Couette

Le montage expérimental, nommé système Couette, permet de générer une flocculation continue. La durée de chaque essai varie en fonction de la variable à l'étude. La présente section porte sur la liste des principales variables du système Couette.

5.4.1 Polymères et produits polymériques

Il existe une grande variété de polymères synthétiques sur le marché. Ceux utilisés dans l'industrie du traitement de la bauxite sont principalement des copolymères d'acrylamide et d'acrylate de sodium modérément anioniques (polymère A et B). Ces polymères (A et B) ont démontré une grande efficacité pour floculer une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer⁽¹⁾. De plus, certains produits polymériques améliorent l'efficacité de la flocculation. Ces produits ont été expérimentés dans une étude antérieure⁽¹⁾. La méthode de préparation des polymères et des produits polymériques doit être rigoureuse afin d'assurer la stabilité de la solution (voir annexe B.3.). Cette méthode a été étudiée⁽¹⁾⁽³⁾ et doit inclure les deux étapes suivantes : la dispersion du polymère dans la solution (agitation adéquate) et un temps de repos de 36 heures (stabilité des solutions). Par ailleurs, les polymères et les produits polymériques doivent démontrer une stabilité chimique à pH élevé et être solubles dans une solution alcaline (suspension de boues rouges et de liqueur Bayer).

5.4.2 Concentration des solutions de polymère et produits polymériques

La concentration de la solution de polymère s'exprime en % p/p (poids du polymère actif sur poids de la solution). Cette concentration peut varier de 0,100 à 0,001 % p/p. De façon générale, une solution concentrée est plus difficile à disperser (solution plus visqueuse) tandis qu'une solution trop diluée peut provoquer une dilution de la suspension (diminution de la concentration solide de la suspension) à l'étude. Le choix de la concentration de la solution utilisée a été déterminé à partir de travaux antérieurs⁽¹⁾ (0,01 % p/p). Un viscosimètre permet d'évaluer la viscosité d'une solution par la mesure du temps d'écoulement. Ainsi, la concentration de la solution de polymère et/ou du produit polymérique est vérifiée à l'aide d'un tube viscosimétrique.

5.4.3 Dosage

Le dosage représente la quantité de polymère actif nécessaire pour floculer une tonne métrique de matières sèches. Il est exprimé en gramme par tonne et les quantités utilisées varient de 10 à 100 g/t. Les dosages utilisés dans le système Couette sont estimés à partir d'essais préalables utilisant la méthodologie du test du cylindre. Ainsi le volume nécessaire de polymère requis pour une flocculation efficace est déterminé et le dosage correspondant est calculé. Le dosage est une variable importante pour l'industrie car elle permet d'évaluer les coûts de production associés au type de floculant. L'équation 5.1 permet d'estimer le dosage nécessaire pour floculer une quantité donnée d'une suspension de boues rouges.

$$Dosage = \frac{(volume_floculant) * \left[(concentration_floculant) / 100 \right]}{(volume_suspension) * (concentration_solide_suspension)} * 10^6 \quad (5.1)$$

Le volume de floculant est en mL, la concentration du floculant s'exprime g/100 mL de solution, le volume de la suspension est en L, la concentration solide de la suspension s'exprime en g/L et la valeur de 10^6 est en g/tonne métrique.

5.4.4 Séquence d'injection des polymères et/ou produits polymériques

Des travaux antérieur⁽¹⁾ ont démontré qu'un mélange adéquat de combinaisons de polymères et de produits polymériques permet de réduire la concentration en matières particulières. Cependant, l'ordre d'injection des polymères et/ou produits polymériques a un effet sur la performance de la flocculation. La séquence d'injection se définit donc comme étant l'ordre dans lequel les agents de flocculation sont introduits dans la suspension. De plus, certaines séquences d'injection⁽¹⁾ ont démontré une très bonne efficacité à floculer les particules de boues rouges. Un mélange de polymères et de produits polymériques est également envisagé.

5.4.5 Niveau d'injection

5.4.5.1 *Injection dans le Couette*

Afin d'étudier les effets de la durée du cisaillement sur la flocculation, trois injecteurs sont disposés à différents niveaux sur le cylindre extérieur de l'appareil Couette (Figures 5.3 et 5.4). L'ajout des agents de flocculation ou produits polymériques s'effectue en

utilisant des pompes péristaltiques numériques de grande précision (Masterflex L/S Digital Economy Drive). Les injecteurs permettent l'ajout des polymères et/ou de produits polymériques dans la suspension à l'étude (le volume annulaire est de 0,552 L pour l'injecteur 2, 0,353 L pour l'injecteur 3 et 0,183 L pour l'injecteur 4). Ainsi, les différents points d'injection permettent de varier la durée (temps de résidence) du cisaillement appliquée à la suspension floculée. Étant donné que chaque polymère nécessite des conditions d'agitation spécifiques pour obtenir une flocculation optimale (durée et intensité de l'agitation)⁽¹⁰⁾, il est important de déterminer un temps de résidence adéquat correspondant à un niveau d'agitation donnée.

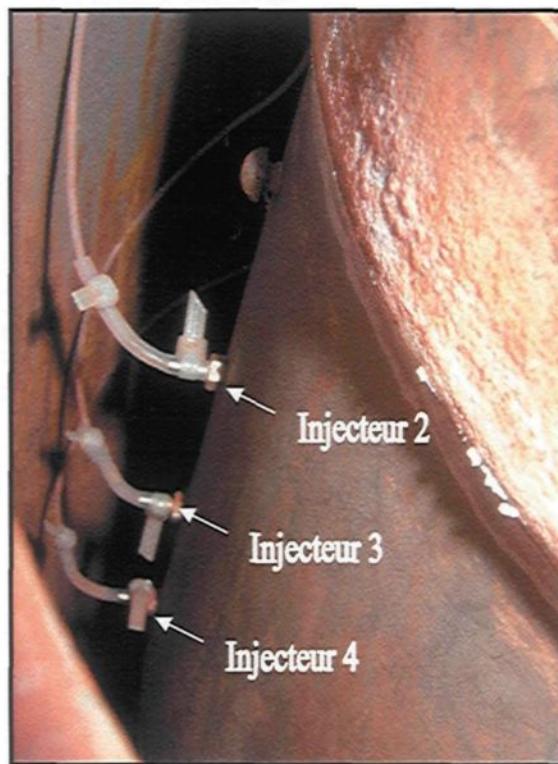


Figure 5.4 - Vue de profil des injecteurs sur l'appareil de Couette

5.4.5.2 Injection dans les conduites torsadées

Tel que décrit au chapitre IV, la conduite torsadée consiste en l'enroulement d'un tuyau (Masterflex Tygon R-3603 de 1 cm de diamètre) d'une longueur donnée autour d'une structure cylindrique (3,0 cm de diamètre). Trois conduites torsadées de différentes longueurs ont été utilisées ; 8, 16 et 24 tours. Ainsi, le tuyau est enroulé 16 fois autour de la structure cylindrique dans le cas des 16 tours. Un injecteur permet d'introduire le floculant à l'intérieur de la conduite torsadée perpendiculairement à l'écoulement. Les conduites torsadées, lorsque utilisées, sont positionnées à l'entrée de l'espace annulaire sur la conduite d'alimentation (la conduite torsadée est positionnée horizontalement sur le montage) avant les injecteurs Couette. La Figure 5.5 illustre une conduite torsadée multiple où les trois injecteurs y sont positionnés.

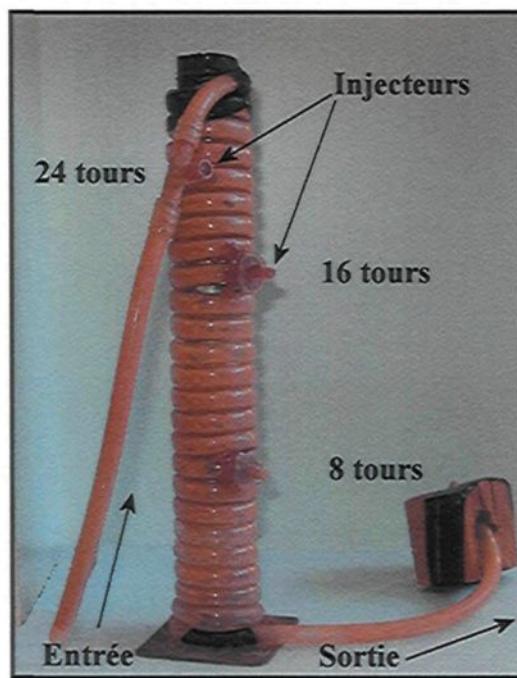


Figure 5.5 - Conduite torsadée avec différents injecteurs de polymère

5.4.6 Variation du niveau d'agitation (rpm)

Le montage expérimental comporte un moteur électrique (Reliance Electric, Ohio, USA de 0 à 2750 rpm) permettant de contrôler le nombre de révolution du cylindre intérieur. Un moto-réducteur (situé entre le cylindre intérieur et le moteur) permet de réduire la vitesse de rotation du cylindre intérieur à un niveau d'agitation jugé satisfaisant (pour des questions de sécurité), soit de 0 à 150 rpm. Ainsi, la rotation du cylindre intérieur (niveau d'agitation) dans le cylindre extérieur fixe crée les contraintes de cisaillement dans la suspension. Un panneau de commande mural permet de faire varier le nombre de révolution par minute du cylindre intérieur.

5.5 Paramètres

Afin de limiter l'étendue des expériences, différents paramètres expérimentaux sont fixés.

5.5.1 Concentration de la liqueur Bayer

En industrie, la concentration en caustique de la liqueur varie de 10 g/L (condition dans les circuits de lavage) à 230 g/L (décanteur à hauts rendements, DHR). Cependant, des conditions spécifiques de température sont nécessaires pour travailler à une concentration élevée (230 g/L). Étant donné qu'il est impossible de reproduire ces conditions dans les laboratoires de l'Université du Québec à Chicoutimi, la concentration visée pour les essais est de 15 g/L soit 15 g/L de NaOH (caustique) et 15 g/L de Na₂CO₃ (carbonate de sodium). La méthode de préparation de la liqueur Bayer est décrite dans l'annexe B.1.

Le réservoir de sédimentation du système Couette est rempli de liqueur Bayer avant chaque expérience. La concentration en matières particulières initiale de la liqueur est d'environ 2 mg/L (\approx 6 NTU). Après chaque essai, la liqueur est recyclée dans quatre réservoirs de 460 L. Un temps de repos de deux semaines par réservoir est nécessaire pour assurer une concentration constante en matières particulières initiales de la liqueur lors de chaque essai (élimination des matières particulières en suspension). Chaque réservoir permet d'effectuer quatre expériences correspondant à environ une semaine de travail en laboratoire.

5.5.2 Concentration de la suspension de boues rouges

La boue rouge est le résidu produit lors de l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite. La composition typique des boues rouges varie en fonction de la source et de la composition de la bauxite elle-même. C'est pourquoi, il est important de conserver le même type de boue tout au long des travaux expérimentaux. Une analyse qualitative de différents types de boue, effectuée par diffraction de rayons x, a démontré des variabilités au niveau de la quantité de certains composés présents dans la boue. La concentration de la suspension est fixée à 50 ± 2 g/L. La méthode de préparation de la suspension de boues rouges est décrite à l'annexe B.2. Avant chaque essai, la boue est préalablement homogénéisée, dans un petit réservoir d'une capacité de 87 L ($\approx 0,53$ m de hauteur et $\approx 0,45$ m de diamètre), par un agitateur électrique (Lightnin EV1P25M).

Mentionnons également que la boue utilisée pour les essais de flocculation a été antérieurement flocculée et décantée. Puisque la boue a déjà subit une ou plusieurs flocculations, elle contient une concentration inconnue de polymères. Cette concentration inconnue est souvent qualifiée de « mémoire » de la boue. Cette quantité résiduelle de polymère conduit à une réduction du dosage nécessaire pour flocculer les matières particulières en suspension lorsque l'on compare au dosage nécessaire pour flocculer une suspension de boues rouges n'ayant jamais été flocculée⁽¹⁾.

5.5.3 Débit d'alimentation de la suspension de boues rouges

L'alimentation du système est réalisée au moyen d'une pompe péristaltique (Masterflex no 7520-20). La suspension de boues rouges est ainsi pompée à partir du réservoir et est injectée perpendiculairement entre les deux cylindres coaxiaux. Le débit d'alimentation est fixé à $200 \pm 10 \text{ ml/min}$ ⁽¹¹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾.

5.6 Mesures

L'étude de la clarté d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer nécessite la prise de diverses mesures.

5.6.1 Turbidité

Dans le processus de flocculation, la surverse est la liqueur contenant les matières particulières résiduelles en suspension. La surverse est recueillie au niveau de la partie supérieure du réservoir Couette. La turbidité de la surverse est un indice de la clarté de la

liqueur Bayer et est mesurée au moyen d'un turbidimètre. Lors des travaux expérimentaux, la surverse est introduite continuellement dans le turbidimètre (HF-Micro 100 Laboratory Turbidimeter) au moyen d'une cuvette spéciale. La turbidité est déterminée en mesurant la lumière qui est déviée à 90° par les particules en suspension. La turbidité est donc une mesure correspondant à la quantité de matières en suspension (turbidité augmente avec la réduction de la transparence optique d'une solution). La précision de l'appareil sur chaque lecture de turbidité est de $\pm 2\%$. Le turbidimètre est calibré avec des standards de formazine fournis par le manufacturier (les standards varient de 0,01 à 1000 NTU et possèdent une précision de $\pm 1\%$). Lors des essais expérimentaux, les mesures de turbidité sont prises régulièrement (10 minutes) afin de vérifier la stabilité du système Couette.

5.6.2 Quantité de matières en suspension retenue par filtration

Une autre mesure utile dans l'étude de la clarté est la quantité de matières en suspension retenue par filtration. Cette mesure s'exprime en mg/L. Un échantillon (1 000 mL) de surverse est prélevé lorsque le système est à l'équilibre. Cet échantillon est séparé en deux parties et chacune est filtrée sur un filtre Millipore de 0,45 μm . Les filtres sont lavés, puis séchés dans une étuve pour éliminer l'eau. Chaque filtre est ensuite pesé afin d'obtenir la quantité résiduelle de particules en suspension de la surverse.

Tous les échantillons de surverse obtenus durant cette étude ont été filtrés et pesés afin d'obtenir la concentration en matières particulaires résiduelles de la surverse. La Figure 5.6 illustre la corrélation linéaire existant entre la turbidité et la concentration en

matières particulaires de la surverse⁽¹⁾. Mentionnons que la régression linéaire ne passe pas par zéro mais tend vers une abscisse à l'origine d'environ 6 NTU, soit la turbidité initiale de la liqueur Bayer avant les expérimentations.

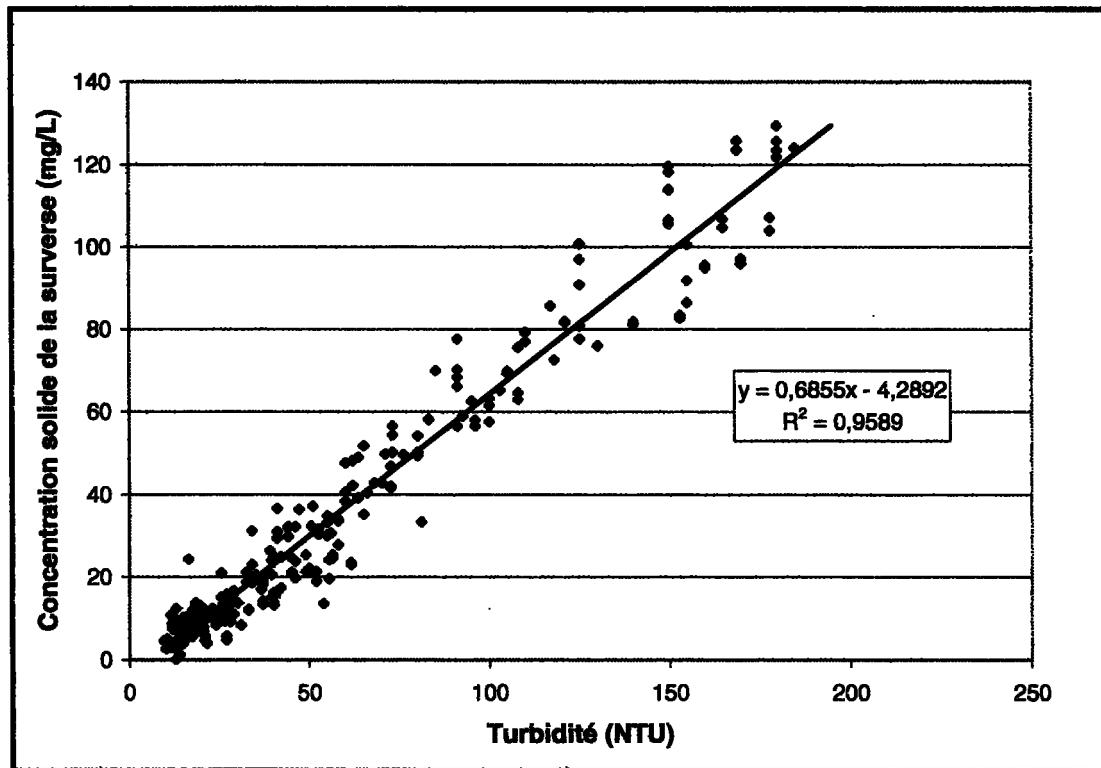


Figure 5.6 - Variation de la concentration moyenne en matières particulaires en fonction de la turbidité

5.6.3 Filtrabilité

La filtrabilité exprime la facilité à séparer les particules solides en suspension dans la liqueur Bayer par filtration. Elle se définit comme étant le rapport du temps de filtration d'un échantillon de surverse de 500 ml divisé par le temps de filtration nécessaire pour

filtrer la phase liquide de l'échantillon provenant de la filtration de l'échantillon. Plus ce rapport est élevé, plus il est difficile d'effectuer la filtration.

Aucun résultat de filtrabilité n'est présenté. En effet, les résultats obtenus au cours des expérimentations démontrent que généralement, la filtrabilité augmente en fonction de la turbidité (il est plus difficile de filtrer un échantillon de turbidité plus élevée). Aucune autre corrélation n'a pu être observée. Néanmoins, mentionnons qu'il a été impossible d'évaluer la filtrabilité de certains échantillons de surverses flokulées avec l'agent de flocculation D puisqu'il y avait formation d'un précipité à l'intérieur de ces échantillons ce qui faussait les mesures de filtrabilité.

5.6.4 Concentration en matières particulaires du sédiment

La concentration en matières particulaires du sédiment est une mesure importante représentant le niveau d'efficacité de la compaction de la boue rouge. Un récipient d'échantillonnage (0,088 m de diamètre par 0,100 m de hauteur) est inséré à l'intérieur du réservoir Couette sur un support fixe. Ainsi, au cours de l'essai, les flocs s'accumulent à l'intérieur de ce réceptacle. La mesure de la hauteur de la couche de sédiment (cm) est réalisée après chaque essai. La concentration en matières particulaires du sédiment (g/L) peut donc être obtenue en multipliant le ratio du volume de sédiment (mL) dans le contenant par la concentration solide de la boue dans le contenant.

5.6.5 Vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation est l'un des paramètres caractérisant la performance de la flocculation. Dans le test du cylindre, il est possible de mesurer le temps de passage de la ligne de boue entre les graduations d'un cylindre puis d'en calculer la vitesse de sédimentation. Cependant, à l'intérieur du système Couette, la flocculation se fait en continu (pas de ligne de boue). La méthode utilisée consiste à positionner une colonne de sédimentation dans le réservoir Couette (0,630 m de long x 0,037 m de large x 0,029 m d'épaisseur) et à utiliser une caméra (caméra monochrome de type Sony XC-ST pourvue d'une lentille Infinimini STD) pour mesurer la vitesse de sédimentation des particules. L'acquisition de données se fait en temps réel via une carte d'acquisition et le logiciel « Matrox Inspector » permet l'analyse des images vidéo. Conséquemment, lors de chaque essai, plusieurs séquences vidéo sont enregistrées. La vitesse de sédimentation de l'essai correspond à la moyenne des vitesses de sédimentation des particules individuelles retrouvées sur chaque séquence vidéo. La méthode de mesure pour obtenir la vitesse de sédimentation possède un pourcentage d'erreur élevé ($\pm 15\%$) mais elle illustre bien les variations de vitesse de sédimentation entre les variables à l'étude. La Figure 5.7 illustre le positionnement de la colonne de sédimentation dans le montage expérimental.

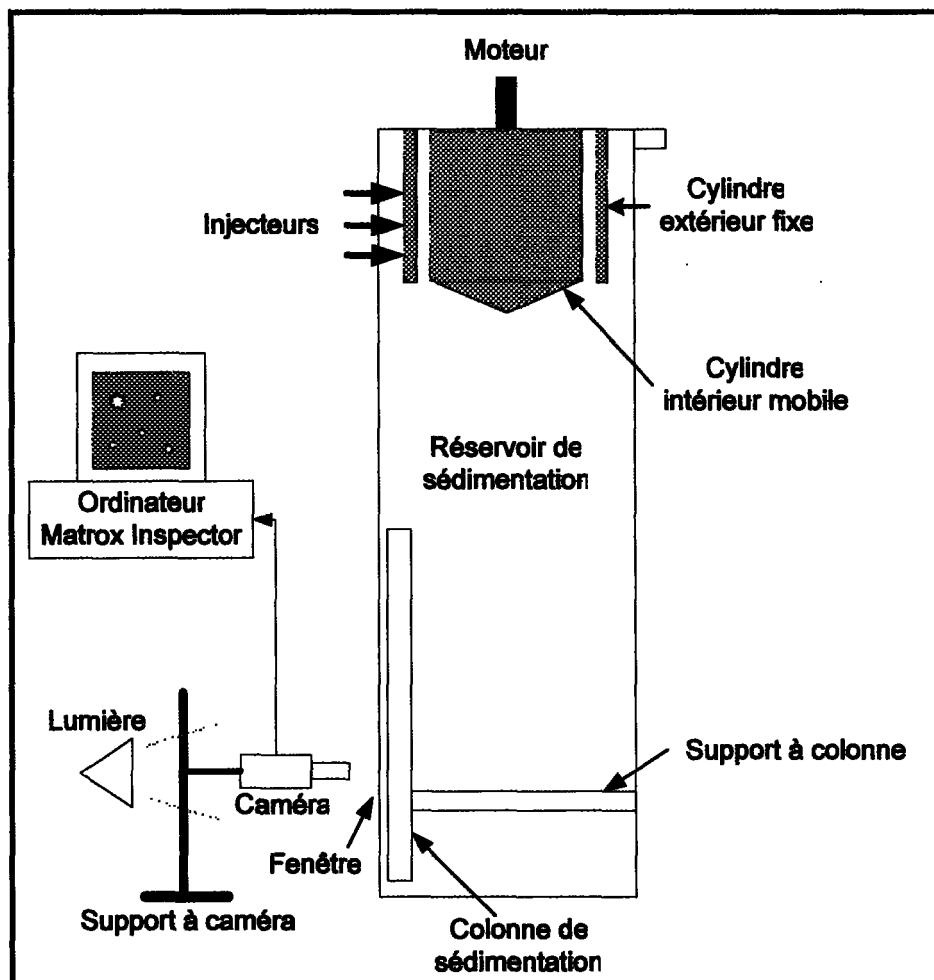


Figure 5.7 - Schématisation du montage lors de la mesure de la vitesse de sédimentation

5.7 Reproductibilité de la méthode

Considérant la taille du montage expérimental et les quantités de matières premières disponibles (boues rouges, liqueur Bayer et solution de floculant), il est difficile de reproduire plusieurs fois chaque essai comme dans la méthodologie du test du cylindre⁽¹⁾ (maximum de cinq tests par semaine). Néanmoins, il est possible d'évaluer la

reproductibilité de la méthode en reproduisant quelques fois un test cible et en analysant les mesures de turbidité. La Figure 5.8 montre les résultats de la variation de la turbidité en fonction du temps pour 6 essais de flocculation dans le système Couette et ce, sur un intervalle de quelques mois. Les résultats ont été obtenus avec le polymère A pour un dosage de 48 g/t (débit de polymère à 4,8 ml/min). Le volume de floculant requis pour effectuer la flocculation d'une suspension de boues rouges à 50 g/L est déterminé par des essais préliminaires dans le test du cylindre et dans le système Couette et le dosage correspondant est calculé (voir section 6.1).

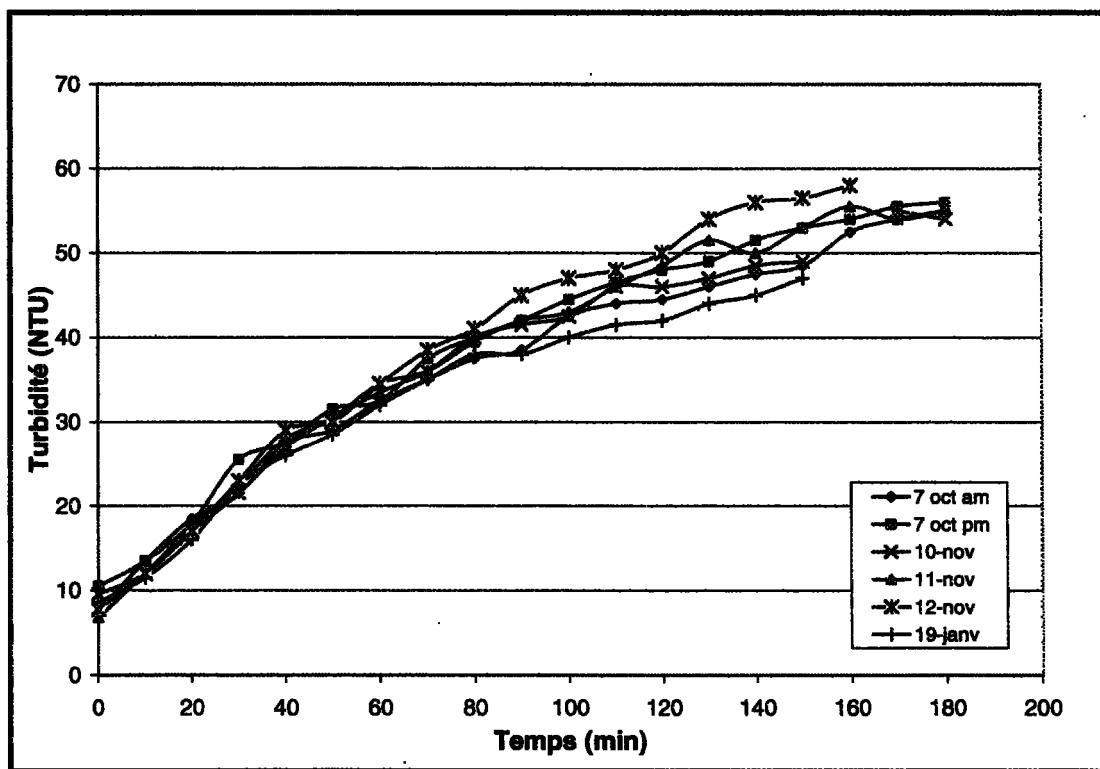


Figure 5.8 - Variation de la turbidité en fonction du temps pour 6 essais de flocculation dans le système Couette.

Les résultats obtenus démontrent que la variation de turbidité se produit de façon similaire entre les différents essais. Il est ainsi possible d'évaluer la dispersion des résultats (turbidité NTU) ou l'écart-type entre chacun des essais tels que démontré dans la Figure suivante.

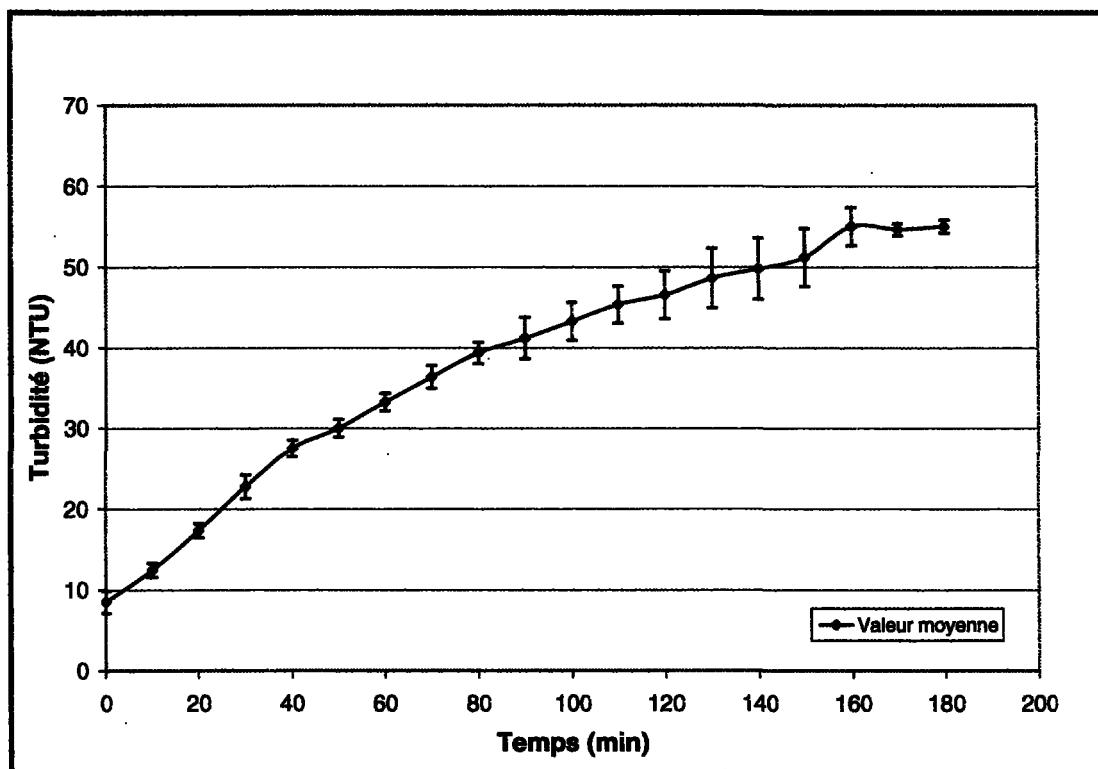


Figure 5.9 - Turbidité moyenne obtenue pour 6 essais de flocculation et dispersion des résultats.

Ainsi, pour une limite de confiance de 95%, un écart-type moyen de 2 NTU a été obtenu pour des essais similaires (6) de la variation de la turbidité en fonction du temps. La dispersion des résultats démontre un bon niveau de reproductibilité de la méthode du

système Couette. Il est également possible d'évaluer l'écart-type obtenu pour les autres mesures associées aux essais en laboratoire. Le tableau 5.1 montre les mesures obtenues pour les 6 essais.

| | Concentration (mg/L) | Filtrabilité | Niveau de banc (cm) | Vitesse de sédimentation (m/h) |
|------------------|----------------------|--------------|---------------------|--------------------------------|
| 7 oct am | 34,0 | 1,3 | - | 47,0 |
| 7 oct pm | 32,4 | 2,0 | - | 55,0 |
| 10 nov | - | 1,4 | 5,5 | 40,0 |
| 11 nov | 30,1 | 1,9 | 4,5 | 39,0 |
| 12 nov | 33,8 | 1,9 | 4,7 | 42,0 |
| 19 janv | 30,9 | 1,3 | 4,5 | 39,0 |
| Ecart-type (95%) | ± 2,1 | ± 0,3 | ± 0,7 | ± 6,6 |

Tableau 5.1 - Mesures associées à la calibration du système Couette

L'écart-type obtenu pour chacune des mesures expérimentales est calculé avec une limite de confiance de 95%⁽⁴⁹⁾. Ainsi, un bon niveau de reproductibilité est obtenu.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les objectifs du présent projet de recherche consistent à effectuer des essais de flocculation dans un système Couette, en changeant les variables afin d'établir des conditions optimales de séparation solide/liquide et de réduire la quantité de matières particulières en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à celui retrouvé en usine. Plusieurs chercheurs⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ ont démontré que la turbidité résiduelle obtenue lors de la flocculation n'est pas uniquement fonction de l'efficacité de l'agent de flocculation mais dépend également des conditions de mélange appliquées à la suspension, de la séquence d'introduction et des interactions entre les agents de flocculation. Dans la première partie de ce chapitre, les résultats obtenus par l'addition d'un seul polymère (A et B) ou par la combinaison de ceux-ci dans le système Couette seront présentés. Dans la seconde partie, les résultats obtenus par l'emploi d'agents de flocculation (D et I) seront présentés.

6.1 Simple addition de polymère A

6.1.1 Test du cylindre

La première étape, lors de l'évaluation de l'efficacité d'un polymère à floculer une suspension de boues rouges, consiste à déterminer les paramètres de base (section 5.5) et à

fixer certaines variables afin d'évaluer les effets d'une seule variable à la fois sur la flocculation. Un bon moyen de fixer ces variables consiste à les évaluer préalablement grâce à la méthodologie du test du cylindre⁽¹⁾. Ainsi, pour chaque polymère et/ou agent de flocculation, il est possible de déterminer un dosage et une concentration adéquate susceptible d'être efficace dans le système Couette. La Figure 6.1 présente les résultats de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée obtenus dans les essais de flocculation en test du cylindre, pour le polymère A à une concentration de 0,01 % p/p (section 5.4.2.) dans une suspension à 50 g/L de boues rouges.

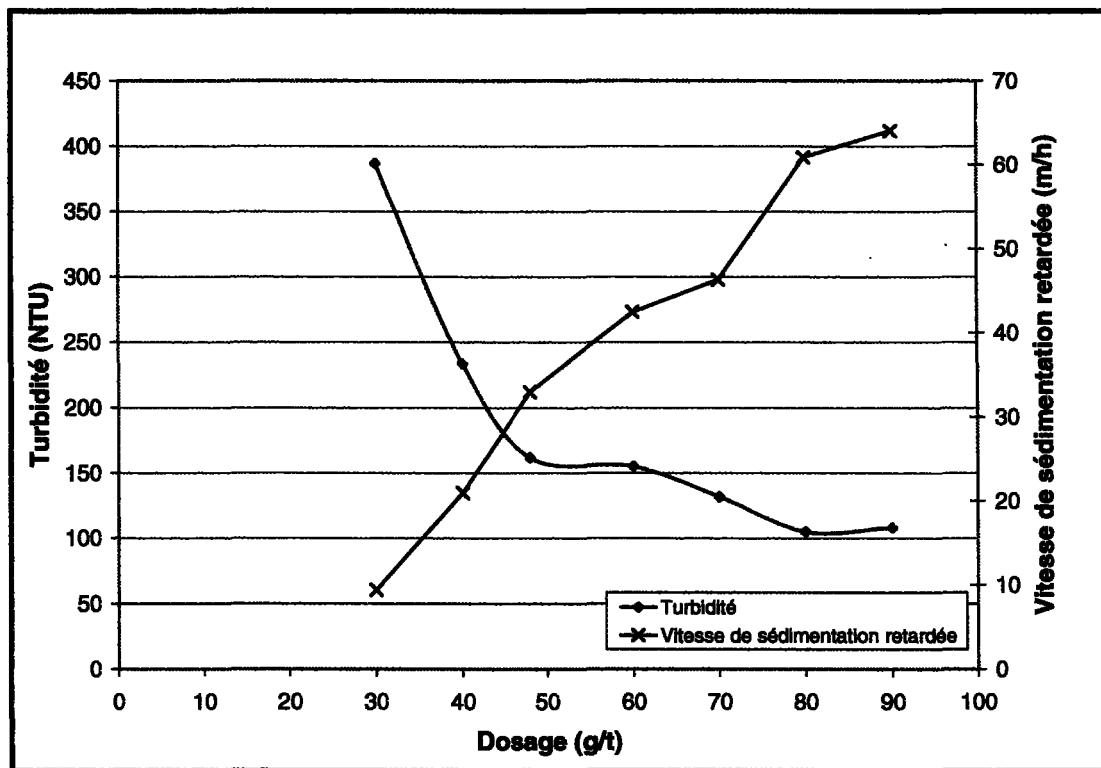


Figure 6.1 - Variation de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée en fonction du dosage de polymère A (0,01 % p/p) en test du cylindre

Chaque essai est effectué 3 fois afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures (écart-type moyen de 7 %). Sur ce graphique, il est possible d'observer que la turbidité de la surverse diminue en fonction de l'augmentation du dosage du polymère A, pour atteindre un équilibre à dosage élevé. La vitesse de sédimentation quant à elle, varie inversement à la turbidité, c'est-à-dire que la vitesse de sédimentation retardée augmente avec l'augmentation du dosage. Ainsi, l'augmentation du dosage favorise l'agrégation des particules de boues rouges, diminuant ainsi la turbidité de la surverse. Par ailleurs, plus le dosage est élevé, plus les flocons formés sont volumineux et sédimentent plus rapidement.

Le dosage initial choisi pour les expérimentations dans le système Couette est de 48 g/t. En effet, la vitesse de sédimentation retardée pour ce dosage n'est pas trop élevée (33,0 m/h) et la turbidité est près de son minimum (162 NTU). De plus, les conditions d'agitation du système Couette semblent plus efficaces que celles employées dans le test du cylindre puisque le niveau d'agitation y est mieux dispersé (uniformité) et plus facilement reproductible qu'avec le piston à disque perforé du test du cylindre (section 4.2.4.3). Il est ainsi possible de penser que le taux de rencontre entre les particules en suspension et les chaînes de polymère pourrait être plus élevé dans le système Couette que dans le test du cylindre⁽¹⁰⁾, conduisant ainsi à une amélioration de l'efficacité de la flocculation pour un même dosage⁽⁷⁾ (inutilité d'utiliser des dosages trop élevés).

Afin de vérifier si la concentration de polymère choisie est la plus efficace, une série d'essais en test du cylindre a été effectuée pour le polymère A à un dosage de 48 g/t. La Figure 6.2 présente la variation de la vitesse de sédimentation retardée et de la turbidité en fonction de la concentration de la solution de polymère. Ce graphique met en évidence une augmentation de la turbidité en fonction de l'augmentation de la concentration de polymère. Ce phénomène a déjà été observé⁽¹⁾⁽³⁾ et peut s'expliquer par l'amélioration de la dispersion du polymère (à basse concentration) à travers la suspension due à une diminution de la viscosité de la solution de polymère. Conséquemment, l'augmentation de la surface de contact entre le polymère et les particules en suspension permet d'agglomérer un plus grand nombre de matières particulaires⁽¹⁾⁽³⁾. Ainsi, la concentration de 0,01 % p/p est effectivement celle qui semble la plus efficace pour améliorer la flocculation (turbidité minimale). Par ailleurs, la vitesse de sédimentation retardée diminue avec l'augmentation de la concentration de polymère, ce qui confirme qu'à 0,01 % p/p une plus grande quantité de matières particulaires a été flokulée (33,0 m/h à 0,01 % p/p versus 8,6 m/h à 0,10 % p/p).

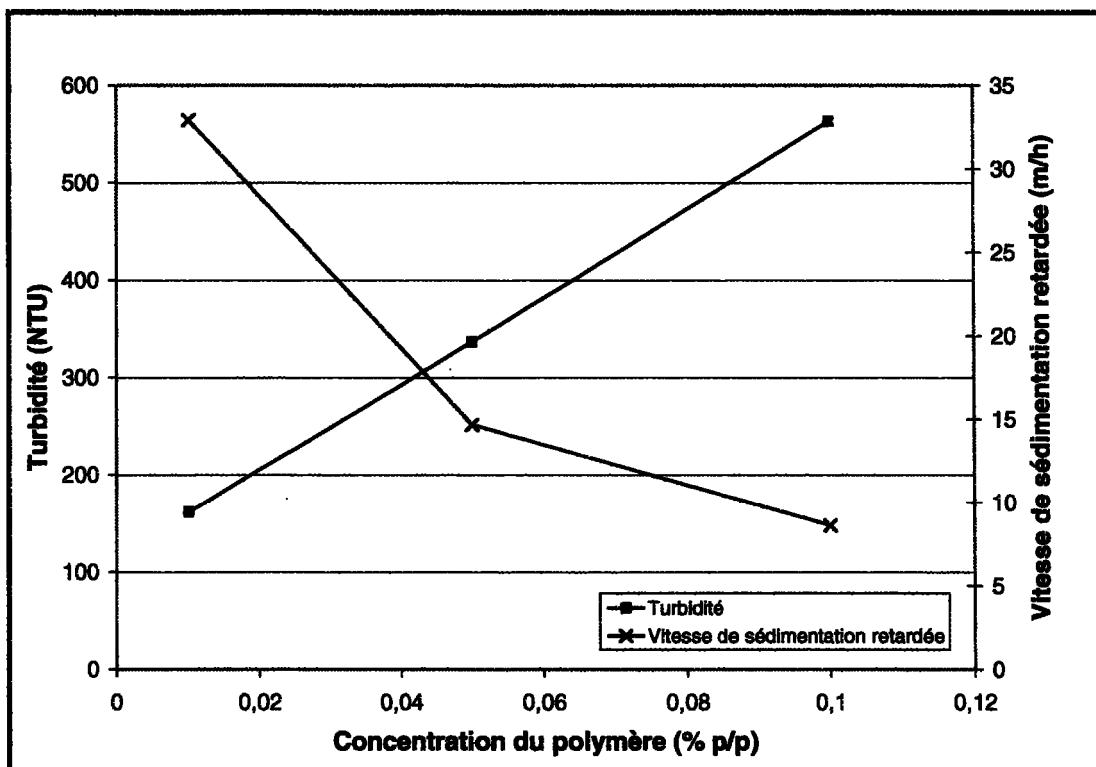


Figure 6.2 - Variation de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration de la solution de polymère A pour un dosage de 48 g/t en test du cylindre

6.1.2 Niveau et durée d'agitation dans le système Couette

Pour cette partie des travaux expérimentaux, les variables et paramètres sont fixés à l'exception de la vitesse de rotation du cylindre intérieur.

6.1.2.1 *Injection dans le Couette*

Tel que mentionné préalablement, trois injecteurs sont disposés sur le pourtour du cylindre extérieur fixe de l'appareil de Couette (injecteur Couette section 5.4.5.1). Ainsi, pour chaque injecteur la vitesse de rotation varie entre 0 et 140 rpm, afin de déterminer le meilleur niveau d'agitation pour chacun des injecteurs. Chaque essai s'effectue sur une période de 180 minutes. La Figure 6.3 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour chacun des injecteurs Couette, pour le polymère A (0,01 % p/p) à 48 g/t (4,8 ml/min).

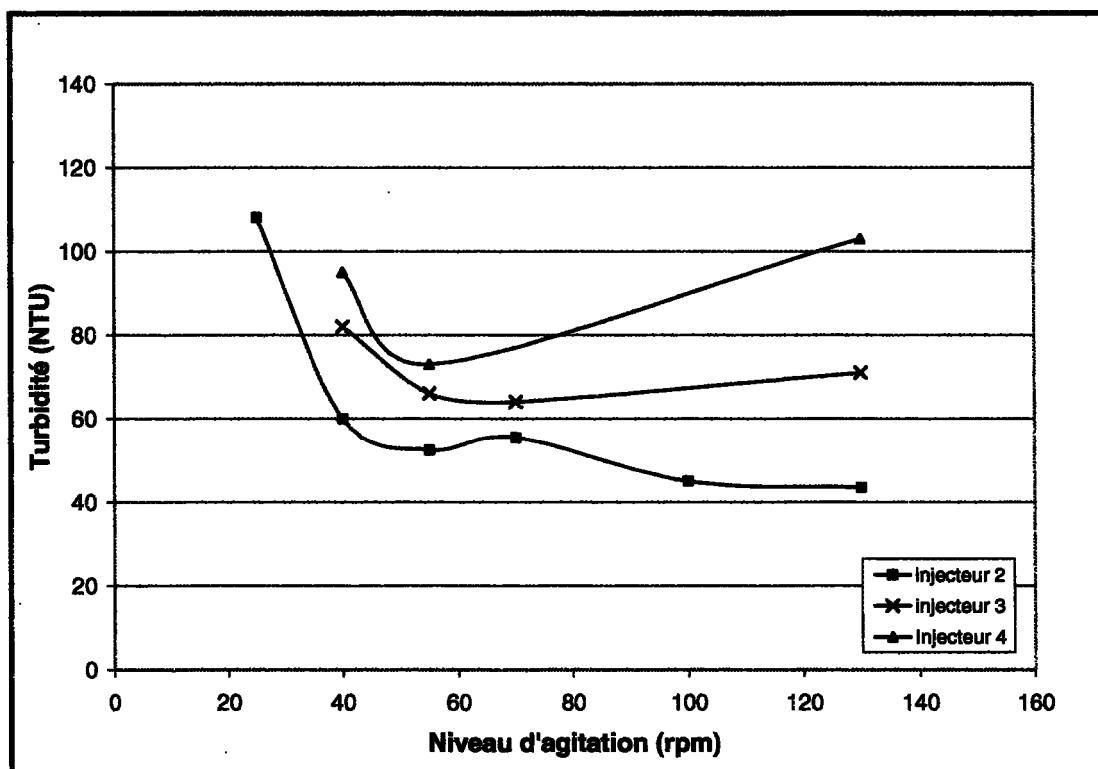


Figure 6.3 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère A, 180 minutes d'expérimentation

Un niveau d'agitation de 130 rpm utilisé conjointement avec l'injecteur 2 a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité, soit de 44 NTU. Le graphique met en évidence que pour chacun des injecteurs, la turbidité diminue pour atteindre une valeur minimale. Ainsi, pour chaque injecteur il est possible de trouver un niveau d'agitation où la turbidité est la plus basse ; 70 rpm et 64 NTU pour l'injecteur 3, 55 rpm et 73 NTU pour l'injecteur 4. Par après, les valeurs de turbidité augmentent de façon plus ou moins importante en fonction de l'injecteur utilisé. Cette tendance, que possèdent les courbes de variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation de former une cloche inversée, a déjà été observée par d'autres chercheurs⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽²⁹⁾. Dans le cas de l'injecteur 2, la courbe semble maintenir une turbidité minimale pour différents niveaux d'agitation (présence d'un plateau de turbidité minimale)⁽¹¹⁾. Il est possible qu'une augmentation continue du niveau d'agitation, pour une flocculation avec l'injecteur 2, ait pour conséquence l'augmentation de la turbidité résiduelle de la surverse telle qu'observé pour l'injecteur 3 et 4. En effet, sous l'action d'un important gradient de vitesse, les agrégats peuvent se briser et par conséquent diminuer l'efficacité de la flocculation. Ce phénomène est bien représenté par la courbe de turbidité de l'injecteur 4 où lorsque le niveau d'agitation atteint 130 rpm la turbidité augmente de façon considérable passant de 73 à 103 NTU.

D'autre part, le polymère A semble plus efficace lorsque le niveau d'agitation est élevé sur une longue période de temps. En effet, plus le temps d'agitation est court (l'injecteur 4 représentant la plus courte durée d'agitation), moins le polymère à le temps de bien ce mélanger avec la suspension, moins il y a d'interactions entre les particules et les

chaînes de polymère et plus la turbidité est élevée. De plus, il a été observé que lorsque le polymère est injecté, il tend à s'écouler le long de la paroi intérieure du cylindre fixe, avant de se mélanger à la suspension. Ainsi, sous ces conditions, un temps d'agitation plus long est nécessaire pour permettre un mélange efficace du polymère à la suspension. Après plusieurs essais, et ce malgré les nettoyages effectués, le polymère adhère légèrement à la paroi et une quantité infime de polymère est perdue au cours de chaque essai, diminuant ainsi l'efficacité de la flocculation.

Par ailleurs, pour une durée d'agitation trop longue, les agrégats formés peuvent subir les effets du gradient de vitesse qui peut les fragmenter, augmentant ainsi la turbidité résiduelle. Ainsi, lorsque la turbidité est la plus basse il y a un équilibre formé entre la fragmentation des agrégats et la formation de ceux-ci⁽¹⁰⁾. La relation complexe existant entre la durée de l'agitation et le niveau d'agitation est représentée à la Figure 6.3. En effet, plus la durée d'agitation est longue, plus il est possible d'augmenter le niveau d'agitation pour obtenir une turbidité minimale et vice versa (conditions optimales ; injecteur 2 → 130 rpm, injecteur 3 → 70 rpm, injecteur 4 → 55 rpm). Ainsi, pour une courte durée d'agitation (injecteur 4), le niveau d'agitation doit permettre l'agrégation des particules sans trop fragmenter les agrégats formés (peu de temps pour former un équilibre). Conséquemment, le niveau d'agitation optimal diminue avec la diminution du temps d'agitation.

En somme, le contrôle du niveau d'agitation du système Couette permet d'améliorer considérablement la turbidité de la surverse. En effet, pour un même dosage, une turbidité de 162 NTU avait été obtenue pour des essais en test du cylindre (Figure 6.1) comparativement à une turbidité de 44 NTU (Figure 6.3) lorsque le niveau d'agitation est contrôlé. Par conséquent, le niveau d'agitation du test du cylindre ne serait pas suffisamment efficace pour favoriser la flocculation d'une suspension de boues rouges⁽⁷⁾. Le niveau d'agitation optimal fourni par l'appareil de Couette, permet d'augmenter le taux de rencontre entre les particules et les chaînes de polymère et ainsi de favoriser la flocculation.

La Figure 6.4 présente les résultats de la variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation. Le graphique met en évidence que plus la durée d'agitation est longue, plus la moyenne des vitesses de sédimentation des particules est élevée, démontrant ainsi que les conditions de formation (niveau et durée d'agitation) des agrégats dans l'injecteur 2 sont plus efficaces pour former des agrégats plus gros et/ou plus denses. Le profil de vitesse de chaque courbe augmente pour atteindre une valeur maximale. Mentionnons que cette valeur maximale apparaît aux niveaux d'agitation correspondant aux turbidités les plus basses⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾. Il a été impossible d'évaluer la vitesse moyenne de sédimentation des particules pour l'injecteur 4 à 130 rpm, puisque la turbidité du système Couette était trop élevée pour permettre une analyse vidéo.

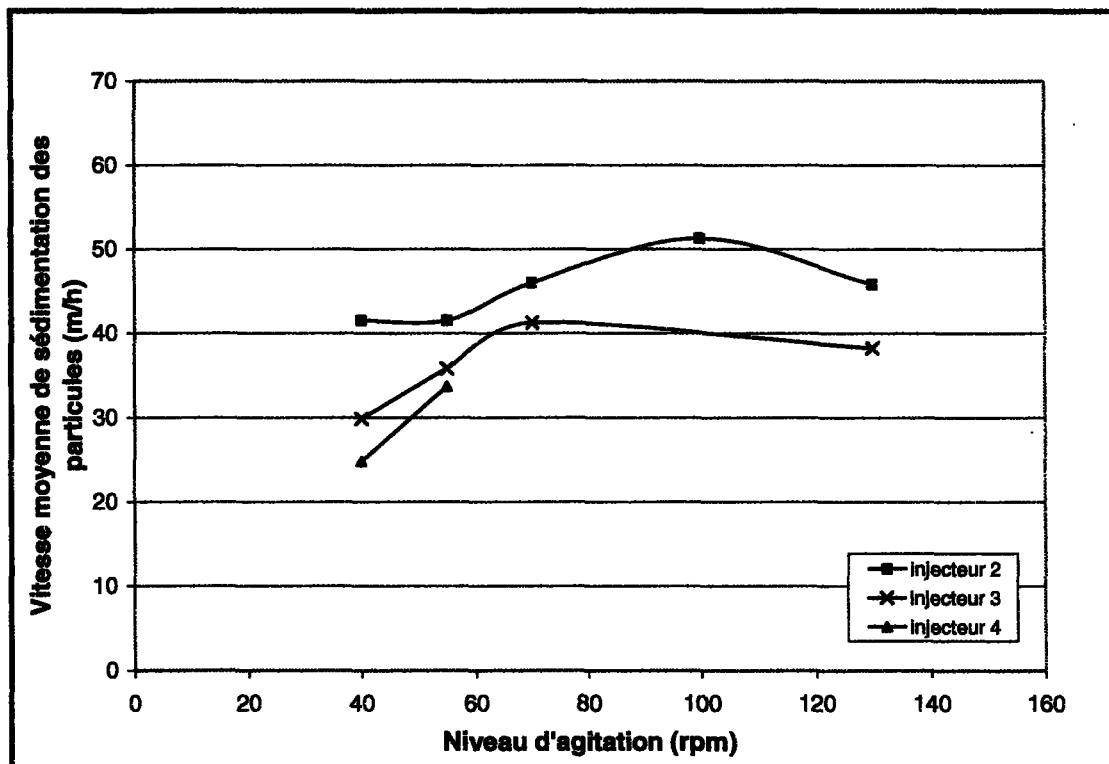


Figure 6.4 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère A, 180 minutes d'expérimentation

6.1.2.2 Injection dans les conduites torsadées

Tel que mentionné préalablement, trois types de conduites torsadées sont utilisés (section 5.4.5.2.). La conduite torsadée est positionnée sur la conduite d'alimentation du système Couette et les agrégats sont formés à l'extérieur des cylindres concentriques. Ainsi, pour chaque conduite, la vitesse de rotation du cylindre intérieur varie entre 0 et 140 rpm afin de déterminer le meilleur niveau d'agitation pour chacune de ces conduites. Chaque essai s'effectue sur une période de 180 minutes. La Figure 6.5 présente la variation de la

turbidité en fonction du niveau d'agitation pour chacune des conduites torsadées, pour le polymère A (0,01 % p/p) à 48 g/t (4,8 ml/min).

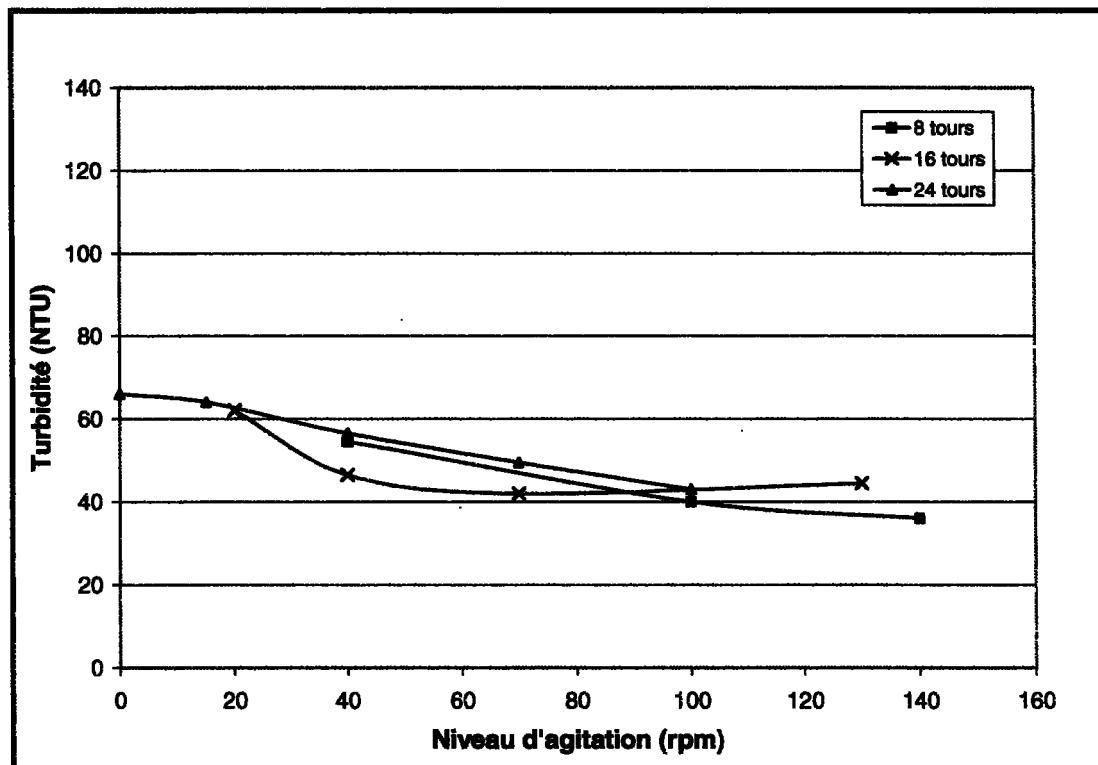


Figure 6.5 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère A, 180 minutes d'expérimentation

Un niveau d'agitation de 140 rpm utilisé conjointement avec la conduite torsadée 8 tours a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité, soit de 36 NTU. De façon générale, la turbidité diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation lorsque la flocculation est effectuée dans une conduite torsadée (la tendance de la courbe est beaucoup moins prononcé que celle observée dans les injecteurs Couette). Les variations de turbidité, dues

au niveau d'agitation (gradient de vitesse), sont beaucoup moins importantes dans les conduites torsadées que dans les injecteurs Couette. Conséquemment, puisque les résultats de turbidité varient peu (50 NTU à 60 rpm et 36 NTU à 140 rpm) il est possible de définir un ensemble de niveaux d'agitation où la turbidité est minimale (niveau d'agitation optimal variant entre 60 et 140 rpm). De plus, l'utilisation de conduites torsadées pour un niveau d'agitation peu élevé (entre 0 et 40 rpm) semble améliorer de façon considérable la turbidité comparativement aux injecteurs Couette.

Par ailleurs, le profil des vitesses moyennes de sédimentation des particules varie différemment avec l'usage des conduites torsadées, tel que présenté à la Figure 6.6. Ce graphique met en évidence que la vitesse moyenne de sédimentation diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation. La corrélation entre la turbidité et la vitesse de sédimentation (vitesse maximum pour les turbidités les plus basses), observée pour les injections dans le Couette, ne semble pas s'appliquer lorsque des conduites torsadées sont utilisées. Cette tendance du profil de vitesse a déjà été observée précédemment dans d'autres études⁽¹¹⁾. Ce phénomène pourrait s'expliquer par les effets du gradient de vitesse sur la formation des agrégats, qui varierait de l'appareil Couette à une conduite torsadée. De plus, il est possible que les conditions d'injection du polymère affectent la formation des agrégats. En effet, dans la conduite torsadée, l'injection du polymère s'effectue en plein centre de la conduite, favorisant ainsi une meilleure dispersion du polymère sur une plus courte période de temps comparativement aux injecteurs Couette.

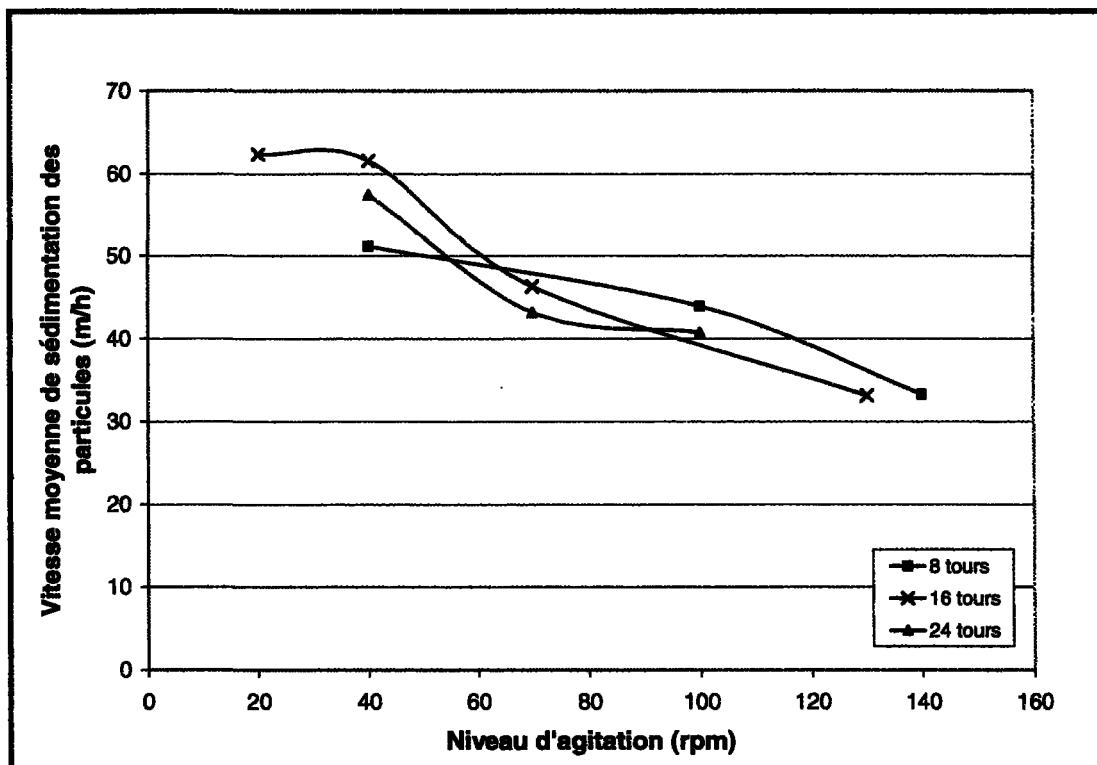


Figure 6.6 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère A, 180 minutes d'expérimentation

De façon générale, les agrégats formés dans les conduites torsadées subissent les effets de gradients de vitesse sur une plus longue période de temps que ceux formés dans le système Couette (gradient induit par la conduite torsadée + gradient induit par l'appareil Couette). De plus, les agrégats formés dans une conduite torsadée semblent être déjà assez volumineux lors de leurs entrées dans le système Couette. Ceci peut être du à une meilleure dispersion du polymère, à l'action du gradient de vitesse et des forces centrifuges agissant dans la conduite torsadée. En effet, pour de bas niveaux d'agitation, les vitesses moyennes

de sédimentation sont beaucoup plus élevées chez les agrégats formés dans les conduites torsadées que dans le système Couette (à 40 rpm ; la vitesse maximale pour les conduites torsadées est de 62,0 m/h et de 42,0 m/h pour les injecteurs Couette) indiquant ainsi que les agrégats provenant des conduites torsadées sont plus volumineux et/ou plus denses. Un gradient de vitesse supplémentaire (fournit par l'appareil Couette) pourrait contribuer à réduire la taille de ces agrégats, diminuant ainsi la vitesse moyenne de sédimentation des particules avec l'augmentation du niveau d'agitation tel qu'observé dans la Figure 6.6.

En somme, l'utilisation de conduites torsadées avec le polymère A permet d'améliorer la turbidité résiduelle de la surverse. Ceci pourrait être en partie attribuable aux conditions d'injection du polymère qui varieraient entre les conduites et les injecteurs Couette. En effet, il semble y avoir une perte d'efficacité du polymère lorsque les injecteurs Couette sont utilisés puisqu'une partie du polymère adhère à la paroi du cylindre. Néanmoins, les conditions de mélange optimales pour l'emploi du polymère A (0,01 % p/p) à 48 g/t dans le système Couette sont : l'injecteur 2 et la conduite torsadée 8 tours comme meilleurs points d'injection et un niveau d'agitation variable entre 60 et 140 rpm.

6.1.3 Variation du dosage dans le système Couette

Afin de déterminer si le dosage de 48 g/t est suffisamment efficace pour la flocculation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer, différents essais sur la variation du dosage ont été effectués. Pour les essais, la concentration du polymère A est fixée à 0,01 % p/p mais le dosage varie d'un essai à l'autre. Chaque essai a une durée de 180 minutes. La Figure 6.7 présente les résultats de la variation de la turbidité en fonction du dosage ajouté pour des essais dans le système Couette avec le polymère A injecté dans la conduite torsadée 8 tours et où le niveau d'agitation varie de 40, 100 et 140 rpm.

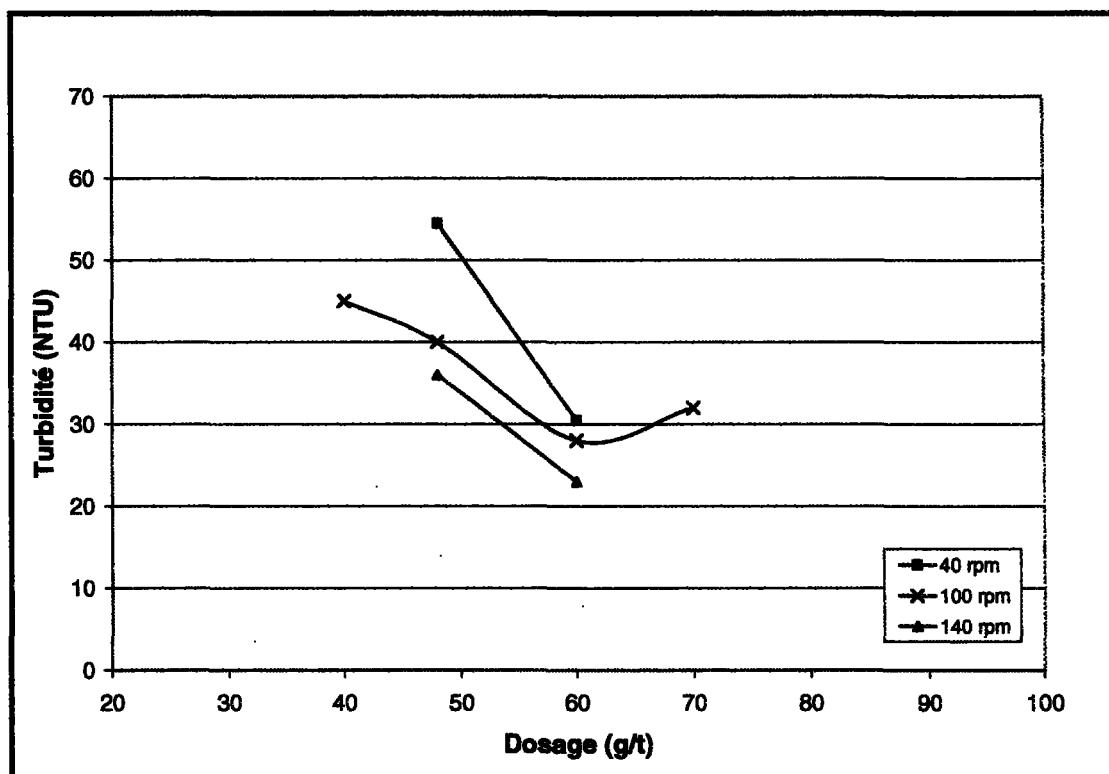


Figure 6.7 - Variation de la turbidité en fonction du dosage ajouté pour trois niveaux d'agitation, polymère A, 180 minutes d'expérimentation

Les turbidités obtenues diminuent avec l'augmentation du dosage pour atteindre une valeur minimale à 60 g/t. Au-delà de cette valeur, la quantité supplémentaire de polymère ajoutée est inefficace et augmente même la valeur résiduelle de la turbidité. En effet, il est possible qu'une quantité de polymère non adsorbée reste en suspension dans la liqueur ce qui contribue à augmenter la turbidité de la suspension (phénomène observé dans le traitement des eaux)⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾. Une turbidité minimale de 23 NTU est obtenue pour un niveau d'agitation de 140 rpm. De plus, les valeurs de turbidité augmentent légèrement avec la diminution du niveau d'agitation passant de 28 NTU à 100 rpm et 31 NTU à 40 rpm pour un dosage de 60 g/t. Ceci peut suggérer que pour un même dosage, un niveau d'agitation plus élevé aide à la dispersion des chaînes de polymère et à la création d'agrégats (diminution de la turbidité). D'autre part, les agrégats formés en utilisant des dosages optimaux de polymère, semblent beaucoup plus résistants aux effets d'un gradient de vitesse élevé⁽¹⁰⁾. Conséquemment, le dosage et les conditions de mélange (niveau et durée d'agitation) de la suspension sont des facteurs influençant clairement la performance de la flocculation. Mentionnons que le profil des vitesses moyennes de sédimentation, obtenu pour chacun des essais, varie également en fonction du dosage ajouté. En effet, contrairement aux essais en test du cylindre, le profil de vitesse n'augmente pas continuellement en fonction du dosage mais augmente pour atteindre une valeur maximale lorsque la turbidité est minimale. Ainsi, pour un niveau d'agitation de 100 rpm, les valeurs des vitesses moyennes de sédimentation retardées varient de 33,0 m/h à 40 g/t, 44,0 m/h à 48 g/t, 54,0 m/h à 60 g/t et 48,0 m/h à 70 g/t.

6.1.3.1 Hauteur moyenne de la couche de sédiment

La Figure 6.8 présente la variation de la hauteur moyenne de la couche de sédiment et de la turbidité en fonction du dosage de polymère ajouté à la suspension. Les résultats de turbidité sont les mêmes que ceux obtenus à la Figure 6.7 pour des essais de flocculation avec le polymère A (0,01 %) à 100 rpm, injecté dans la conduite torsadée 8 tours. Les résultats de hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont ceux obtenus pour chacun des essais de flocculation dans les mêmes conditions.

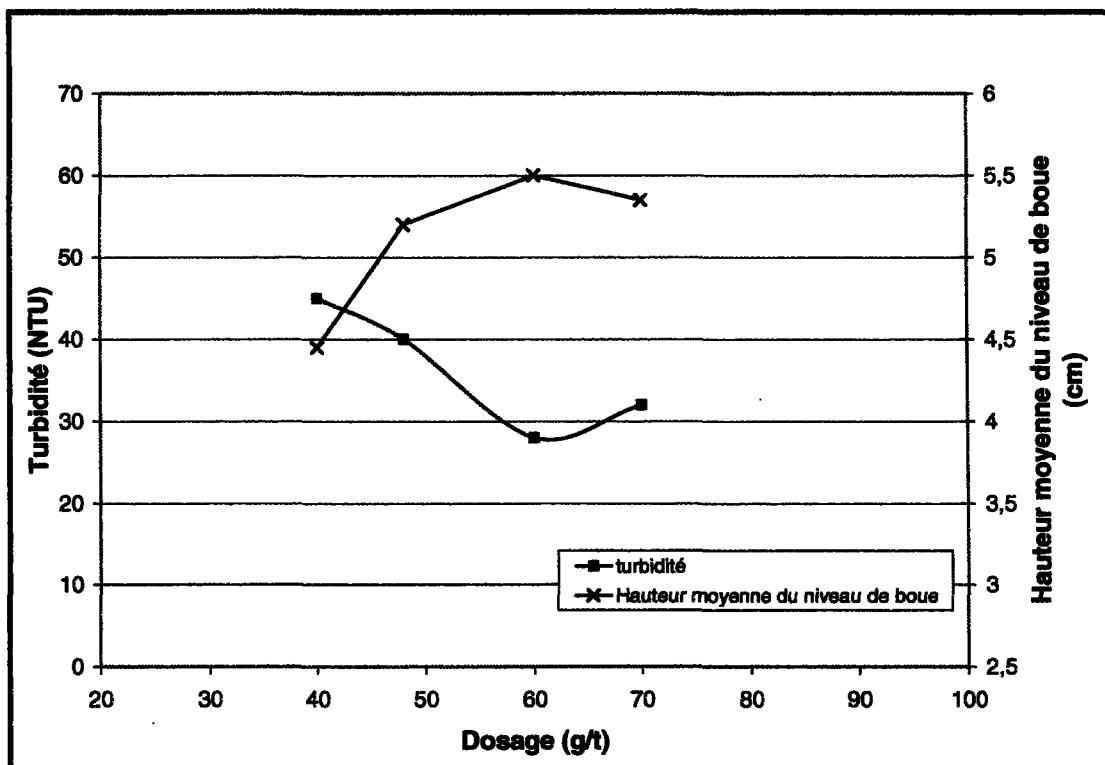


Figure 6.8 - Variation de la hauteur moyenne de la couche de sédiment et de la turbidité en fonction du dosage de polymère A, 180 minutes d'expérimentation

Il est possible d'observer que la hauteur moyenne la plus élevée (5,5 cm) est obtenue lorsque la turbidité est à son niveau le plus bas (28 NTU). Ainsi, le niveau de compaction du sédiment serait affecté par les conditions de mélanges (dosage, niveau et durée d'agitation) appliquées lors de la flocculation.

6.1.4 Type de boue

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, la composition typique de la boue rouge varie en fonction de la source et de la composition de la bauxite elle-même. Une série d'essais a été réalisée afin d'observer les effets de la composition de la bauxite sur l'efficacité de la flocculation. Les essais sont similaires à ceux effectués dans la section 6.1.2.1, c'est-à-dire que le polymère A (0,01 % p/p) à 30 g/t est injecté dans un injecteur Couette et la vitesse de rotation du cylindre intérieur varie entre 0 et 140 rpm pour un second type de boue (II). La Figure 6.9 présente les résultats de la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour des essais de flocculation avec deux différents types de boue.

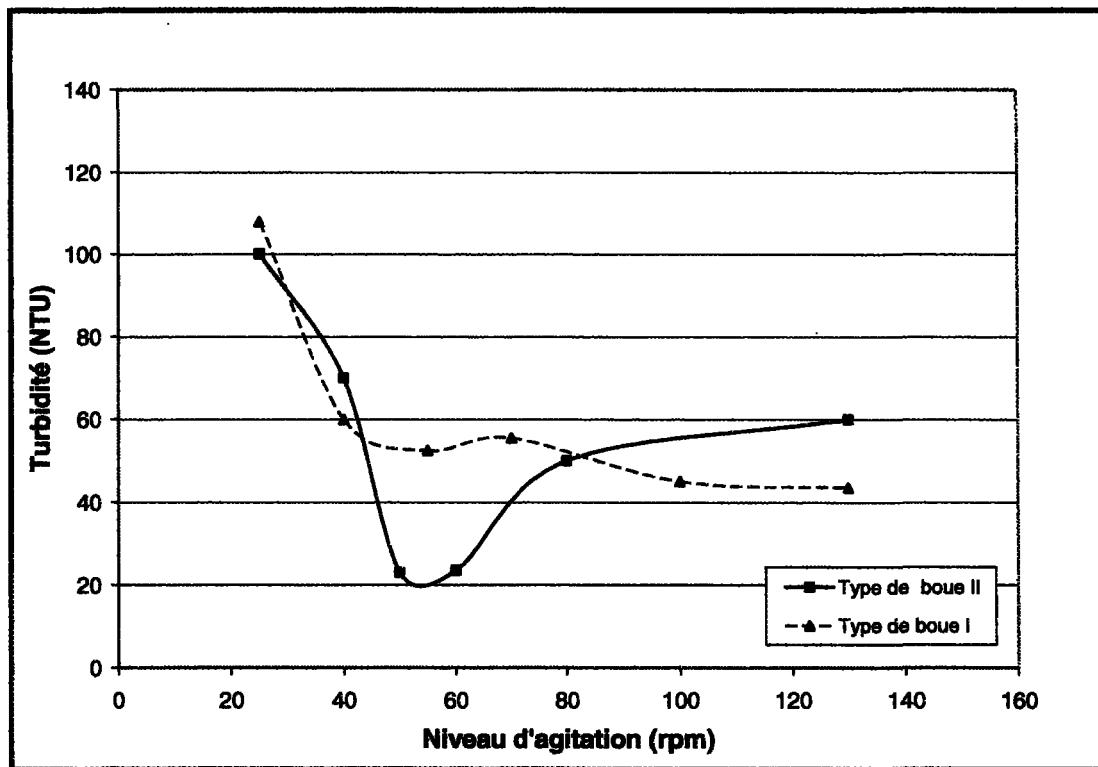


Figure 6.9 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour deux types de boue, polymère A, injecteur 2, 180 minutes d'expérimentation

Des analyses par diffraction rayon X ont permis de déterminer qualitativement que le premier type de boue (I), comparativement au second type de boue (II), contient des quantités beaucoup plus importantes de certains minéraux typiques de la boue rouge tels que la rutile, la sodalite et l'hématite. Il est également important de mentionner que les polymères n'ont pas tous la même affinité à s'adsorber et à floculer chacun des composants de la boue. Ainsi, le polymère A semble plus efficace pour floculer le type de boue (II) puisque les turbidités obtenues sont inférieures d'un facteur 2 à celles du type de boue (I) (turbidité minimale de 23 NTU à 50 rpm (II) par rapport à 44 NTU à 130 rpm (I)).

Par ailleurs, les conditions de mélanges optimales ne sont pas les mêmes que celles obtenues par le précédent type de boue (I). Un niveau d'agitation et un dosage inférieur permettent d'obtenir une turbidité plus basse. Des essais de variation du dosage du polymère A (0,01 % p/p) injecté dans l'injecteur 2 sur le type de boue (II) à 50 rpm ont permis de déterminer que le dosage idéal pour obtenir la turbidité la plus basse serait de 40 g/t (23 NTU à 30 g/t, 19 NTU à 40 g/t, 20 NTU à 45 g/t, 21 NTU à 50 g/t, 27 NTU à 60 g/t et 28 NTU à 90 g/t). Ceci peut suggérer que la quantité de polymère initialement présente dans la boue « mémoire de la boue » (section 5.5.2.) serait plus élevée dans le type de boue (II), conduisant ainsi à la réduction du dosage nécessaire pour flocculer une suspension de boues rouges à 50 g/L.

En somme, la composition de la boue semble influencer grandement l'efficacité de la flocculation. En effet, les conditions de mélange permettant d'obtenir une turbidité minimale vont varier en fonction du type de boue. Néanmoins, les tendances des courbes restent les mêmes, c'est-à-dire qu'un profil de turbidité en forme de cloche inversée est obtenu pour chacun des types de boue. Le seul changement majeur se situe au niveau du plateau de turbidité minimum qui peut être plus grand d'un type de boue à l'autre (entre 100 et 140 rpm pour le type de boue (I) et 50-60 pour le type de boue (II)).

6.2 Simple addition de polymère B

6.2.1 Test du cylindre

La Figure 6.10 présente les résultats de turbidité et de vitesse de sédimentation retardée obtenus dans les essais de flocculation en test du cylindre, pour le polymère B à une concentration de 0,01 % p/p (section 5.4.2.) dans une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer à 50 g/L. Chaque essai est reproduit 3 fois afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures.

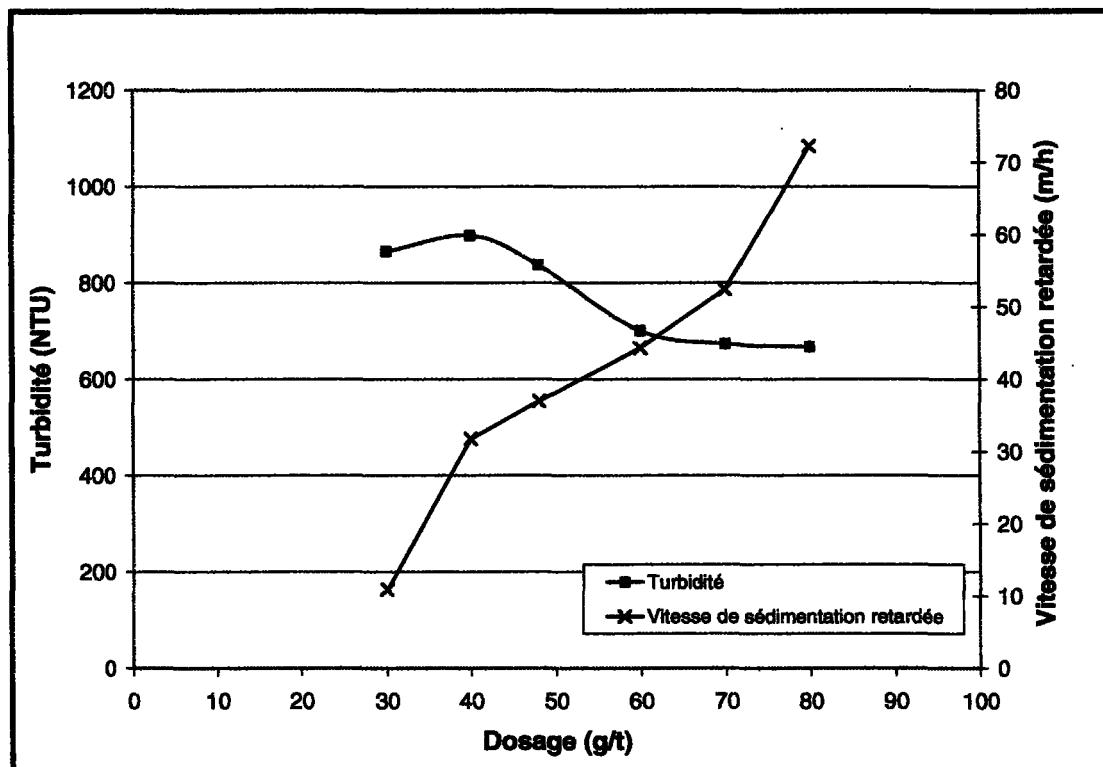


Figure 6.10 - Variation de la turbidité et de la vitesse de sédimentation retardée en fonction du dosage du polymère B (0,01 % p/p) en test du cylindre.

Les résultats de turbidité de la Figure 6.10 diminuent avec l'augmentation du dosage du polymère B pour atteindre un équilibre à dosage élevé. Cette tendance est la même que celle observée pour le polymère A (Figure 6.1) à l'exception des valeurs de turbidité qui sont beaucoup plus élevées avec le polymère B (turbidité obtenue à 48 g/t pour ; le polymère A → 162 NTU, pour le polymère B → 837 NTU). Le polymère B serait donc beaucoup moins efficace pour agglomérer les particules de boues rouges⁽¹⁾. La vitesse de sédimentation retardée, quant à elle, augmente avec l'augmentation du dosage. Le dosage initial choisi pour les expérimentations dans le système Couette est de 40 g/t. En effet, la vitesse de sédimentation retardée pour ce dosage n'est pas trop élevée (32,0 m/h) et la turbidité est de 898 NTU.

Afin de vérifier si la concentration de polymère choisie est bien celle la plus efficace, une série d'essais en test du cylindre a été effectuée pour le polymère B à un dosage de 40 g/t. La concentration de 0,01 % p/p a permis d'obtenir les plus bas résultats de turbidité soit de 898 NTU comparativement à 947 NTU à 0,05 % p/p et 953 NTU pour 0,10 % p/p. Le profil de vitesse, quant à lui, est similaire à celui observé pour le polymère A, c'est-à-dire que la vitesse diminue avec l'augmentation de la concentration du polymère passant de 37,0 m/h pour une concentration de 0,01 % p/p, à 35,0 m/h pour une concentration de 0,05 % p/p et à 29,0 m/h pour un concentration de 0,10 % p/p. Ainsi à basse concentration, le polymère se disperse beaucoup mieux dans la suspension, ce qui favorise l'agglomération des particules et augmente la valeur de la vitesse de sédimentation retardée.

6.2.2 Niveau et durée d'agitation dans le système Couette

Une méthode d'expérimentation similaire à celle décrite pour la simple addition de polymère A a été utilisée pour évaluer l'efficacité du polymère B.

6.2.2.1 *Injection dans le Couette*

Tel que mentionné préalablement, trois injecteurs sont disposés sur le pourtour du cylindre extérieur fixe de l'appareil de Couette (injecteur Couette section 5.4.5.1). Ainsi, pour chaque injecteur la vitesse de rotation varie entre 0 et 140 rpm afin de déterminer le meilleur niveau d'agitation pour chacun des injecteurs. Chaque essai s'effectue sur une période de 180 minutes. La Figure 6.11 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour chacun des injecteurs Couette pour le polymère B (0,01 % p/p) à 40 g/t.

Le plus bas résultat de turbidité, soit de 73 NTU, a été obtenu avec un niveau d'agitation de 60 rpm et une injection de polymère dans l'injecteur 2. La Figure 6.11 met en évidence que la courbe de variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation suit la tendance de la cloche inversée, c'est-à-dire que la turbidité diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation jusqu'à l'atteinte d'un état d'équilibre où la turbidité est minimale (plateau de turbidité)⁽¹¹⁾. La même tendance est observée pour l'injecteur 3 où la turbidité minimale est de 99 NTU à 80 rpm. Lorsque le niveau d'agitation devient suffisamment élevé, les valeurs de turbidité augmentent de façon importante passant de 84 NTU à 100 rpm à 170 NTU à 140 rpm pour l'injecteur 2. Un seul essai de flocculation a été effectué

avec l'injecteur 4 cependant il est possible de penser que la tendance de la courbe aurait été la même que celle observée pour les injecteurs 2 et 3. De plus, le polymère B semble plus efficace lorsqu'il est mélangé à la suspension sur une longue période de temps (injecteur 2 représentant la plus longue durée d'agitation). Ainsi, plus le temps d'agitation est court, moins le polymère a le temps de bien se mélanger avec la suspension, minimisant le nombre d'interactions entre les particules et les chaînes de polymère et augmentant ainsi la turbidité résiduelle de la surverse (tel qu'observé pour le polymère A).

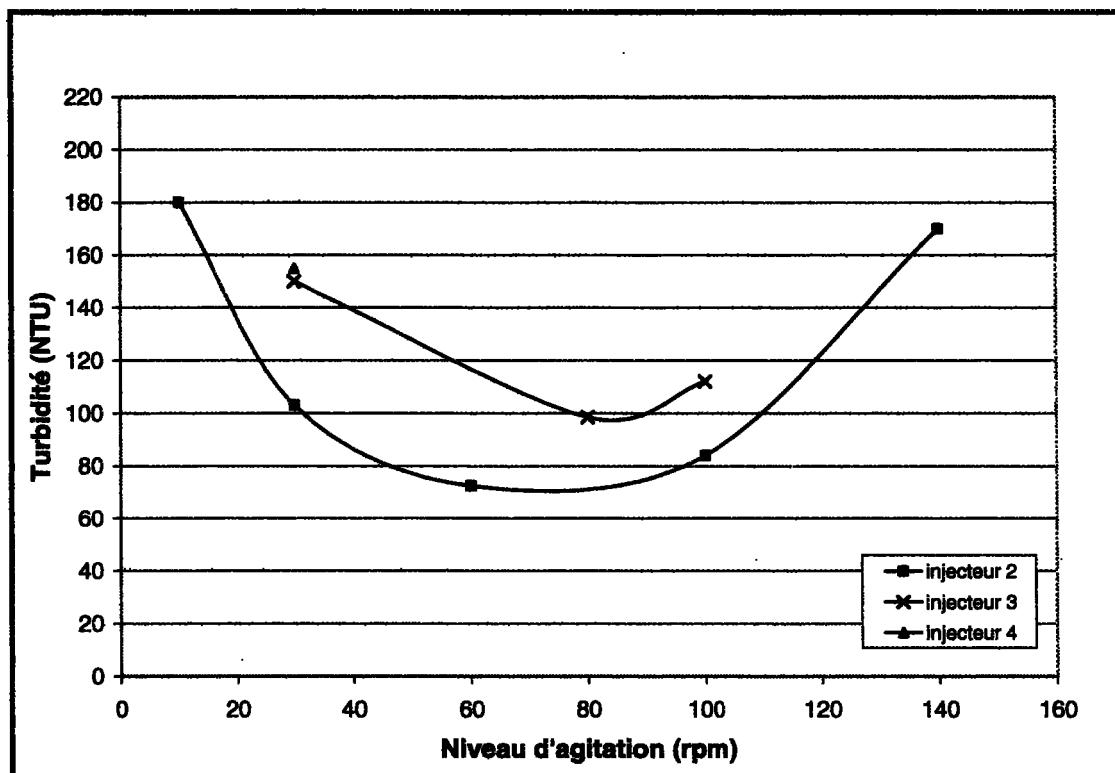


Figure 6.11 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère B, 180 minutes d'expérimentation

Pour des dosages similaires, les turbidités obtenues avec le polymère B sont beaucoup plus élevées que celles obtenues avec le polymère A. En effet, pour une injection de polymère dans l'injecteur 2 et pour un niveau d'agitation de 100 rpm, la turbidité est de 45 NTU pour le polymère A comparativement à 84 NTU pour le polymère B. Par conséquent, le polymère B serait moins efficace pour floculer une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. Les mêmes observations avaient été obtenues pour les essais préliminaires en test du cylindre et par une étude antérieure⁽¹⁾. Par ailleurs, le polymère B semble plus sensible aux niveaux d'agitation. En effet, contrairement au polymère A où des niveaux d'agitation élevés (130 rpm) avaient permis d'obtenir de bas résultats de turbidité, les niveaux d'agitation du polymère B ne doivent pas être trop élevés (entre 50 et 100 rpm) pour obtenir une bonne flocculation. Conséquemment, les agrégats formés avec le polymère B, semblent plus fragiles sous l'action d'un gradient de vitesse important et se brisent plus facilement.

Le contrôle du niveau d'agitation du système Couette permet d'améliorer considérablement la turbidité résiduelle de la surverse d'une suspension flokulée avec le polymère B. En effet, pour le même dosage une turbidité de 898 NTU avait été obtenue pour des essais en test du cylindre (Figure 6.10) comparativement à une turbidité de 73 NTU (Figure 6.11) lorsque le niveau d'agitation est contrôlé.

La Figure 6.12 présente la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette. Ce graphique met en évidence que plus la durée d'agitation est longue, plus la moyenne des vitesses de sédimentation des particules est élevée, démontrant ainsi que les conditions de formation (niveau et durée d'agitation) des agrégats dans l'injecteur 2 sont plus efficaces pour former des agrégats plus gros et/ou plus denses. La diminution de la vitesse moyenne de sédimentation semble ainsi proportionnelle à la diminution de la durée de l'agitation (pour un niveau d'agitation de 30 rpm, une vitesse moyenne de sédimentation de 24,0 m/h est obtenue pour l'injecteur 2, 22,0 m/h pour l'injecteur 3 et 19,0 m/h pour l'injecteur 4). Par ailleurs, le profil de vitesse de chaque courbe augmente pour atteindre une valeur maximale lorsque la turbidité est à son plus bas⁽¹¹⁾ (33,0 m/h et 73 NTU pour l'injecteur 2 ainsi que 29,0 m/h et 99 NTU pour l'injecteur 3).

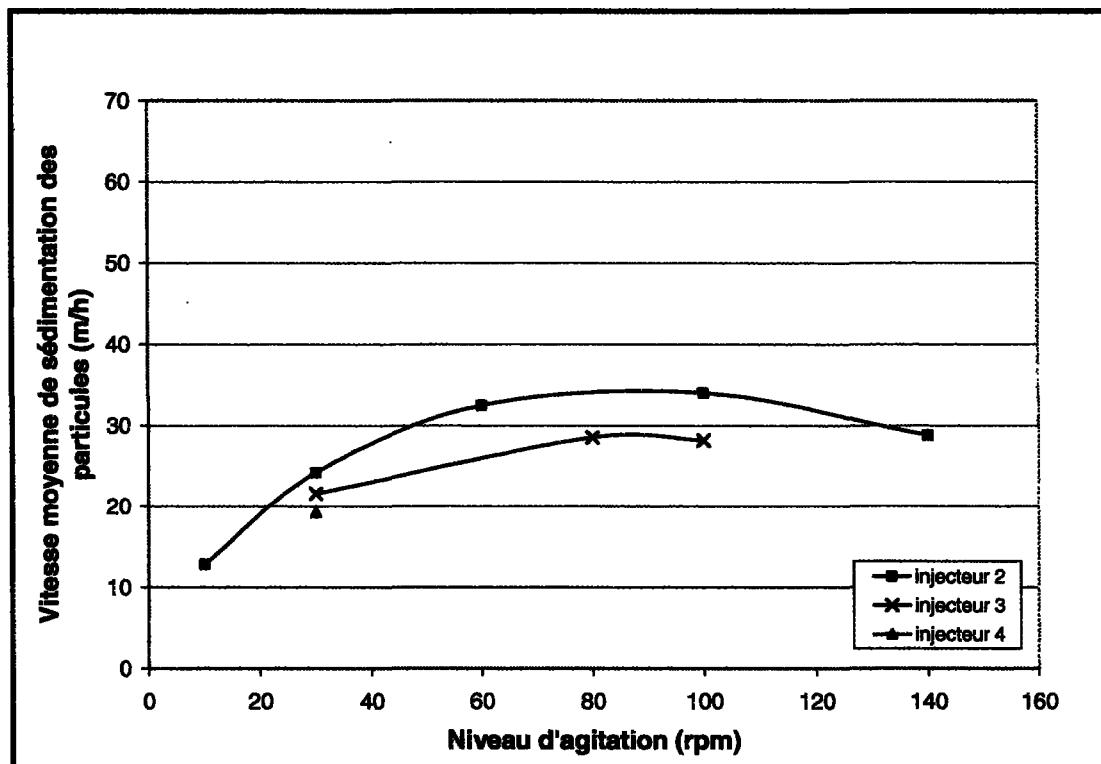


Figure 6.12 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les injecteurs Couette, polymère B, 180 minutes d'expérimentation

Mentionnons également que pour des dosages similaires, les vitesses moyennes de sédimentation obtenues avec l'usage du polymère B sont très inférieures à celles obtenues par le polymère A (Figure 6.4). En effet, pour un niveau d'agitation de 100 rpm et une injection de floculant dans l'injecteur 2, une vitesse moyenne de sédimentation de 51,0 m/h (45 NTU) a été obtenue pour le polymère A comparativement à 34,0 m/h (84 NTU) pour le polymère B. Les résultats obtenus semblent ainsi démontrer que lorsque la vitesse moyenne de sédimentation augmente, il y a une amélioration de l'efficacité de la flocculation.

(diminution de la turbidité résiduelle)⁽¹¹⁾. Plus cette vitesse est élevée et plus la turbidité est minimale. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la structure des agrégats. Plus un agrégat est volumineux et/ou dense, plus il se compose d'un grand nombre de particules, moins il y a de particules résiduelles dans la solution et plus la turbidité diminue.

6.2.2.2 Injection dans les conduites torsadées

Pour chacune des trois conduites torsadées, la vitesse de rotation du cylindre intérieur varie entre 0 et 140 rpm afin de déterminer le meilleur niveau d'agitation. Chaque essai s'effectue sur une période de 180 minutes. La Figure 6.13 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour chacune des conduites, pour le polymère B (0,01 % p/p) à 40 g/t.

Un niveau d'agitation de 80 rpm utilisé conjointement avec la conduite 24 tours a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité, soit de 115 NTU. De façon générale, la turbidité diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation pour atteindre un minimum (plateau de turbidité)⁽¹¹⁾. Par après, lorsque le niveau d'agitation atteint une valeur suffisamment élevée, la turbidité augmente rapidement pour atteindre des valeurs beaucoup plus importantes (profil de turbidité en forme de cloche inversée). Les valeurs de turbidité obtenues avec les injections de polymère B dans les conduites torsadées sont supérieures à celles obtenues avec les injecteurs. Il est ainsi probable que le gradient de vitesse, induit dans les conduites torsadées, ne soit pas suffisamment efficace (trop ou pas assez intense) pour former des agrégats de bonne taille lorsque le polymère B est utilisé. Il a d'ailleurs été

observé que les agrégats, à la sortie de la conduite torsadée, étaient de façon générale plus petits et de formes plus profilés et/ou allongés lorsque le polymère B était utilisé.

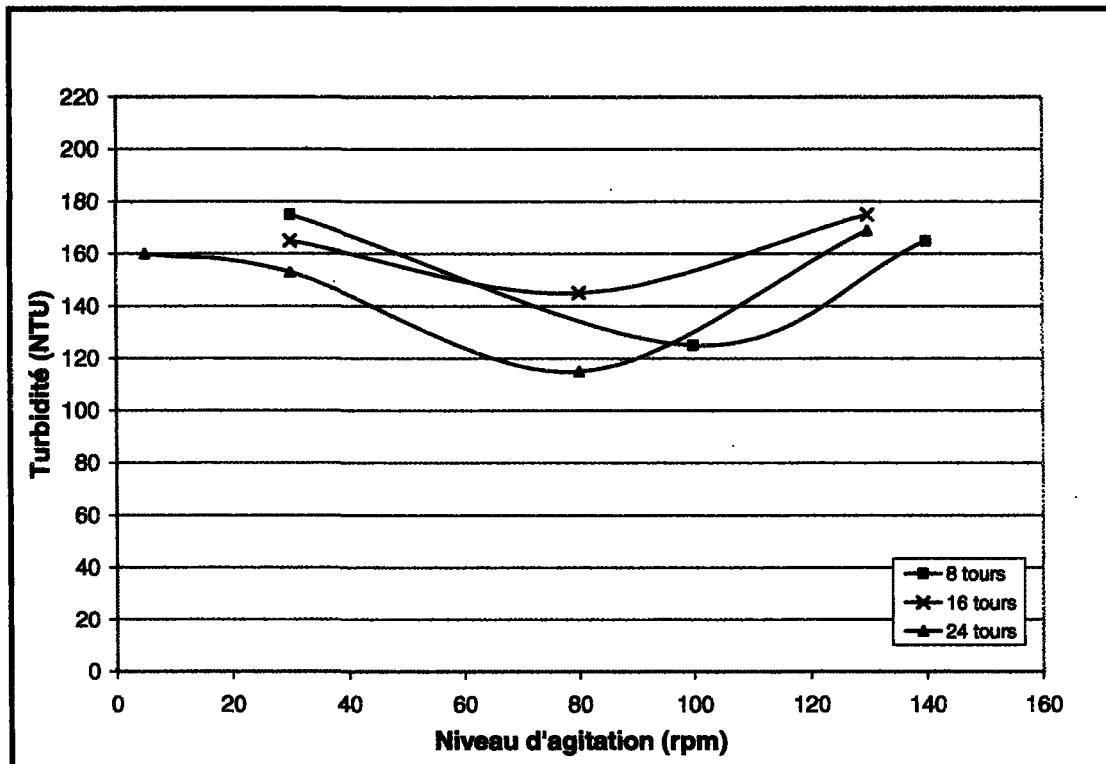


Figure 6.13 - Variation de la turbidité de la surverse en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère B, 180 minutes d'expérimentation

La Figure 6.14 illustre les résultats des vitesses moyennes de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation, pour chacune des conduites torsadées. Pour la conduite torsadée 24 tours, la vitesse moyenne de sédimentation augmente et atteint une valeur maximale de 44,0 m/h à 30 rpm. Par après, la vitesse de sédimentation diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation. Pour les conduites torsadées 8 et 16 tours, uniquement une diminution du profil de vitesse est observée puisque aucun essai n'a été

effectué pour de bas niveau d'agitation. De plus, il a été impossible d'obtenir les résultats des vitesses moyennes de sédimentation pour des niveaux d'agitation élevés dans le cas de ces deux conduites puisque la turbidité était élevée et rendait difficile une analyse par imagerie vidéo.

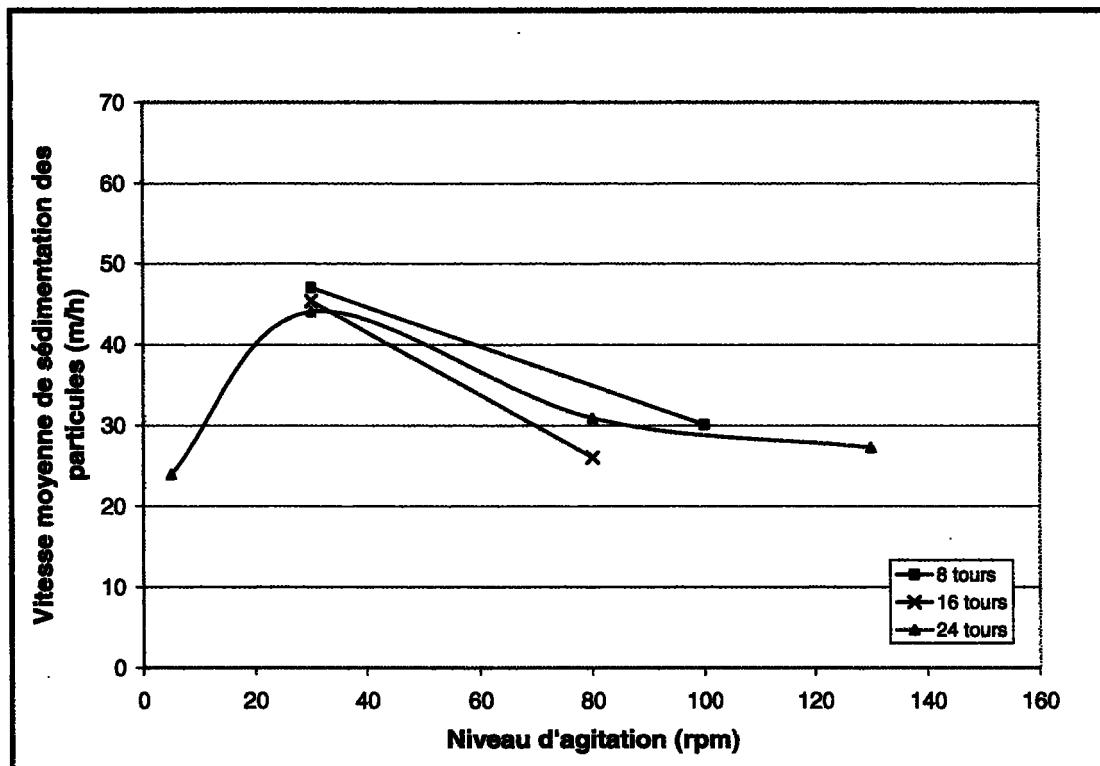


Figure 6.14 - Variation de la vitesse moyenne de sédimentation des particules en fonction du niveau d'agitation pour les conduites torsadées, polymère B, 180 minutes d'expérimentation

D'autre part, la corrélation existant entre la turbidité et la vitesse de sédimentation (vitesse maximum pour les turbidités les plus basses) observée pour les injections dans le Couette, ne semble pas s'appliquer lorsque des conduites torsadées sont utilisées. Les

conditions d'injection du polymère dans les conduites torsadées (injection dans le centre de la conduite) ne semblent pas améliorer les performances de la flocculation dans le cas du polymère B. En effet, malgré les valeurs élevées de vitesses de sédimentation, les valeurs de turbidité demeurent élevées comparativement à celles obtenues par les injecteurs Couette.

En somme, les conditions de mélange optimales pour l'emploi du polymère B, à 40 g/t (0,01 % p/p), dans le système Couette sont : l'injecteur 2 et la conduite torsadée 24 tours comme meilleurs points d'injection et un niveau d'agitation variable entre 50 et 100 rpm. Mentionnons également que dans l'ensemble, il est possible d'observer une tendance générale où le gradient de vitesse agit simultanément comme une force aidant à l'agrégation et/ou à la fragmentation des agrégats dépendamment de l'intensité et de la durée d'application du gradient de vitesse sur la suspension. Pour de bas niveaux d'agitation, le gradient de vitesse est suffisamment important pour créer des agrégats de bonne taille et permet l'agglomération de petites particules dans les agrégats, favorisant ainsi la diminution de la turbidité et l'augmentation de la vitesse de sédimentation. Par après, il se forme un équilibre entre la formation et la fragmentation des agrégats où la turbidité reste à son minimum (plateau minimum). Finalement, au-dessus d'une valeur critique du gradient de vitesse, les forces de fragmentation sont plus importantes, ce qui se traduit par une augmentation rapide de la turbidité et une diminution de la vitesse moyenne de sédimentation⁽¹¹⁾.

6.2.3 Variation du dosage dans le système Couette

Afin de déterminer si le dosage de 40 g/t est suffisamment efficace pour floculer une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer, différents essais sur la variation du dosage ont été effectués. Pour les essais, la concentration du polymère B est fixée à 0,01 % p/p mais le dosage varie d'un essai à l'autre. Chaque essai a une durée de 180 minutes. La Figure 6.15 présente les résultats de la variation de la turbidité en fonction du dosage ajouté pour des essais dans le système Couette avec le polymère B injecté dans l'injecteur 2 et 3 avec un niveau d'agitation de 100 rpm.

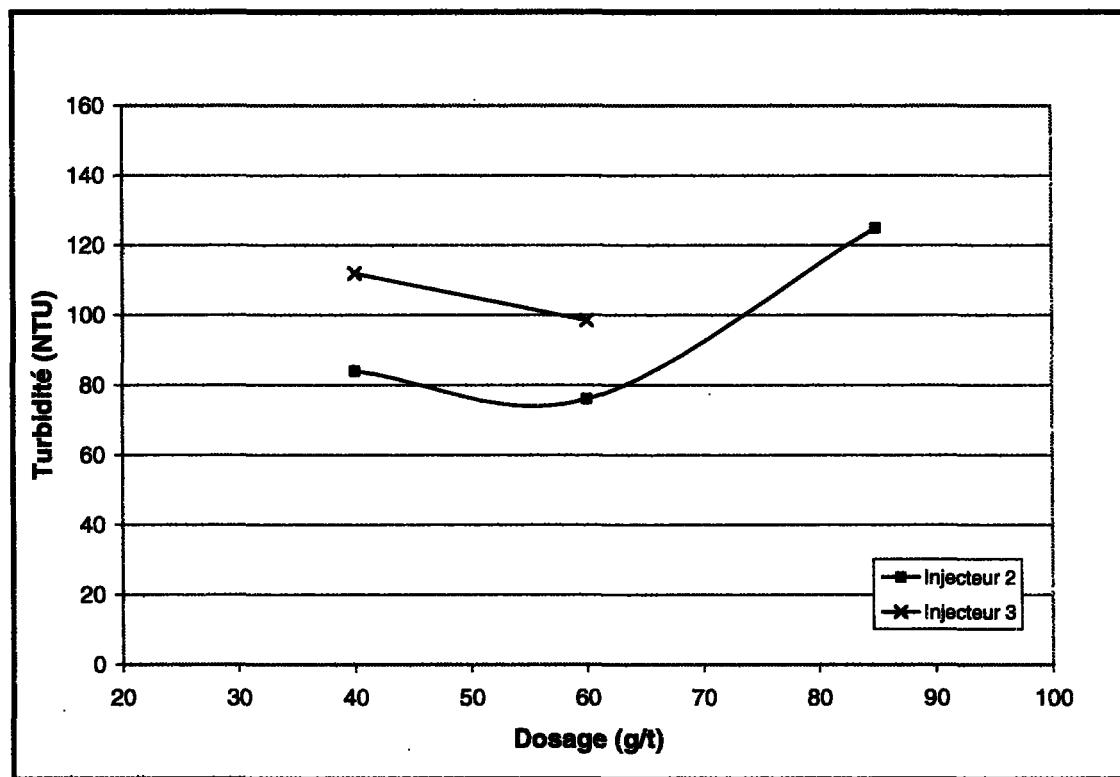


Figure 6.15 - Variation de la turbidité en fonction du dosage ajouté pour deux injecteurs Couette, polymère B, 180 minutes d'expérimentation

Les turbidités obtenues diminuent avec l'augmentation du dosage pour atteindre une valeur minimale à 60 g/t. Au-delà de cette valeur, la quantité supplémentaire de polymère ajoutée est inefficace et augmente même la valeur résiduelle de la turbidité. Un niveau d'agitation de 100 rpm utilisé conjointement avec l'injecteur 2 et un dosage de 60 g/t a permis d'obtenir une turbidité minimale de 76 NTU. Mentionnons également que le profil des vitesses moyennes de sédimentation varie inversement en fonction de la turbidité obtenue, c'est-à-dire que lorsque la turbidité est minimale la vitesse de sédimentation est maximale. En effet, pour l'injecteur 2, la vitesse varie de 34,0 m/h à 40 g/t, 36,0 m/h à 60 g/t et 29,0 m/h à 85 g/t tandis que pour l'injecteur 3, la vitesse varie de 27,0 m/h à 40 g/t et 29,0 m/h à 60 g/t.

6.2.3.1 Hauteur moyenne de la couche de sédiment

Les essais de flocculation réalisés avec le polymère A ont permis d'observer que lorsque la turbidité est à son niveau le plus bas, la hauteur moyenne de la couche de sédiment est maximale. L'analyse des résultats de sédimentation, pour les essais effectués avec le polymère B, a permis de d'obtenir les mêmes conclusions. La Figure 6.16 présente les résultats de turbidité et de la hauteur moyenne de la couche de sédiment pour une injection de polymère B (0,01 % p/p) dans l'injecteur 2 et un niveau d'agitation de 100 rpm. Ainsi une hauteur moyenne de 4,2 cm a été obtenue pour une turbidité minimale de 76 NTU.

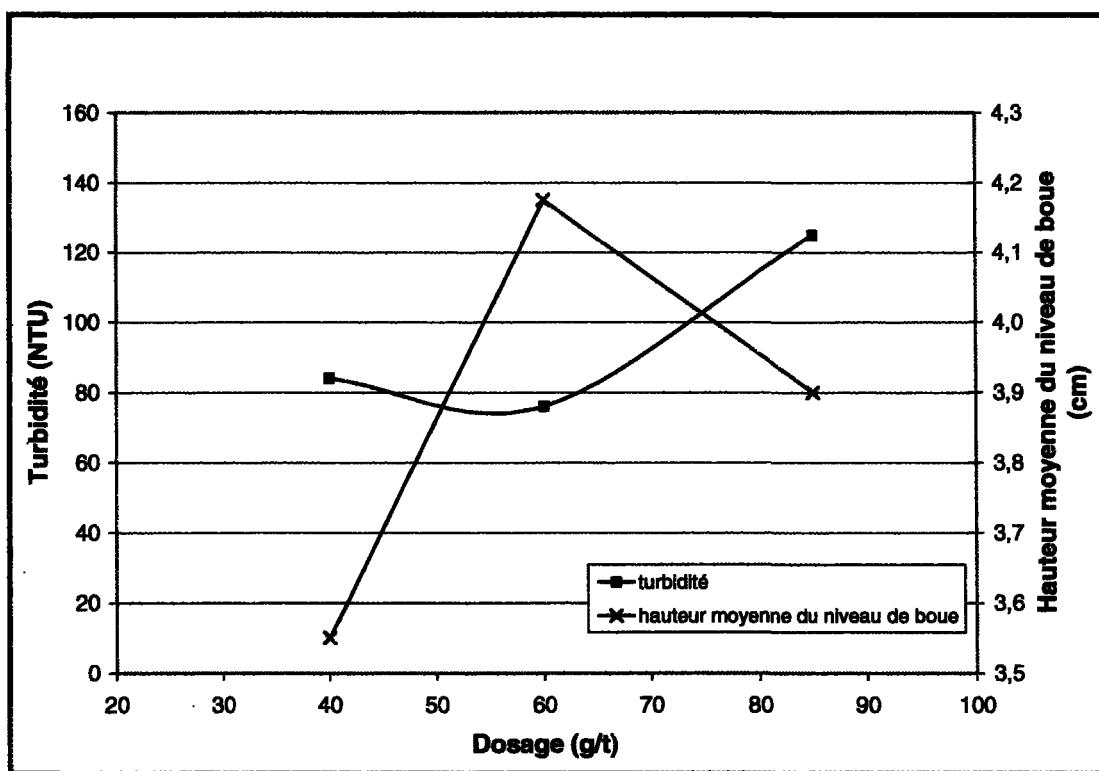


Figure 6.16 - Variation de la hauteur moyenne de la couche de sédiment et de la turbidité en fonction du dosage de polymère B, 180 minutes d'expérimentation

6.3 Double addition d'un mélange de polymère

Cette section porte sur la double addition de polymère. Une étude antérieure⁽¹⁾, a démontré que certaines combinaisons de polymère A et B pouvaient diminuer de façon considérable la turbidité résiduelle d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. Dans le cas des présents essais, l'ajout de polymère s'effectue en deux séquences d'injection (AB ou BA) avec les deux différents polymères (A et B) utilisés par Alcan International⁽¹⁾. De plus, les proportions des différents polymères dans le mélange vont varier. La proportion de polymère fait référence à la quantité de polymère ajoutée dans le mélange ainsi qu'au dosage. Pour tous les essais, le dosage du polymère A (0,01 % p/p) varie entre 12 et 48 g/t et de 10 à 40 g/t pour le polymère B (0,01 % p/p).

6.3.1 Test du cylindre

Les essais de flocculation ont préalablement été effectués en utilisant la méthodologie du test du cylindre afin d'évaluer leur efficacité. Chaque essai est reproduit trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. La Figure 6.17 présente les résultats de turbidité en fonction de la proportion de mélange des polymères pour la séquence d'injection AB. Le mélange AB (36-10), soit 36 g/t de polymère A suivit de 10 g/t de polymère B, a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité soit de 268 NTU. Les résultats moyens de turbidité obtenus avec les polymères individuels, sont également présentés sur le graphique 6.17. Ainsi, le mélange AB (48-0) présente le résultat de turbidité pour le polymère A (162 NTU) à 48 g/t et le mélange AB (0-40) pour le polymère B (898 NTU) à 40 g/t. De plus, il est possible d'observer que plus la quantité de polymère

A est importante, plus la turbidité diminue. Conséquemment, l'utilisation d'un mélange de polymère par rapport à l'utilisation du polymère B en simple addition améliore de façon considérable la turbidité de la suspension de boues rouges. À l'inverse, le polymère A en simple addition semble plus efficace qu'un mélange de polymère. Les vitesses de sédimentation retardées, obtenues pour cette série d'essais sont de 12,7 m/h pour la mélange AB (36-10), de 19,2 m/h pour AB (24-20) et de 22,6 m/h pour AB (12-30). La vitesse de sédimentation semble ainsi augmenter lorsque la proportion de polymère B est plus importante⁽¹⁾.

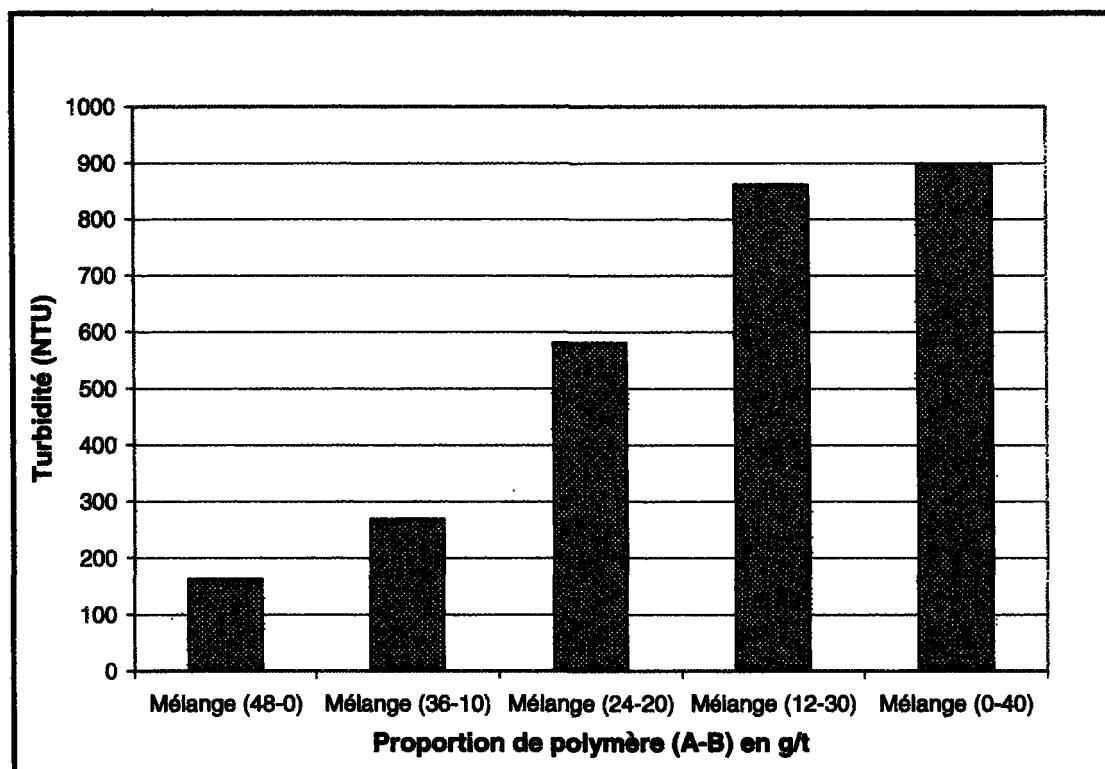


Figure 6.17 - Variation de la turbidité en fonction de la proportion des polymères dans le mélange AB en test du cylindre

La Figure 6.18 présente les résultats de turbidité en fonction de la proportion de mélange des polymères pour la séquence d'injection BA. Le mélange BA (30-12) a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité soit de 323 NTU. De façon générale, les résultats de turbidité sont plus bas lorsque la séquence d'injection BA est utilisée. Les agents de flocculation B et A semblent avoir des interactions (polymère-polymère) qui permettent d'augmenter l'efficacité de la flocculation⁽¹⁾ comparativement à une simple addition de polymère B. De plus, pour cette séquence d'injection, l'augmentation de la quantité de polymère A dans le mélange n'améliore pas la turbidité tel qu'observé pour la séquence d'injection AB. Les vitesses de sédimentation retardées sont de 20,6 m/h pour le mélange BA (30-12), de 26,0 m/h pour BA (20-24) et de 26,4 m/h pour BA (10-36). À l'inverse de la séquence d'injection AB, les vitesses de sédimentation retardées semblent augmenter avec la diminution de la proportion de polymère B (ou augmente avec l'augmentation de la proportion de polymère A). L'ordre d'injection des polymères influence donc les vitesses de sédimentation.

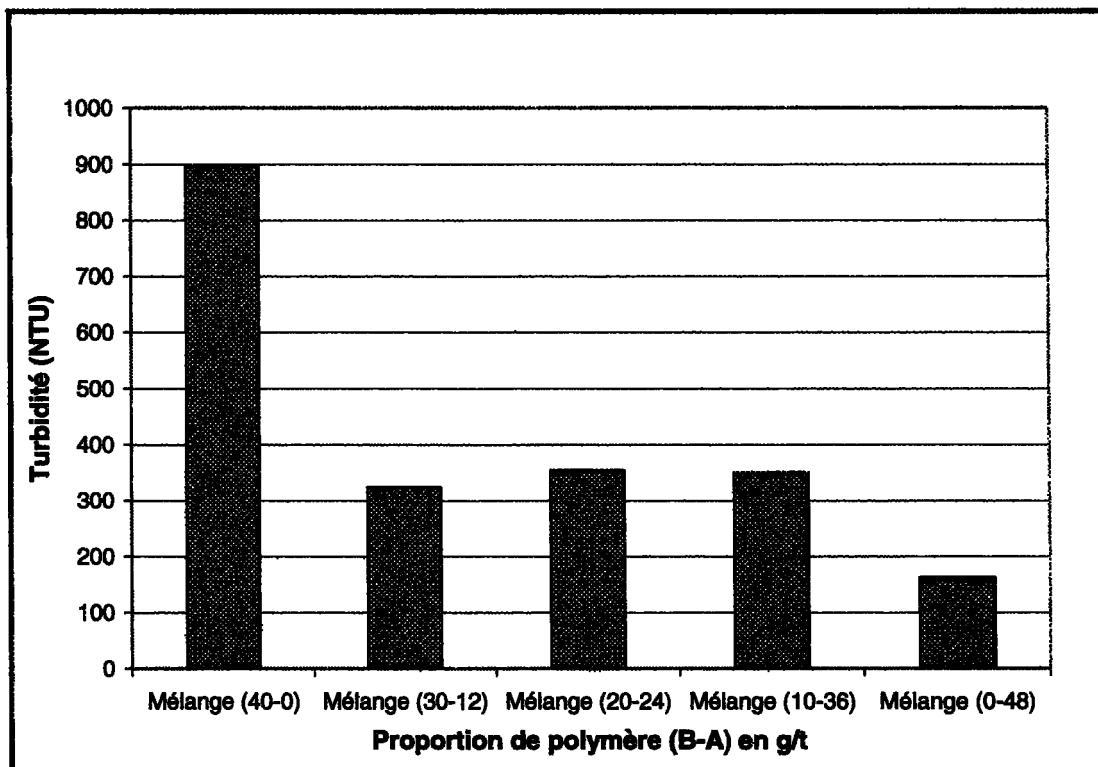


Figure 6.18 - Variation de la turbidité en fonction de la proportion des polymères dans le mélange BA en test du cylindre

6.3.2 Double addition dans le système Couette

Certains essais, effectués en test du cylindre ont été reproduits dans le système Couette afin d'évaluer si les conditions d'agitation influencent les interactions entre les polymères. Cependant, les conditions de mélange du polymère A et du polymère B ne sont pas les mêmes. En effet, le niveau d'agitation optimal varie entre 60 et 140 rpm (section 6.1.2) pour le polymère A et entre 50 et 100 rpm (section 6.2.2) pour le polymère B. Un niveau d'agitation moyen de 80 rpm a été choisi pour les essais en double addition afin de diminuer le nombre d'essais réalisés durant cette étude. Les niveaux d'injection optimaux

sont l'injecteur 2 et la conduite torsadée 8 tours pour le polymère A et l'injecteur 2 et la conduite torsadée 24 tours pour le polymère B. À l'aide d'un tableau croisé (tableau 6.1), il est possible de déterminer les séquences d'injection pouvant favoriser la flocculation. Mentionnons également que tous les essais de flocculation en double addition de polymère sont d'une durée de 180 minutes.

| | | Polymère A | |
|----------------------------|--|---|---|
| Polymère B | | Injecteur 2 | Conduite torsadée 8 tours |
| Injecteur 2 | | | Conduite torsadée 8 tours / Injecteur 2 |
| Conduite torsadée 24 tours | | Conduite torsadée 24 tours / Injecteur 2 | Conduite torsadée 24 tours / Conduite torsadée 8 tours |

Tableau 6.1 - Séquences d'injection possibles pour la double addition de polymère

6.3.2.1 Proportion de mélange idéale dans le système Couette

La première étape, lors des expérimentations dans le système Couette, consiste à déterminer les proportions de mélange idéales pour les deux séquences d'injection possibles (AB et BA). La Figure 6.19 présente la variation de la turbidité en fonction de la proportion de polymère dans le mélange, pour la séquence d'injection AB. Selon le tableau 6.1, une seule combinaison d'injection est possible (polymère A dans la conduite torsadée 8 tours et polymère B dans l'injecteur 2). Une turbidité minimale de 39 NTU a été obtenue par le mélange AB (48-40). Cependant, les turbidités obtenues pour tous les mélanges

contenant du polymère A varient peu, passant de 45 NTU pour le polymère A seul, 41 NTU pour le mélange (36-10) et 50 NTU pour le mélange (12-30). Ainsi, l'efficacité du mélange AB semble peu affectée par les proportions de chacun des polymères dans le mélange. Mentionnons que les valeurs de turbidité pour le mélange AB (48-0) et AB (0-40) ont été extrapolées à partir des Figures 6.5 et 6.11.

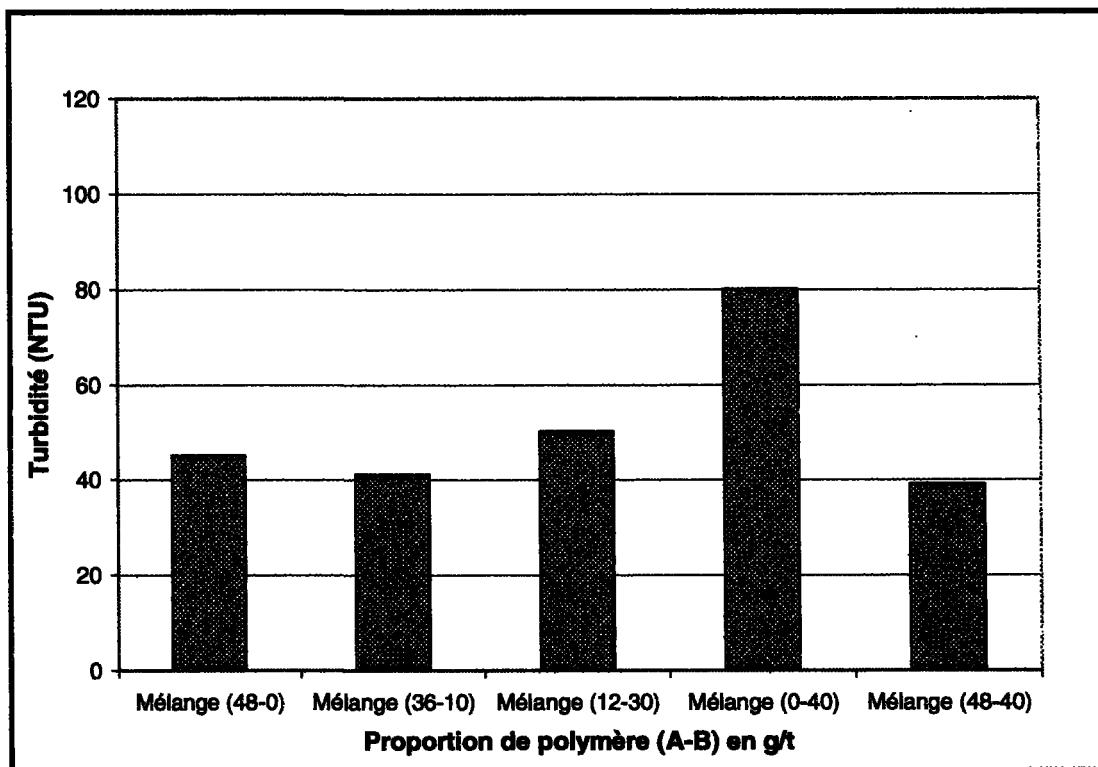


Figure 6.19 - Variation de la turbidité en fonction des proportions de polymère dans le mélange AB, système Couette, 180 minutes d'expérimentation

La Figure 6.20 présente la variation de la turbidité en fonction de la proportion de polymère dans le mélange pour la séquence d'injection BA. Selon le tableau 6.1, deux combinaisons d'injection sont possibles. Pour le graphique 6.20, le polymère B est injecté

dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Les proportions de mélange sont les mêmes que celles utilisées précédemment. Les valeurs de turbidité du mélange BA (40-0) et BA (0-48) proviennent des Figures 6.3 et 6.13.

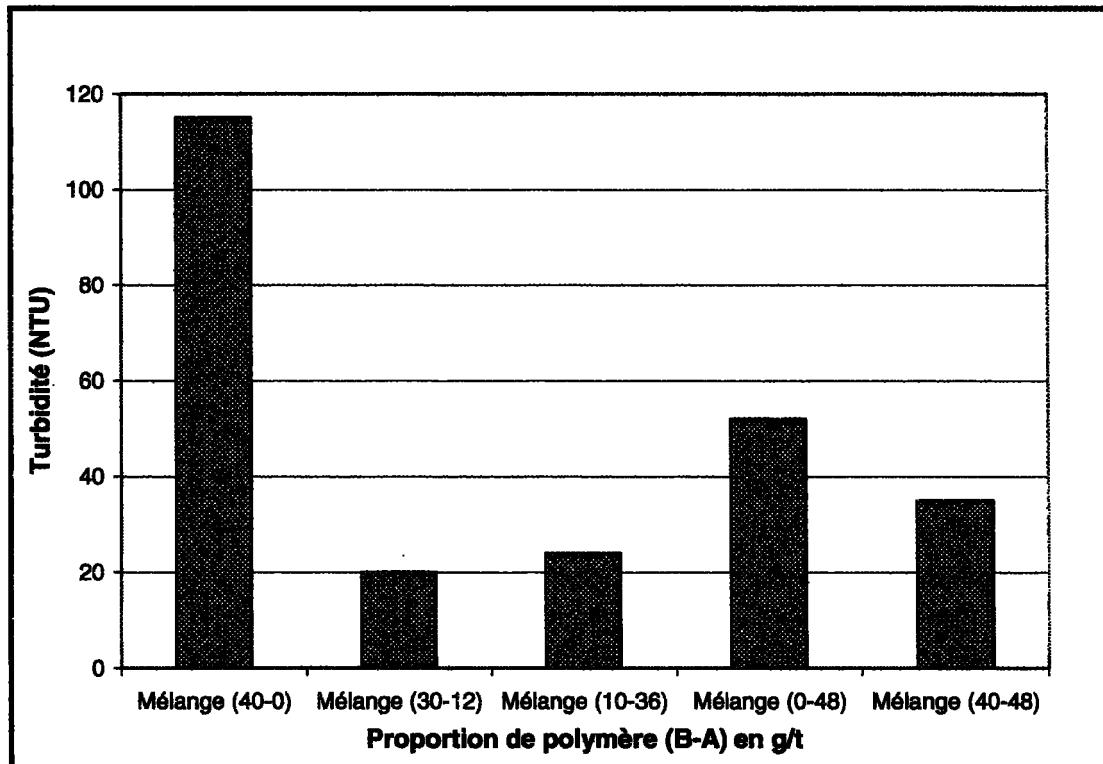


Figure 6.20 - Variation de la turbidité en fonction des proportions de polymère dans le mélange BA, système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Une turbidité minimale de 20 NTU a été obtenue par le mélange BA (30-12). Les valeurs de turbidité obtenues par les mélange BA sont beaucoup plus basses que celles obtenues par les mélanges AB ; 20 NTU pour le mélange BA (30-12), 24 NTU pour le mélange BA (10-36) et 35 NTU pour le mélange BA (40-48) comparativement à 41 NTU pour le mélange AB (36-10), 50 NTU pour le mélange AB (12-30) et 39 NTU pour le

mélange AB (48-40). Une tendance similaire a été observée lors des essais en test du cylindre. Conséquemment, les mélanges BA sont très efficaces pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. En effet, le meilleur résultat de turbidité obtenu lors des essais en simple addition de polymère était de 36 NTU pour le polymère A (0,01 % p/p) à 48 g/t dans la conduite torsadée 8 tours et pour un niveau d'agitation de 140 rpm (Figure 6.5). Ainsi, pour un niveau d'agitation moindre et un dosage moins important il est possible d'obtenir une meilleure turbidité par l'utilisation d'un mélange adéquat. De plus, les agents de flocculation A et B semblent avoir des interactions de type polymère-polymère qui varient selon l'ordre d'injection des agents (AB ou BA).

6.3.2.1.1 Hauteur moyenne de la couche de sédiment

La hauteur moyenne de la couche de sédiment, obtenue pour les deux séries d'essais sont de 5,2 cm pour le mélange AB (48-0), de 4,8 cm pour AB (36-10), de 4,6 cm pour AB (12-30), de 4,1 cm pour AB (0-40), de 5,2 cm pour AB (48-40), de 4,0 cm pour le mélange BA (40-0), de 3,4 cm pour BA (30-12), de 3,5 cm pour BA (10-36), de 4,7 cm pour BA (0-48) et de 4,5 cm pour BA (40-48). Tel qu'observé dans les essais en simple addition, la hauteur de la couche de sédiment est plus élevée pour le polymère A que pour le polymère B (à dosage égal et selon les Figures 6.8 et 6.16, la hauteur moyenne est de 3,6 cm pour le polymère B et 4,4 cm pour le polymère A). Donc, lorsque la proportion de polymère A dans le mélange diminue, la couche de sédiment diminue également ce qui peut influencer le niveau de compaction de la boue.

6.3.2.1.2 Vitesse moyenne de sédimentation des particules

Les vitesses moyennes de sédimentation obtenues pour ces deux séries d'essais sont de 36,3 m/h pour AB (36-10), de 46,5 m/h pour AB (12-30), de 49,6 m/h pour AB (48-40), de 53,7 m/h pour BA (30-12), de 52,5 m/h pour BA (10-36) et de 74,0 m/h pour BA (40-48). De façon générale, lorsque la proportion de polymère B augmente dans le mélange, la vitesse moyenne de sédimentation des particules augmente également. En effet, les agrégats formés par les polymères A et B diffèrent par leurs tailles et/ou leurs densités ce qui peut influencer leurs vitesses de sédimentation. Cette tendance a été observée lors de certains essais de flocculation en test du cylindre.

6.3.2.2 Séquence d'injection optimale dans le système Couette

Cette section des résultats vise à déterminer la séquence d'injection optimale pour une proportion de polymère donnée. La proportion de polymère optimale, permettant d'obtenir la turbidité la plus basse, est de 30 g/t de polymère B et 12 g/t de polymère A. De plus, selon le tableau 6.1, il existe trois séquences d'injection pouvant favoriser la flocculation. La Figure 6.21 présente les résultats de turbidité en fonction des trois séquences d'injection pour la proportion de mélange idéale dans le système Couette. La turbidité la plus basse, soit de 20 NTU, est obtenue avec la séquence d'injection où le polymère B est injecté en premier lieu dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2.

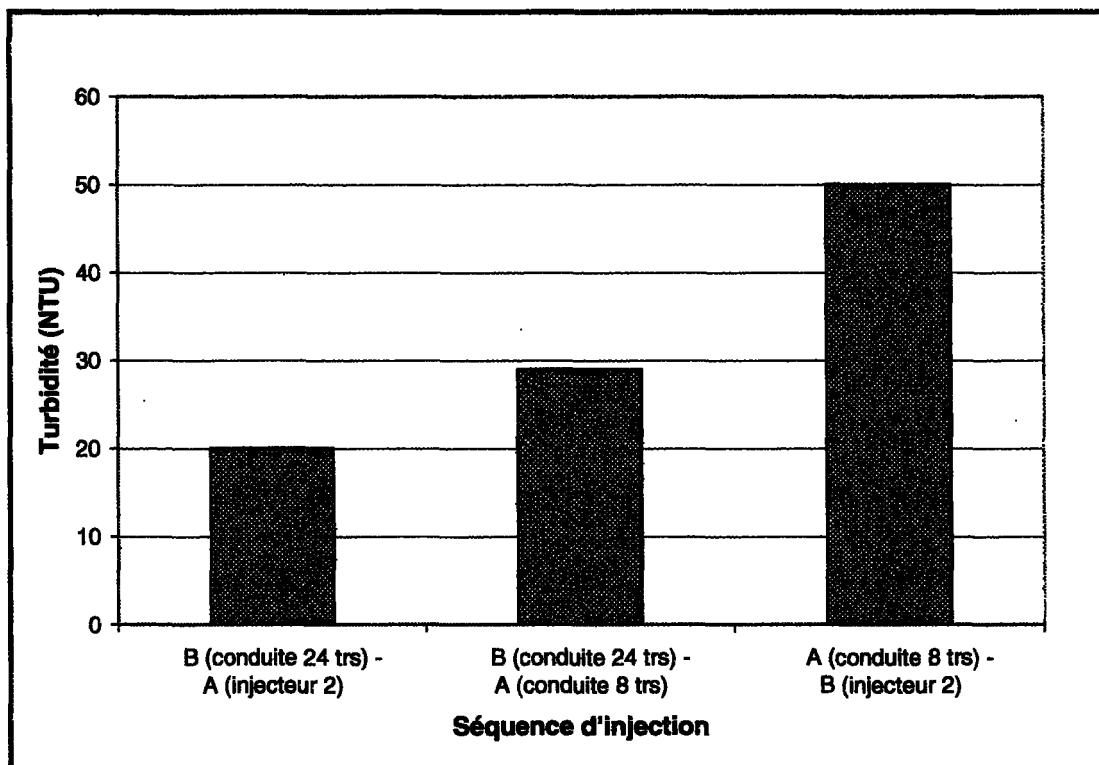


Figure 6.21 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange de polymère BA (30-12), système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation des particules sont de 53,7 m/h pour la séquence d'injection B (conduite 24 tours) – A (injecteur 2), de 48,5 m/h pour la séquence B (conduite 24 tours) – A (conduite 8 tours) et de 46,5 m/h pour la séquence A (conduite 8 tours) – B (injecteur 2). Ainsi, pour des proportions égales de polymère, la vitesse moyenne de sédimentation est maximale lorsque la turbidité est minimale. Cette tendance est la même qu'observée lors de la simple addition de polymère A et/ou B. Par ailleurs, les valeurs des hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 3,4 cm pour la séquence d'injection B (conduite 24 tours) – A (injecteur 2), de 4,2 cm pour la séquence B (conduite

24 tours) – A (conduite 8 tours) et de 4,6 cm pour la séquence A (conduite 8 tours) – B (injecteur 2). Ainsi, l'ordre d'injection des polymères semble avoir une incidence sur la compaction de la boue. Ceci pourrait s'expliquer par la structure des agrégats qui varierait en fonction de l'ordre d'injection des agents de flocculation.

6.3.2.3 Niveau d'agitation optimal dans le système Couette

Tel qu'observé dans les essais en simple addition de polymère, le niveau d'agitation a une grande importance sur l'efficacité de la flocculation. Afin de déterminer le niveau d'agitation optimal sur une double addition de polymère, une série d'essais a été effectuée. La Figure 6.22 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation sur le mélange BA (30-12) où le polymère B est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Le graphique met en évidence que l'augmentation du niveau d'agitation entraîne la diminution de la turbidité résiduelle. En effet, la turbidité est de 29 NTU à 40 rpm, de 20 NTU à 80 rpm et de 19 NTU à 130 rpm. Ainsi, le mélange BA (30-12) semble plus efficace lorsque le niveau d'agitation est élevé (80 rpm et plus). Puisque le polymère B semble moins résistant aux valeurs élevées de gradient de vitesse (section 6.2.2.2), il est possible de penser que lorsque le polymère A est injecté en second lieu, il y a formation de liens plus résistants aux niveaux d'agitation élevés (liens interparticulaires plus résistants à l'agitation).

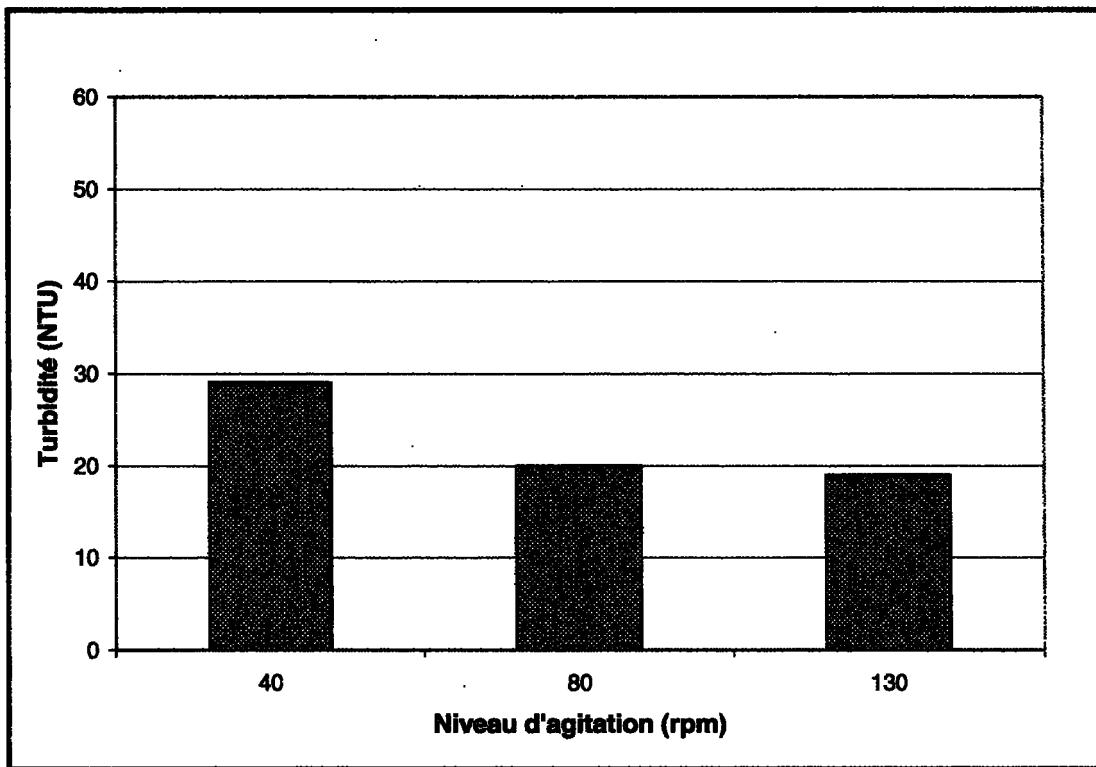


Figure 6.22 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour une double addition de polymère BA (30-12), système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation des particules sont de 58,4 m/h pour un niveau d'agitation de 40 rpm, de 53,7 m/h à 80 rpm et de 39,7 m/h à 130 rpm. Ainsi, la vitesse de sédimentation diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation. En effet, plus le niveau d'agitation est élevé, plus les agrégats sont soumis à des gradients de vitesse importants contribuant ainsi à diminuer la taille moyenne des agrégats et réduisant la vitesse de sédimentation. Les hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 3,0 cm pour un niveau d'agitation de 40 rpm, de 3,4 cm à 80 rpm et de 4,1 cm à 130 rpm.

Conséquemment, pour des proportions égales de polymère, la hauteur de la couche de sédiment semble augmenter avec l'augmentation du niveau d'agitation.

En résumé, le meilleur résultat obtenu pour les essais en double addition d'un mélange de polymère est de 19 NTU pour un mélange BA où le dosage du polymère B est de 30 g/t et le dosage du polymère A est de 12 g/t. La séquence d'injection idéale est celle où le polymère B est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et où le polymère A est injecté dans l'injecteur 2. Un niveau d'agitation optimal de 130 rpm a permis d'obtenir le meilleur résultat de turbidité. Les plus bas résultats de turbidité obtenus lors des essais en simple addition de polymère étaient (sans distinction du niveau et de la durée d'agitation) de 36 NTU pour le polymère A et de 73 NTU pour le polymère B. En se basant sur les résultats mentionnés précédemment, le mélange BA (30-12) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité résiduelle d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. D'autres essais, avec des proportions de polymère intermédiaires, pourraient être effectués afin de déterminer si le mélange AB (30-12) est réellement le mélange le plus efficace.

6.4 Agent de flocculation D

Cette section porte sur les essais de flocculation avec l'agent D. Une étude antérieure⁽¹⁾ a démontré que l'agent de flocculation D utilisé conjointement avec les polymères A et/ou B permettait d'abaisser la turbidité à un niveau inférieur à ceux obtenus par les mélanges doubles de polymère.

6.4.1 Test du cylindre

6.4.1.1 *Simple addition de l'agent D*

Des essais en test du cylindre ont été effectués afin de déterminer l'efficacité de l'agent D à flocculer une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. Chaque essai est reproduit trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. Des essais, sur la variation de la concentration de la solution de l'agent D, ont démontré que la concentration de 1,00 % p/p était celle qui était la plus efficace pour flocculer une suspension de boues rouges⁽¹⁾. D'autres essais réalisés avec l'agent de flocculation D (1,00 % p/p) démontrent que, tel qu'observé pour les polymères A et B, la turbidité résiduelle de la surverse diminue avec l'augmentation du dosage passant de 770 NTU à 400 g/t, de 533 NTU à 800 g/t, de 400 NTU à 1600 g/t et de 282 NTU à 2400 g/t. Conséquemment, des quantités plus importantes d'agent D sont nécessaires pour effectuer une flocculation efficace d'une suspension de boues rouges, comparativement aux quantités utilisées de polymère A et B.

6.4.1.2 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation

Des essais de flocculation ont été réalisés en double addition avec les polymères A et B. Chaque essai est reproduit trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. Dans le cas des présents travaux, l'ajout des agents et/ou polymères s'effectue en deux séquences d'injection AD, DA, BD et DB. Les dosages utilisés sont de 48 g/t de polymère A (0,01 % p/p), de 40 g/t de polymère B (0,01 % p/p) et de 400 g/t d'agent de flocculation D (1,00 % p/p). La Figure 6.23 présente la variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection pour des essais de flocculation en test du cylindre. Le mélange DA a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité soit de 147 NTU. Le meilleur résultat de turbidité obtenu en test du cylindre par les mélanges de polymères A et B était de 268 NTU pour un mélange AB (36-10). Conséquemment, le mélange DA (400-48) semble très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges.

De plus, des essais supplémentaires sur la variation du dosage de l'agent D dans le mélange DA démontrent que, l'augmentation du dosage ne semble pas améliorer la turbidité résiduelle de la suspension de boues rouges. En effet, la turbidité est de 147 NTU pour un mélange DA (400-48) et de 145 NTU pour le mélange DA (2400-48) (le dosage de 2400 g/t étant le dosage d'agent D pour laquelle la turbidité est la plus basse lors d'une simple addition section 6.4.1.1.). Ainsi, il semble inutile d'utiliser des quantités importantes d'agent D pour effectuer une flocculation efficace.

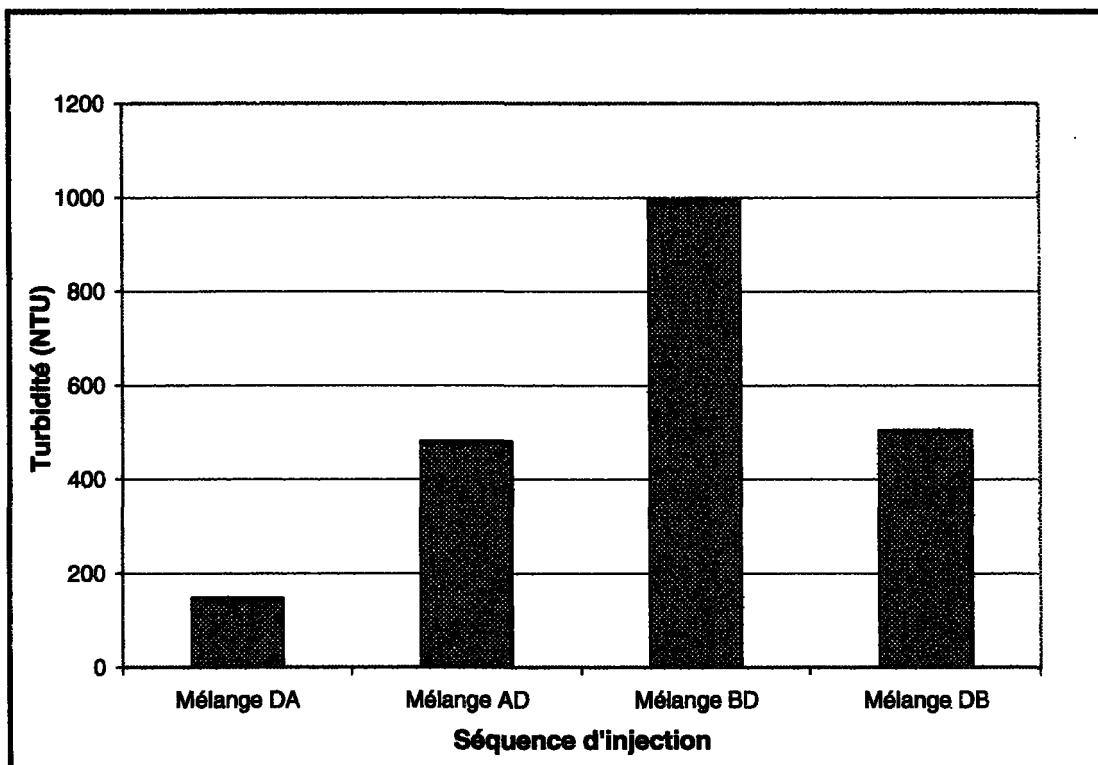


Figure 6.23 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double d'agents de flocculation en test du cylindre

6.4.1.3 Triple addition d'un mélange d'agents de flocculation

Des essais préliminaires⁽¹⁾ ont préalablement été effectués en test du cylindre afin d'évaluer l'efficacité d'une triple addition d'un mélange d'agent D et des polymères A et B. Chaque essai est reproduit trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. Les séquences d'injection possibles ont été déterminées à l'aide d'un tableau croisé. De plus, afin de réduire le nombre d'essais réalisés durant cette étude, seulement quelques essais ont été effectués. Les dosages utilisés sont de 48 g/t de polymère A (0,01 % p/p), de 40 g/t de polymère B (0,01 % p/p) et de 400 g/t d'agent de flocculation D (1,00 % p/p). La Figure

6.24 présente la variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange triple. La turbidité la plus basse, soit de 44 NTU, a été obtenue par le mélange DAA suivit de près par la turbidité du mélange DAB de 53 NTU. Ainsi, l'ordre d'injection des séquences les plus efficaces (DAA et DAB) est similaire à celle rencontrée dans les mélanges doubles (DA). Par ailleurs, le meilleur résultat de turbidité obtenu par les mélanges doubles est de 147 NTU pour un mélange DA (400-48). Conséquemment, les mélanges triples semblent très efficaces pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges⁽¹⁾ selon le test du cylindre.

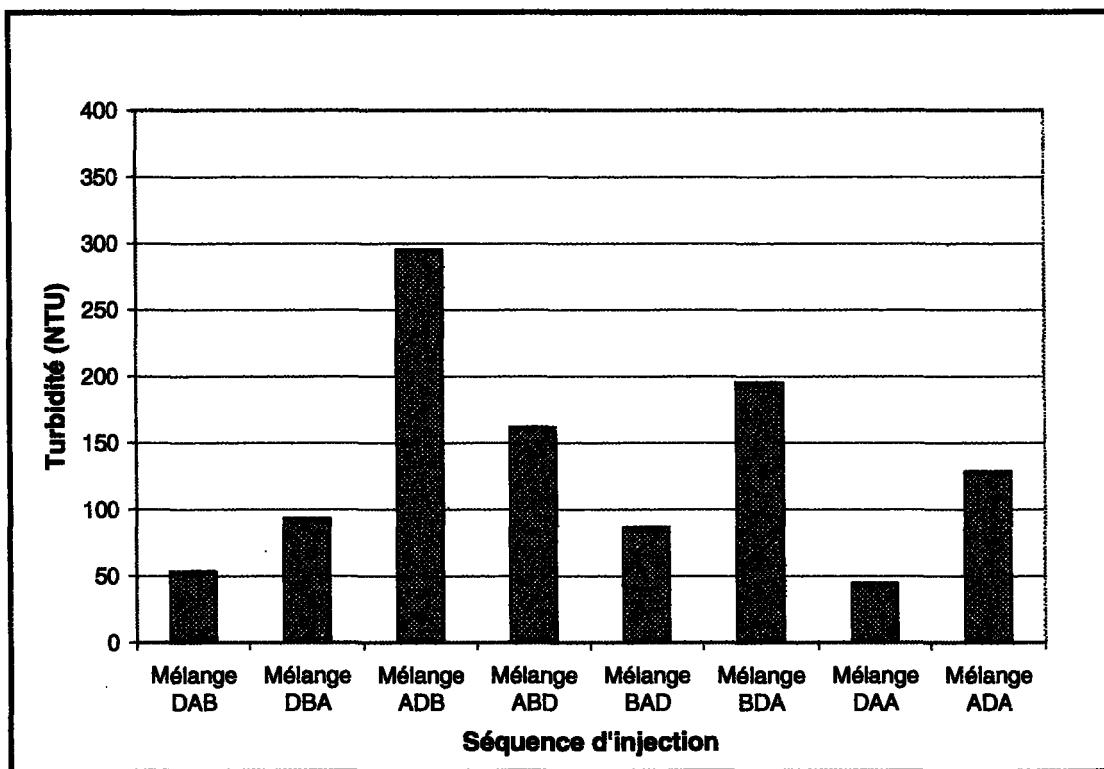


Figure 6.24 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange triple d'agents de flocculation en test du cylindre

6.4.2 Simple addition dans le système Couette

Contrairement aux polymères A et B, un seul essai de flocculation dans le système Couette a été effectué en simple addition de l'agent D. En effet, pour un dosage de 8000 g/t (voir section 6.4.1.1) d'agent D (1,00 % p/p) introduit dans l'injecteur 2 à 80 rpm, une turbidité de 160 NTU a été obtenue après 100 minutes d'expérimentation. Les agrégats observés durant cette flocculation étaient très petits (quasiment non visible à l'œil nu) et la liqueur Bayer était contaminée par une grande quantité de particules en suspension. Par conséquent, aucun autre essai en simple addition d'agent D n'a été effectué puisque la flocculation y semble moins efficace qu'en utilisant les polymères A et B ou un mélange de ceux-ci.

6.4.3 Double addition dans le système Couette

Des essais de flocculation avec les mélanges DA (mélange optimal selon les essais en test du cylindre) ont été effectués dans le système Couette afin d'évaluer si les conditions d'agitation affectent les interactions entre les polymères et l'agent de flocculation. Les conditions de mélange optimales du polymère A et de l'agent D ne sont probablement pas les mêmes. En effet, le niveau d'agitation optimal varie entre 60 et 140 rpm (section 6.1.2) pour le polymère A et les conditions d'agitation de l'agent D n'ont pas été déterminées. Un niveau d'agitation de 100 rpm a été choisi pour les essais de flocculation de double addition dans le système Couette. Les niveaux d'injection ne sont pas fixés à l'avance mais doivent respecter l'ordre d'injection, c'est-à-dire que l'agent D doit être injecté avant le polymère A (ordre des points d'injection ; conduite 24 tours, conduite 16 tours, conduite 8 tours,

injecteur 2, injecteur 3 et injecteur 4). Néanmoins, les niveaux d'injection optimaux du polymère A (l'injecteur 2 et la conduite torsadée 8 tours) sont respectés. Conséquemment, seules quelques séquences d'injection sont possibles telles que présentées dans le tableau 6.2.

| | | Polymère A | |
|----------------------------|--|--|---------------------------|
| Agent D | | Injecteur 2 | Conduite torsadée 8 tours |
| Conduite torsadée 8 tours | Conduite torsadée 8 tours / Injecteur 2 | | |
| Conduite torsadée 16 tours | Conduite torsadée 16 tours / Injecteur 2 | Conduite torsadée 16 tours / Conduite torsadée 8 tours | |
| Conduite torsadée 24 tours | Conduite torsadée 24 tours / Injecteur 2 | Conduite torsadée 24 tours / Conduite torsadée 8 tours | |

Tableau 6.2 - Séquences d'injection possibles pour la double addition de polymère A et d'agent de flocculation D

6.4.3.1 Dosage idéal du mélange double DA

La première étape consiste à déterminer les dosages idéaux du mélange DA dans le système Couette. La Figure 6.25 présente la variation de la turbidité en fonction des dosages du polymère A et de l'agent D dans le mélange DA. Chaque essai est d'une durée de 180 minutes. L'agent de flocculation D (1,00 % p/p) est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A (0,01 % p/p) dans l'injecteur 2. Les résultats de turbidité obtenus sont de 21 NTU pour le mélange DA (800-48), de 19 NTU pour DA (400-48) et de 20 NTU pour DA (400-60). La variation du dosage des agents A et D ne semble pas affecter la

valeur de la turbidité résiduelle de la surverse. En effet, l'écart de turbidité obtenu entre chacun des résultats est de même ordre de grandeur que l'erreur de reproductibilité de la méthode de mesure du système Couette (section 5.7).

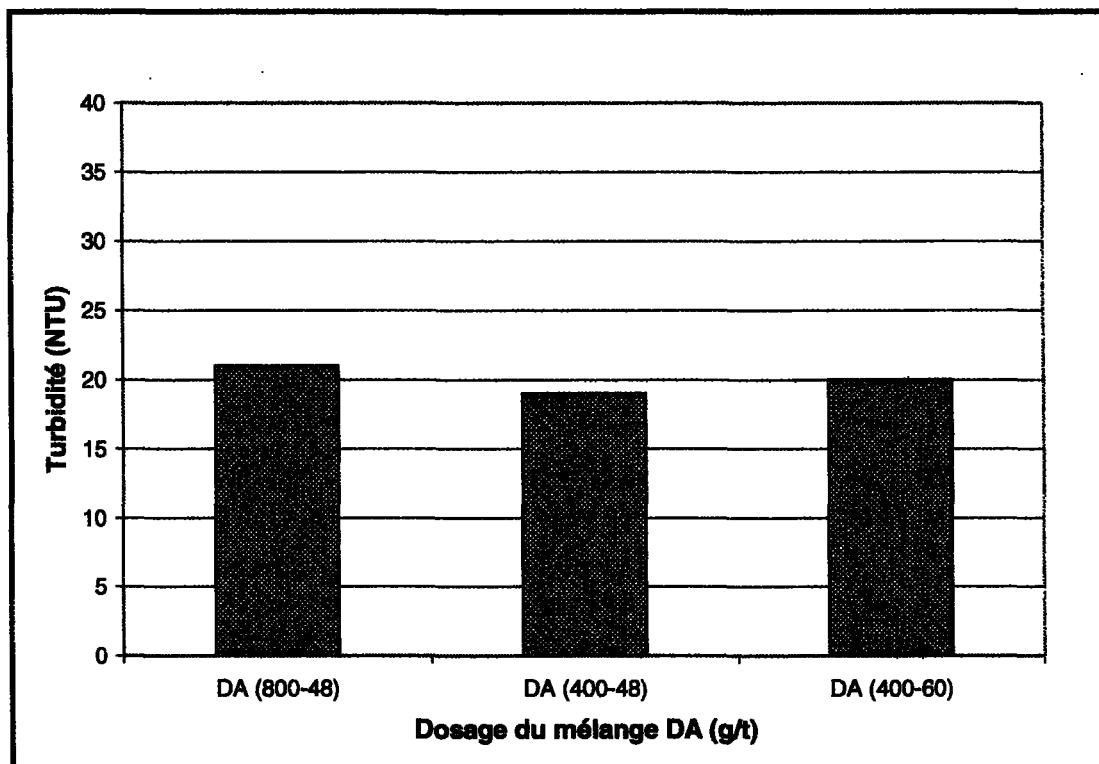


Figure 6.25 - Variation de la turbidité en fonction du dosage du mélange double DA dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation obtenues pour ces essais sont de 72,0 m/h pour le mélange DA (800-48), de 69,0 m/h pour DA (400-48) et de 55,0 m/h pour DA (400-60). De façon générale, lorsque le dosage de l'agent D diminue la vitesse de sédimentation diminue également. Par ailleurs, les valeurs de hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 5,6 cm pour le mélange DA (800-48), de 5,3 cm pour DA (400-48) et de

5,4 cm pour DA (400-60). Ainsi, la quantité ajoutée d'agent D ne semble pas affecter de façon significative la hauteur moyenne de la couche de sédiment.

6.4.3.2 Séquence d'injection optimale du mélange double DA

Cette section des résultats vise à déterminer la séquence d'injection optimale, permettant d'obtenir la turbidité la plus basse, lors de l'utilisation d'un mélange double DA. Le dosage utilisé d'agent D (1,00 % p/p) est de 400 g/t et de 60 g/t pour le polymère A (0,01 % p/p). De plus, selon le tableau 6.2, il existe 5 séquences d'injection permettant d'effectuer la floculation dans le système Couette. Afin de limiter la quantité d'essais réalisée durant cette étude, seulement trois séquences d'injection ont été utilisées (aucun essai avec la conduite torsadée 16 tours). La Figure 6.26 présente la variation de la turbidité en fonction des séquences d'injection du mélange DA pour un niveau d'agitation de 100 rpm. La turbidité la plus basse, soit de 15 NTU, est obtenue avec la séquence d'injection où l'agent de floculation D est injecté dans la conduite torsadée 8 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Ce test a été reproduit deux fois afin de s'assurer de la validité des résultats et l'écart de turbidité obtenu entre les deux essais est de ± 1 NTU.

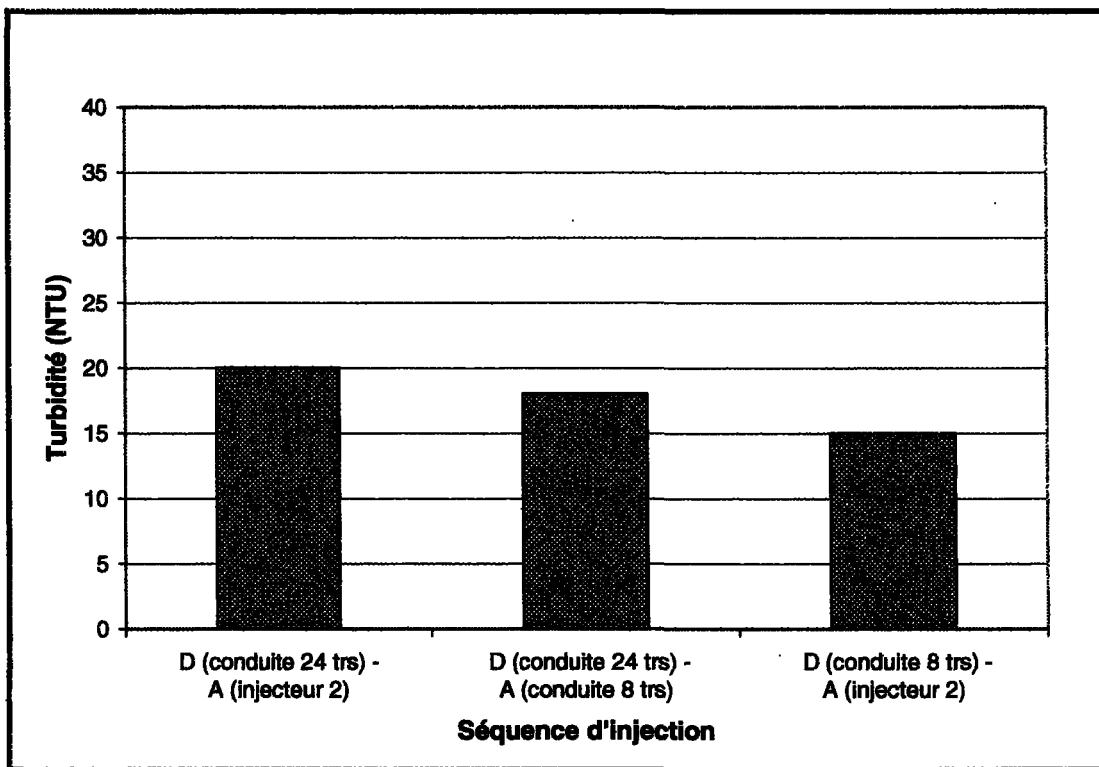


Figure 6.26 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double DA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation des particules sont de 55,0 m/h pour la séquence D (conduite 24 tours) – A (injecteur 2), de 56,1 m/h pour la séquence D (conduite 24 tours) – A (conduite 8 tours) et de 47,0 m/h pour la séquence D (conduite 8 tours) – A (injecteur 2). Ainsi, pour les mêmes dosages, la vitesse de sédimentation semble varier en fonction de la séquence d'introduction du mélange. De plus, mentionnons que pour les mélanges doubles BA et DA le profil de vitesse de sédimentation est le même, c'est-à-dire que la vitesse est maximale lorsque la séquence (conduite 24 tours – injecteur 2) est utilisée et est minimale pour la séquence (conduite 8 tours – injecteur 2). Ainsi, indépendamment

de la turbidité, certains agrégats formés dans la séquence (conduite 24 tours – injecteur 2) sont soit plus volumineux et/ou de densité plus élevée. Cependant, malgré la présence d'agrégats plus volumineux, il est possible de retrouver dans certains cas (mélange ; D conduite 24 tours – A injecteur 2) des petites particules en suspension qui peuvent accroître le niveau de turbidité. Par conséquent, même si la vitesse moyenne de sédimentation est plus élevée, la turbidité n'est pas nécessairement minimale telle qu'observée lors des simples additions de polymères. Ceci pourrait s'expliquer par une différence entre les mécanismes d'interaction (agent-polymère et polymère-polymère) qui affecterait la structure des agrégats ainsi que les vitesses moyennes de sédimentation observées.

D'autre part, les valeurs des hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 5,4 cm pour la séquence d'injection D (conduite 24 tours) – A (injecteur 2), de 6,2 cm pour la séquence D (conduite 24 tours) – A (conduite 8 tours) et de 6,4 cm pour la séquence D (conduite 8 tours) – A (injecteur 2). Ainsi, la hauteur moyenne de la couche de sédiment la plus élevée est obtenue lorsque la turbidité est minimale, tel qu'observé lors des simples additions de polymère A (section 6.1.3.1). De plus, pour les mélanges double BA et DA, la hauteur de la couche de sédiment varie inversement à la vitesse moyenne de sédimentation. Conséquemment, l'ordre d'injection des polymères et des agents de flocculation (durée d'agitation et mode d'introduction des agents) semble avoir une incidence sur la structure des agrégats et influence ainsi le niveau de compaction de la boue.

6.4.3.3 Niveau d'agitation optimal du mélange double DA

Tel qu'observé préalablement, le niveau d'agitation influence grandement l'efficacité de la flocculation. Une série d'essais a été effectuée afin de déterminer le niveau d'agitation optimal du mélange double DA. La Figure 6.27 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour le mélange DA (400-60) optimal (agent D injecté dans la conduite 8 tours et polymère A dans l'injecteur 2). Chaque essai s'effectue sur une période de 180 minutes.

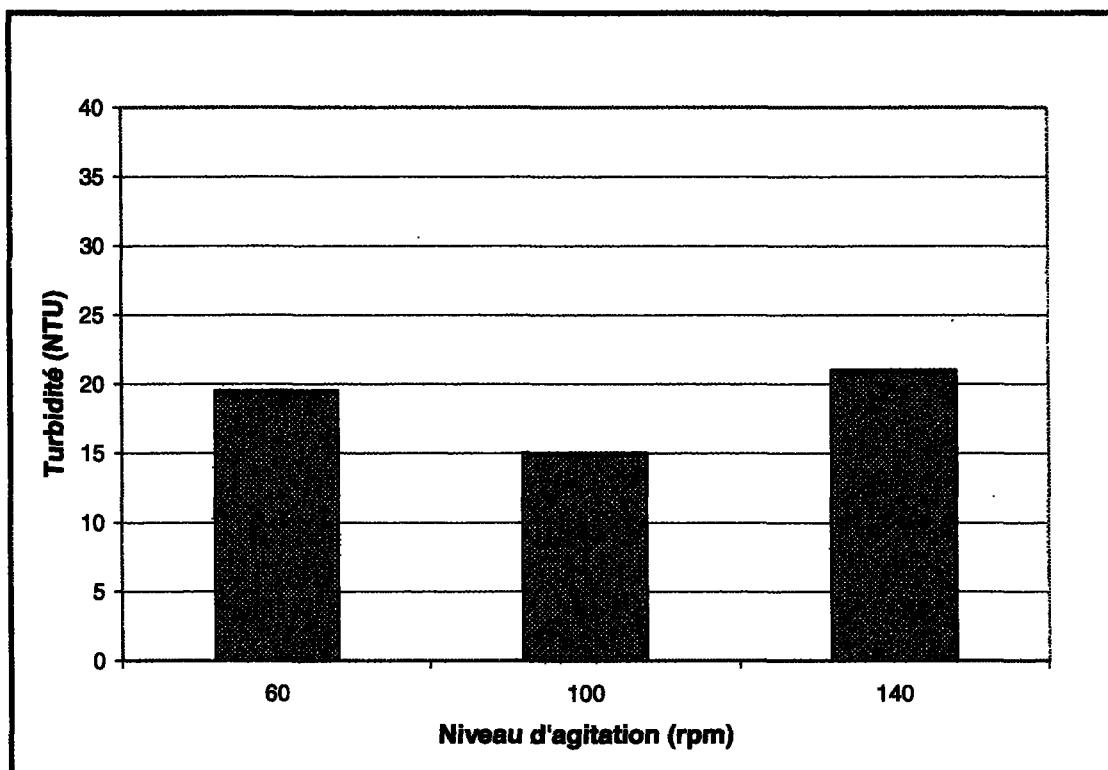


Figure 6.27 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation du mélange double DA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Une turbidité minimale de 15 NTU est obtenue lorsque le niveau d'agitation est de 100 rpm. Un niveau d'agitation plus ou moins élevé augmente la turbidité résiduelle de la surverse. En effet, une turbidité de 19 NTU a été obtenue pour un niveau d'agitation de 60 rpm et de 21 NTU pour 140 rpm. Ainsi, malgré les interactions possibles entre l'agent de flocculation D et le polymère A, le mélange DA semble légèrement moins efficace lorsqu'il est soumis à des gradients de vitesse élevés.

Les vitesses moyennes de sédimentation pour chacun des essais sont de 47,0 m/h à 100 rpm et de 37,2 m/h à 140 rpm. Il a été impossible d'évaluer la vitesse de sédimentation à 60 rpm puisqu'il n'y avait pas suffisamment de particules à analyser dans les séquences vidéo. Par conséquent, la vitesse de sédimentation est maximale lorsque la turbidité est la plus basse et semble diminuer avec l'augmentation du niveau d'agitation. En effet, plus le niveau d'agitation est élevé, plus les agrégats sont soumis à des gradients de vitesse importants, contribuant ainsi à diminuer la taille des agrégats et réduisant la vitesse de sédimentation. Les hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 3,4 cm pour un niveau d'agitation de 40 rpm, de 6,4 cm à 100 rpm et de 6,6 cm à 140 rpm. Conséquemment, pour des proportions égales de polymère, la hauteur de la couche de sédiment semble augmenter avec l'augmentation du niveau d'agitation (la taille des agrégats affecterait le niveau de compaction de la boue).

Le meilleur résultat obtenu pour les essais en double addition du mélange DA est de 15 NTU. Le dosage de l'agent D est de 400 g/t et le dosage du polymère A de 60 g/t. La séquence d'injection idéale serait celle où l'agent D est injecté dans la conduite torsadée 8 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Un niveau d'agitation optimal de 100 rpm a permis d'obtenir le meilleur résultat de turbidité. Le plus bas résultat de turbidité obtenu préalablement était de 19 NTU pour un mélange BA (30-12) (conduite torsadée 24 tours – injecteur 2) à 130 rpm. Conséquemment, le mélange DA est efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges.

Par ailleurs, pour plusieurs essais effectués avec l'agent D, il a été impossible de mesurer la concentration en matières particulières résiduelles de la surverse (section 5.6.2). En effet, dans les échantillons de surverse recueillis, il a été observé qu'un précipité blanc se formait à la base du contenant. Suite à des analyses de diffraction aux rayons X, le précipité a été identifié comme étant principalement de l'alumine. Ainsi l'agent D est efficace pour réduire la turbidité résiduelle de la surverse mais semble provoquer une certaine précipitation de l'alumine au cours des essais. D'autre part, l'agent D semble rester actif dans la liqueur Bayer et ce même après un temps de repos de 2 semaines (peut provoquer une micro flocculation de la boue lors d'un essai ultérieur). Par conséquent, il a été impossible de recycler et de réutiliser la liqueur Bayer lorsque celle-ci a été en contact avec l'agent D (section 5.5.1). De ce fait, peu d'essais de flocculation ont été effectués avec l'agent D.

6.4.4 Triple addition dans le système Couette

Quelques essais de flocculation ont été effectués afin d'observer si les mélanges triples sont plus efficaces que les mélanges doubles, tel qu'observé dans les essais en test du cylindre. Les séquences d'injection choisies sont celles qui ont démontrées le plus d'efficacité dans le test du cylindre (DAA, DAB et DBA). Un niveau d'agitation de 80 rpm a été choisi pour les essais de flocculation en triple addition. Les points d'injection ne sont pas fixés à l'avance mais doivent respecter l'ordre d'injection (ordre des points d'injection ; conduite 24 tours, conduite 16 tours, conduite 8 tours, injecteur 2, injecteur 3 et injecteur 4). Les dosages utilisés sont de 400 g/t d'agent D, 60 g/t de polymère A et de 40 g/t de polymère B. La Figure 6.28 présente la variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection des mélanges triples. Les résultats de turbidité obtenus sont de 19 NTU pour le mélange DAB [(conduite 24 tours) – (conduite 8 tours) – (injecteur 2)], de 20 NTU pour le mélange DAB [(conduite 24 tours) – (conduite 16 tours) – (injecteur 2)], de 26 NTU pour le mélange DBA [(conduite 24 tours) – (conduite 8 tours) – (injecteur 2)] et de 18 NTU pour le mélange DAA [(conduite 24 tours) – (conduite 16 tours) – (injecteur 2)]. Pour les essais en double addition, le résultat le plus concluant est DA (400-60) avec une turbidité de 15 NTU. Conséquemment, l'utilisation de mélange triple dans le système Couette n'améliore pas la turbidité résiduelle de la suspension.

Les vitesses moyennes de sédimentation des particules sont (dans l'ordre d'apparition de la Figure 6.28) de 57,1 m/h, de 63,9 m/h, de 61,2 m/h et de 46,5 m/h. Ainsi, pour les mêmes dosages (3 premières colonnes), la vitesse de sédimentation varie en fonction de la

séquence d'introduction du mélange, tel qu'observée pour les mélanges doubles d'agents de flocculation. D'autre part, les valeurs des hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont (dans l'ordre d'apparition de la Figure 6.28) de 4,6 cm, de 4,5 cm, de 4,3 cm et de 4,9 cm. Ainsi, la hauteur de la couche de sédiment varie inversement à la turbidité. À dosages égaux, l'ordre d'injection des polymères et agents de flocculation semble avoir une incidence sur la structure des agrégats ce qui peut influencer le niveau de compaction de la boue.

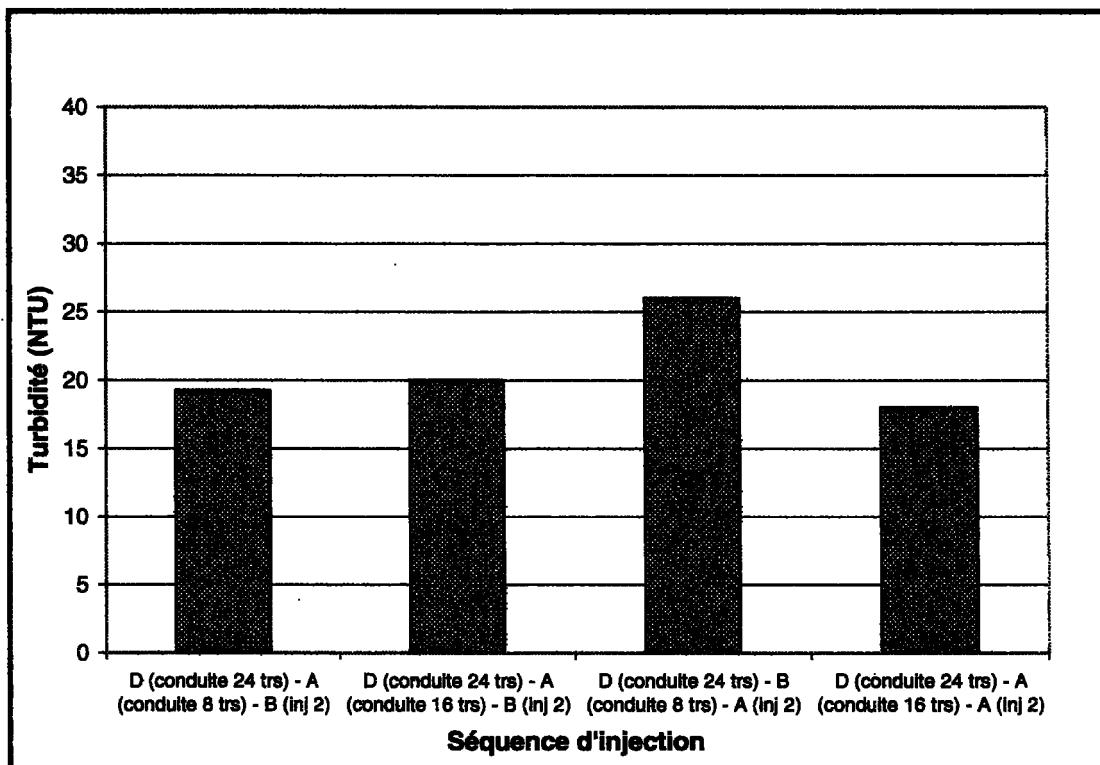


Figure 6.28 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection d'un mélange triple dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

6.5 Agent de flocculation I

Cette section porte sur l'étude et l'analyse d'essais de flocculation effectués avec l'agent I. Il a déjà été démontré⁽¹⁾ que l'agent de flocculation I était très efficace pour flocculer une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer.

6.5.1 Test du cylindre

6.5.1.1 Simple addition de l'agent I

Des essais en test du cylindre ont été effectués afin de déterminer l'efficacité de l'agent I à flocculer une suspension de boues rouges. Des études⁽¹⁾ sur la variation de la concentration de la solution de l'agent I ont démontré que la concentration qui semblait être la plus efficace était de 0,10 % p/p. Des essais supplémentaires sur la variation du dosage de l'agent I (0,10% p/p) démontrent que la turbidité diminue avec l'augmentation du dosage pour atteindre un équilibre à dosage élevé. Cette tendance est similaire à celle observée lors des essais avec les polymères et l'agent D. Les turbidités obtenues sont de 155 NTU à 200 g/t, de 108 NTU à 400 g/t, de 103 NTU à 600 g/t et de 105 NTU à 800 g/t. Les vitesses de sédimentation retardées n'ont pas été évaluées puisqu'elles étaient très lentes.

6.5.1.2 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation

Des essais de flocculation ont été réalisés en double addition avec les polymères A et B. L'ajout de l'agent I et des polymères s'effectue en deux séquences d'injection IA, AI, IB et BI. Chaque essai est reproduit trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des

résultats. Les dosages utilisés sont de 48 g/t de polymère A (0,01 % p/p), de 40 g/t de polymère B (0,01 % p/p) et de 400 g/t d'agent de flocculation I (0,10 % p/p). La Figure 6.29 présente la variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection pour des essais de flocculation en test du cylindre. Le mélange IA a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité soit de 81 NTU. Le meilleur résultat de turbidité obtenu préalablement en test du cylindre par un mélange double était de 147 NTU pour un mélange DA (400-48). En sommes, le mélange IA (400-48) semble très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. Les agents de flocculation I et A semblent avoir des interactions qui permettent d'augmenter l'efficacité de la flocculation comparativement au mélange DA.

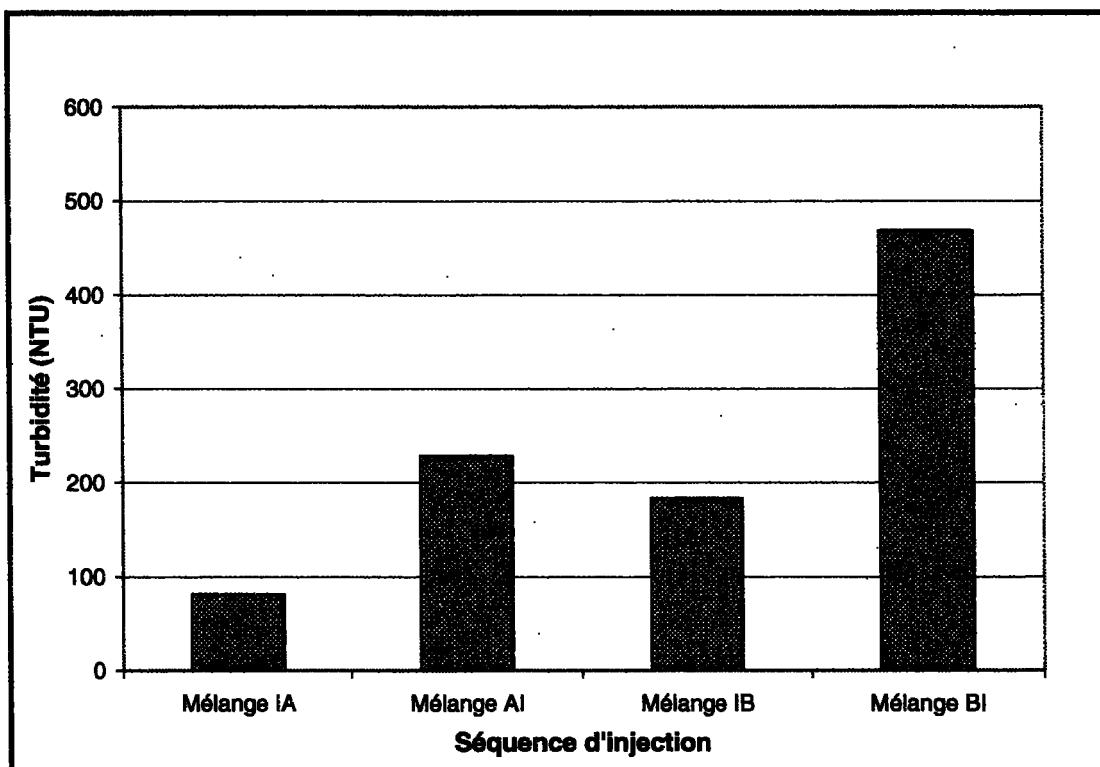


Figure 6.29 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double d'agents de flocculation en test du cylindre

Des essais complémentaires étaient nécessaires afin de vérifier si les proportions des agents de flocculation du mélange IA étaient optimales. La Figure 6.30 illustre la variation de la turbidité en fonction des proportions des agents I (0,10 % p/p) et A (0,01 % p/p) dans le mélange. Le mélange IA (600-48) a permis d'obtenir la turbidité la plus basse de 56 NTU suivit de près par la turbidité du mélange IA (400-60) de 61 NTU.

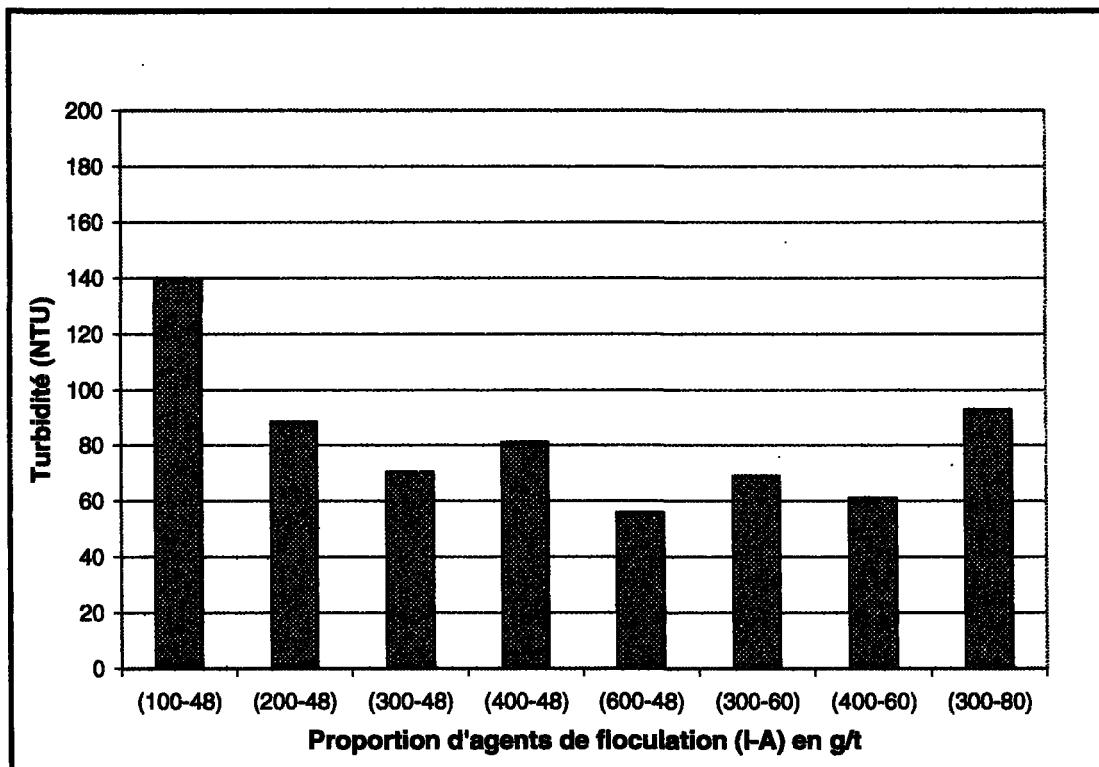


Figure 6.30 - Variation de la turbidité en fonction des proportions des agents dans le mélange double IA en test du cylindre

6.5.1.3 Triple addition d'un mélange d'agents de flocculation

Une étude⁽¹⁾ a démontré que l'utilisation conjointe de l'agent I et des polymères A et B dans des proportions bien définies, permettait d'améliorer considérablement la turbidité

d'une suspension de boues rouges. Les séquences d'injection possibles ont été déterminées à l'aide d'un tableau croisé. Les dosages utilisés sont de 48 g/t de polymère A (0,01 % p/p), de 40 g/t de polymère B (0,01 % p/p) et de 400 g/t d'agent de flocculation I (0,10 % p/p). Chaque essai est reproduit trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. La Figure 6.31 présente la variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange triple. Le mélange IAB a permis d'obtenir la turbidité la plus basse, soit de 26 NTU suivi de près par la turbidité du mélange IAA de 28 NTU. Les mêmes séquences d'injection triples avaient été obtenues par une étude précédente⁽¹⁾.

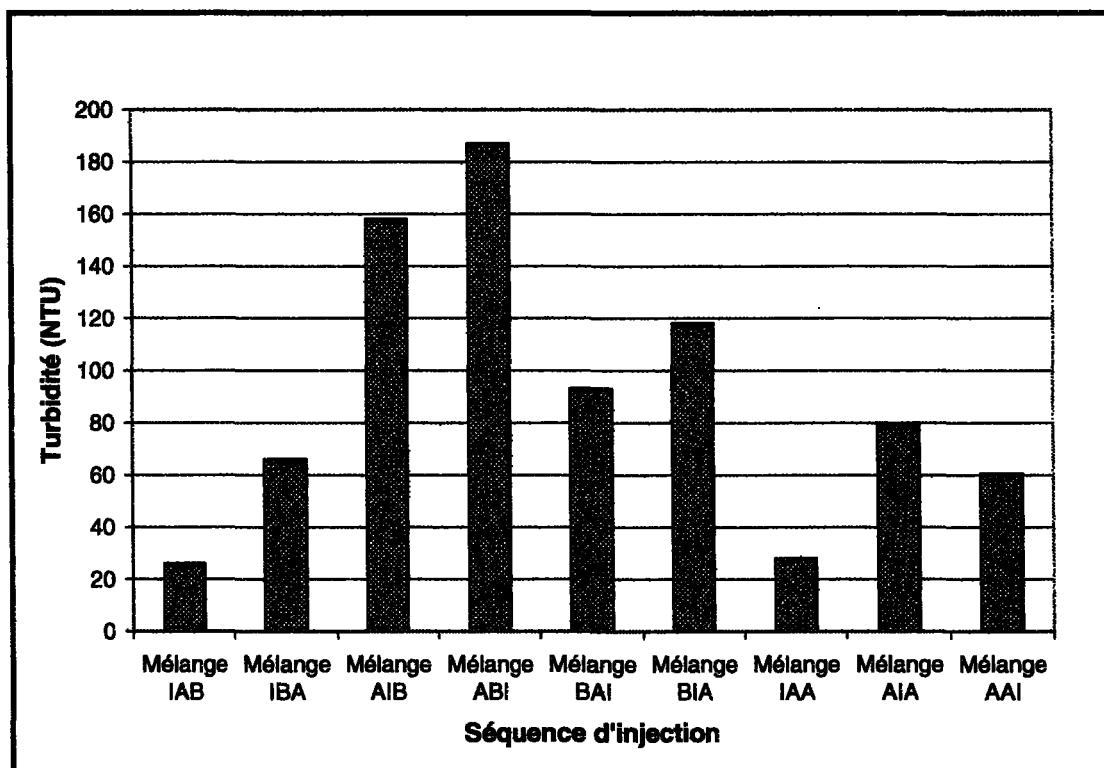


Figure 6.31 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange triple d'agents de flocculation en test du cylindre

6.5.2 Simple addition dans le système Couette

Un essai de flocculation dans le système Couette a été effectué en simple addition d'agent I. Une turbidité de 195 NTU (130 minutes d'expérimentation) a été obtenue pour un dosage de 400 g/t d'agent I (0,10 % p/p) introduit dans l'injecteur 2 à 70 rpm. Par conséquent, l'utilisation de l'agent I en simple addition ne semble pas améliorer la turbidité résiduelle d'une suspension de boues rouges (comparativement aux simples additions de polymères A et B) et aucun autre essai de ce genre n'a été effectué.

6.5.3 Double addition dans le système Couette

Des essais de flocculation avec le mélange IA (mélange optimal selon les essais en test du cylindre) ont été effectués dans le système Couette afin d'observer si les conditions d'agitation affectent les interactions entre les polymères et l'agent de flocculation. Un niveau d'agitation moyen de 80 rpm a été choisi pour les essais de flocculation en double addition dans le système Couette. Les niveaux d'injection ne sont pas fixés à l'avance mais doivent respecter l'ordre d'injection, c'est-à-dire que l'agent I doit être injecté avant le polymère A (ordre des points d'injection ; conduite 24 tours, conduite 16 tours, conduite 8 tours, injecteur 2, injecteur 3 et injecteur 4). Le tableau 6.3 illustre quelques séquences d'injection possibles pour l'utilisation du mélange IA.

| | | Polymère A | |
|----------------------------|--|--|---|
| Agent I | | Injecteur 2 | Conduite torsadée 16 tours |
| Conduite torsadée 8 tours | | Conduite torsadée 8 tours / Injecteur 2 | impossible |
| Conduite torsadée 16 tours | | Conduite torsadée 16 tours / Injecteur 2 | |
| Conduite torsadée 24 tours | | Conduite torsadée 24 tours / Injecteur 2 | Conduite torsadée 24 tours / Conduite torsadée 16 tours |

Tableau 6.3 - Séquences d'injection possibles pour la double addition de polymère A et d'agent de flocculation I

6.5.3.1 Séquence d'injection optimale d'un mélange double IA

Cette section vise à déterminer la séquence d'injection optimale, permettant d'obtenir la turbidité la plus basse, lors de l'utilisation d'un mélange double IA. Les dosages utilisés sont de 400 g/t d'agent I (0,10 % p/p) et de 60 g/t de polymère A (0,01 % p/p) (mélange idéal selon la section 6.5.1.2). Afin de limiter le nombre d'essais réalisé durant cette étude, seulement trois séquences d'injection ont été analysées (tableau 6.3). La Figure 6.32 présente la variation de la turbidité en fonction des séquences d'injection du mélange IA pour un niveau d'agitation de 80 rpm. La séquence d'injection I (conduite 24 tours) – A (injecteur 2) a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité soit de 13 NTU suivit de près par la turbidité du mélange I (conduite 8 tours) – A (injecteur 2) de 14 NTU.

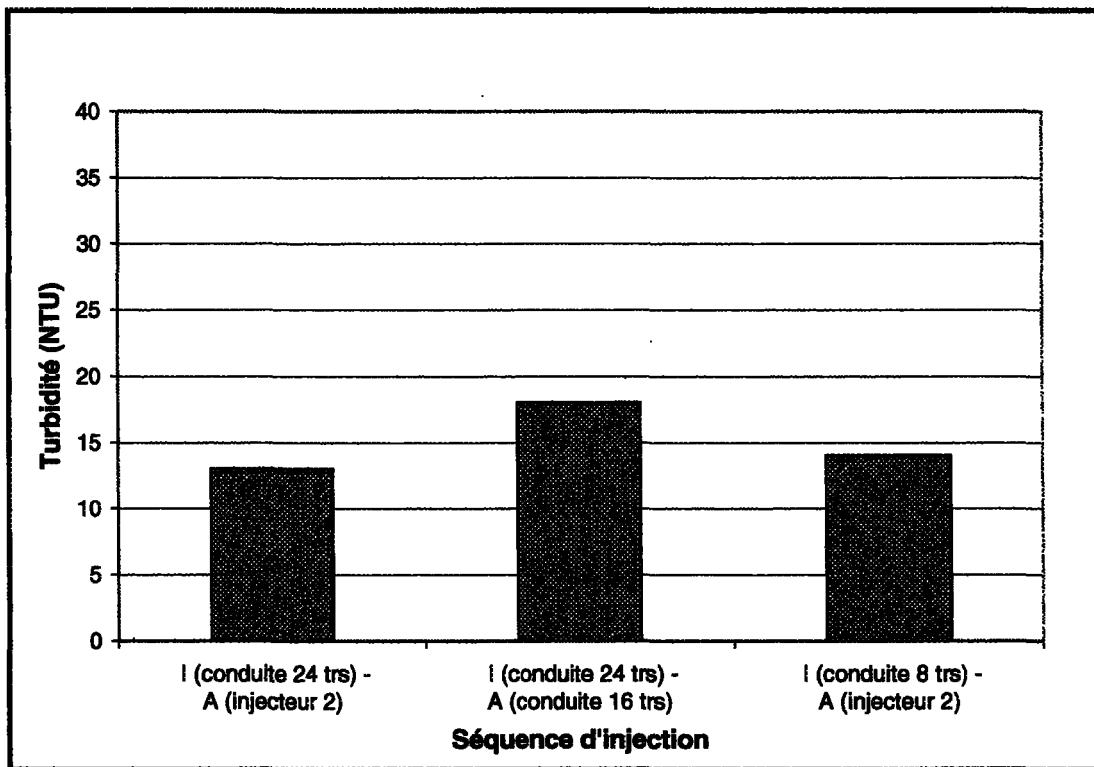


Figure 6. 32 - Variation de la turbidité en fonction de la séquence d'injection du mélange double IA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation des particules sont de 57,6 m/h pour la séquence I (conduite 24 tours) – A (injecteur 2) de 52,3 m/h pour la séquence I (conduite 24 tours) – A (conduite 16 tours), et de 42,2 m/h pour la séquence I (conduite 8 tours) – A (injecteur 2). Ainsi, pour les mêmes dosages, la vitesse de sédimentation semble varier en fonction de la séquence d'introduction du mélange (vitesse maximale pour la turbidité la plus basse). De plus, le profil de vitesse suit la même tendance que pour les mélanges doubles BA et DA, c'est-à-dire que la vitesse de sédimentation est maximale dans la séquence d'injection (conduite 24 tours – injecteur 2) et est minimale pour la séquence

(conduite 8 tours – injecteur 2). Donc, les mélanges doubles favorisent la création d'agrégats plus volumineux et/ou plus denses dans la séquence (conduite 24 tours – injecteur 2).

D'autre part, les valeurs des hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 4,5 cm pour la séquence I (conduite 24 tours) – A (injecteur 2), de 4,6 cm pour la séquence d'injection I (conduite 24 tours) – A (conduite 16 tours) et de 4,8 cm pour la séquence I (conduite 8 tours) – A (injecteur 2). Ainsi, à dosage égal, il y a peu de variation entre les hauteurs de sédiment. Cependant, pour tous les mélanges doubles (BA, DA et IA), la hauteur de la couche de sédiment varie de façon similaire lorsque les séquences d'injection sont les mêmes, c'est-à-dire que la hauteur est maximale pour la séquence (conduite 8 tours – injecteur 2) et minimale pour la séquence d'injection (conduite 24 tours – injecteur 2). Conséquemment, la hauteur de la couche de sédiment varie inversement à la vitesse de sédimentation lorsque les mélanges doubles sont utilisés.

6.5.3.2 Niveau d'agitation optimal du mélange double IA

Tel qu'observé préalablement, le niveau d'agitation influence grandement l'efficacité de la flocculation. Une série d'essais a été effectuée afin de déterminer le niveau d'agitation optimal du mélange double IA. La Figure 6.33 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour le mélange IA (400-60) optimal (agent I injecté dans la conduite 24 tours et polymère A dans l'injecteur 2). Chaque essai s'effectue sur une période de 180 minutes. Une turbidité minimale de 13 NTU est obtenue lorsque le niveau

d'agitation est de 80 ou 120 rpm. Un niveau d'agitation moins élevé augmente la turbidité résiduelle de la surverse. En effet, une turbidité de 19 NTU a été obtenue pour un niveau d'agitation de 40 rpm. Par conséquent, le mélange IA (400-60) semble bien réagir aux gradients de vitesse élevés tout comme le mélange de polymères BA.

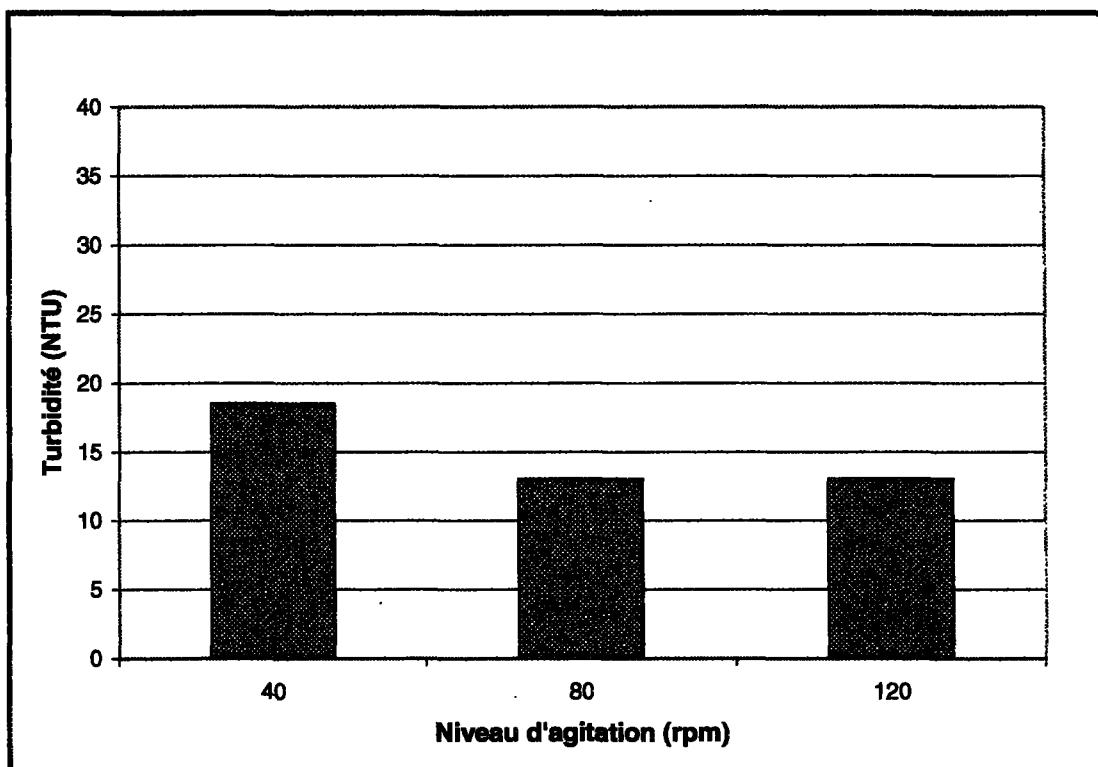


Figure 6.33 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation du mélange double IA (400-60) dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation pour chacun des essais sont de 57,6 m/h à 80 rpm et de 42,1 m/h à 120 rpm. Il a été impossible d'évaluer la vitesse de sédimentation à 40 rpm puisqu'il n'y avait pas suffisamment de particules à analyser dans les séquences vidéo. Par conséquent, la vitesse de sédimentation semble diminuer avec l'augmentation du niveau

d'agitation. En effet, plus le niveau d'agitation est élevé, plus les agrégats sont soumis à des gradients de vitesse importants ce qui peut contribuer à diminuer la taille des agrégats réduisant ainsi la vitesse de sédimentation. Les hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 4,0 cm pour un niveau d'agitation de 40 rpm, de 4,5 cm à 80 rpm et de 6,3 cm à 120 rpm. Conséquemment, pour des proportions égales de polymère, la hauteur de la couche de sédiment semble augmenter avec l'augmentation du niveau d'agitation (la taille des agrégats affecterait le niveau de compaction de la boue).

6.5.3.3 Dosage idéal du mélange double IA

La Figure 6.34 présente la variation de la turbidité en fonction des dosages du polymère A et de l'agent I dans le mélange IA. Chaque essai est d'une durée de 180 minutes. L'agent de flocculation I (0,10 % p/p) est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A (0,01 % p/p) dans l'injecteur 2. Le niveau d'agitation utilisé est de 80 rpm. Les résultats de turbidité obtenus sont de 13 NTU pour le mélange IA (400-60), de 12 NTU pour IA (300-40), de 15 NTU pour IA (200-40) et de 16 NTU pour IA (100-40). Ainsi, il est possible de diminuer les dosages des agents A et I tout en conservant une turbidité près de son minimum. Cette observation⁽¹⁾ est une bonne indication de l'efficacité de l'agent de flocculation I. De plus, cet aspect du mélange IA est très intéressant puisque les agents de flocculation sont souvent très coûteux.

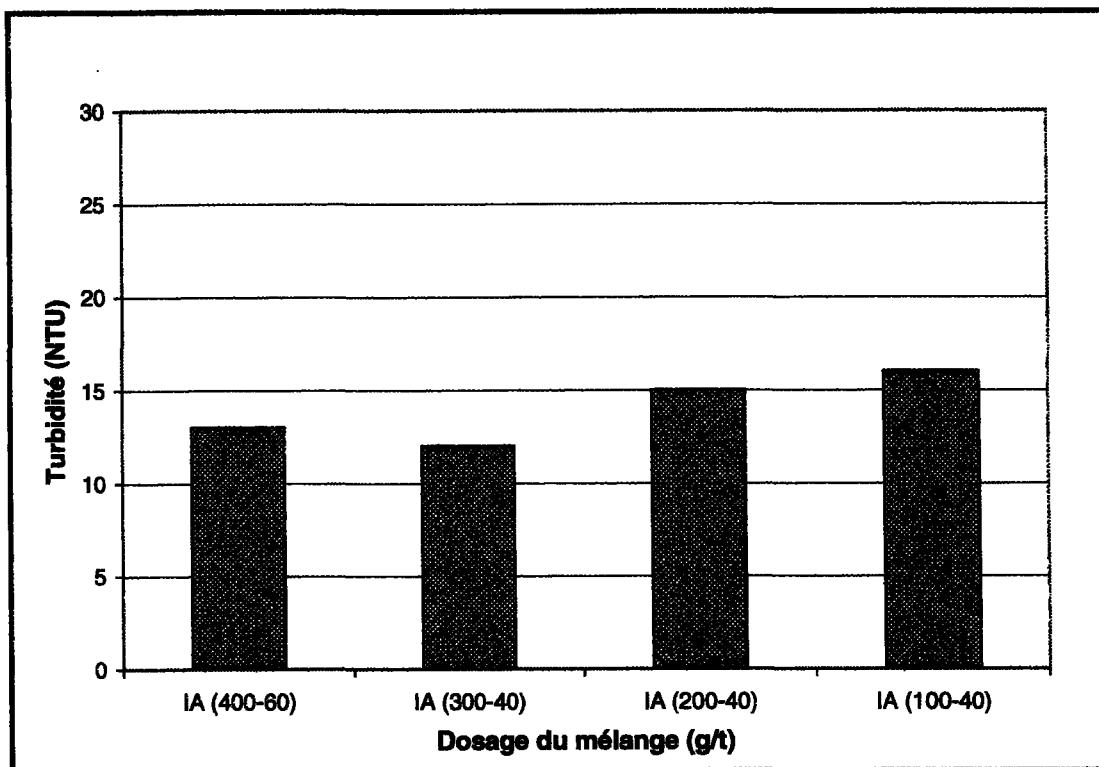


Figure 6.34 - Variation de la turbidité en fonction du dosage du mélange double IA dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

Les vitesses moyennes de sédimentation obtenues pour ces essais sont de 57,6 m/h pour le mélange IA (400-60), de 38,9 m/h pour IA (300-40), de 43,3 m/h pour IA (200-40) et de 67,7 m/h pour IA (100-40). De façon générale, lorsque le dosage de l'agent I diminue la vitesse de sédimentation augmente. Par ailleurs, les valeurs de hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 4,5 cm pour le mélange IA (400-60), de 5,4 cm pour IA (200-40) et de 3,9 cm pour IA (100-40). Ainsi, pour une quantité donnée de polymère A, la hauteur moyenne de la couche de sédiment augmente avec l'augmentation du dosage de l'agent I.

En somme, la turbidité la plus basse obtenue lors des essais en double addition du mélange d'agents de flocculation IA est de 12 NTU. Le dosage de l'agent de flocculation I est de 300 g/t et le dosage du polymère A de 40 g/t. La séquence d'injection idéale serait celle où l'agent I est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Un niveau d'agitation optimal de 80 rpm a permis d'obtenir le meilleur résultat de turbidité. Le plus bas résultat de turbidité obtenu préalablement était de 15 NTU pour un mélange DA (400-60) (conduite torsadée 8 tours – injecteur 2) à 100 rpm. De ce fait, le mélange IA est efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. Mentionnons également que le mélange IA (400-60), dans les mêmes conditions d'injection et d'agitation, semble tout aussi efficace pour réduire la turbidité (13 NTU après 180 minutes d'expérimentation).

6.5.3.4 Concentration en matières particulaires de la suspension de boues rouges

Une étude antérieure⁽¹⁾ a démontré que dans le test du cylindre, la turbidité résiduelle de la surverse diminue avec l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boues rouges. En effet, dans les essais en cylindre, l'augmentation de la concentration favorise les contacts entre les particules et les agents de flocculation. Ainsi, la surface de contact entre les particules en suspension et les agents de flocculation est plus grande, ce qui permet d'agglomérer un plus grand nombre de matières particulaires et de diminuer la turbidité de la surverse.

Une série d'essai a été effectuée afin d'évaluer si ce phénomène est également valide dans le système Couette. Le dosage de l'agent I (0,10 % p/p) est de 400 g/t et de 60 g/t pour le polymère A (0,01 % p/p). Le dosage est le même pour chaque essai mais le volume varie en fonction de la concentration en matières particulières de la suspension de boues rouges (section 5.4.3). Les différentes concentrations de la boue sont de 25 g/L, 50 g/L et 75 g/L. L'agent I est injecté dans la conduite 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Un niveau d'agitation de 80 rpm a été utilisé dans cette série d'essais. La Figure 6.35 présente la variation de la turbidité résiduelle de la surverse en fonction de la concentration en matières particulières de la boue.

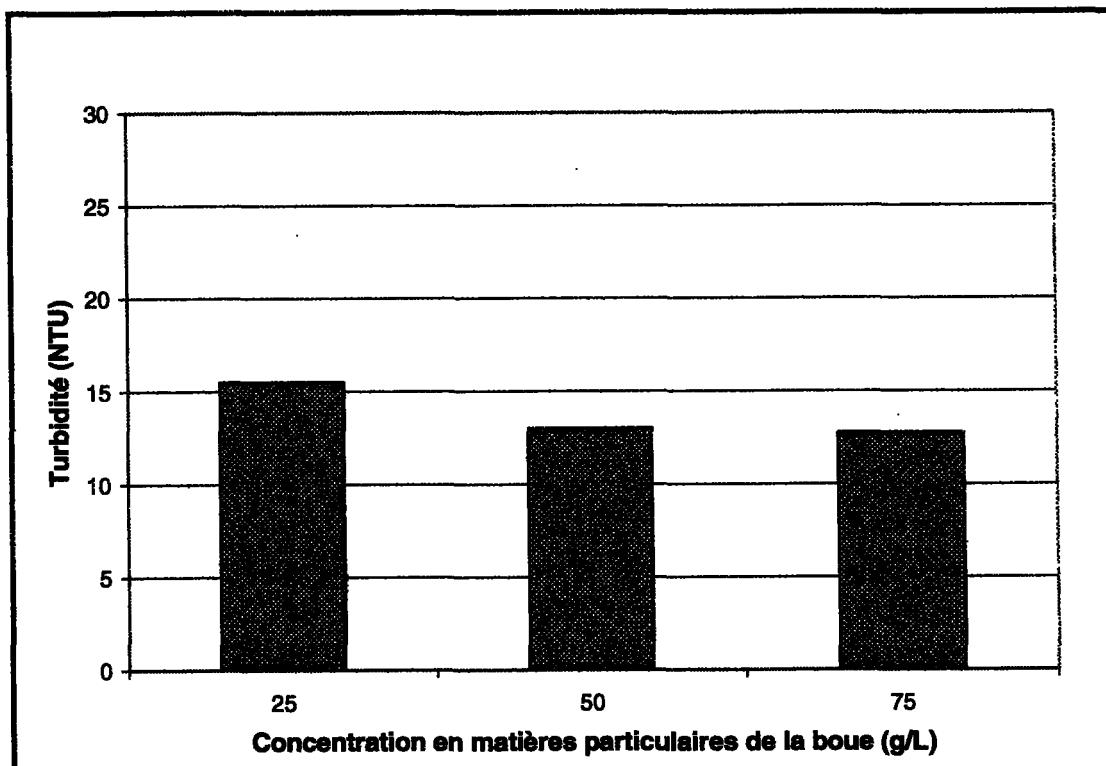


Figure 6.35 - Variation de la turbidité en fonction de la concentration en matières particulières de la boue pour le mélange double IA dans le système Couette

Ce graphique met en évidence qu'il n'y a pas de variation significative de turbidité en fonction de la concentration en matières particulaires. Les turbidités obtenues sont de 16 NTU à 25 g/L, de 13 NTU à 50 g/L et de 13 NTU à 75 g/L. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le niveau d'agitation du système Couette qui, contrairement au piston à disque perforé du test du cylindre, est suffisamment efficace pour permettre la rencontre des particules en suspension et des agents de flocculation indépendamment de la concentration de la boue. Conséquemment, le niveau d'agitation est une variable très importante du processus de flocculation. L'efficacité de la flocculation peut ainsi être favorisée par l'augmentation de la concentration en matières particulaires (test du cylindre) ou par une agitation adéquate (système Couette).

Les vitesses moyennes de sédimentation sont de 48,8 m/h à 25 g/L, de 57,6 m/h à 50 g/L et de 47,0 m/h à 75 g/L. Il est possible que la structure des agrégats soit affectée par la quantité de matières en suspension (variation de la taille et/ou densité des agrégats d'une concentration à l'autre). Les hauteurs moyennes de la couche de sédiment sont de 3,0 cm à 25 g/L, de 4,5 cm à 50 g/L et de 6,3 cm à 75 g/L. La couche de sédiment augmente donc avec la concentration de matières particulaires (plus de matières à floculer).

6.5.3.5 Essai longue durée

La totalité des essais présentée préalablement ont une durée de 180 minutes. Ce temps d'expérimentation a été choisi suite à des essais préliminaires avec le polymère A dans le système Couette. En effet, la turbidité du système augmente et semble atteindre un

état stationnaire après 140 à 160 minutes d'expérimentation. Cependant, il est important d'effectuer un essai de flocculation de longue durée afin d'évaluer l'état d'équilibre du système Couette à plus long terme. Ainsi, le système Couette a été adapté pour effectuer une flocculation sur une période de 22 heures. Le mélange IA (400-60) a été choisi pour cet essai de longue durée et l'agent I (0,10 % p/p) est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A (0,01 % p/p) dans l'injecteur 2. Un niveau d'agitation de 80 rpm a été utilisé. La Figure 6.36 présente les résultats de la variation de la turbidité en fonction du temps d'expérimentation.

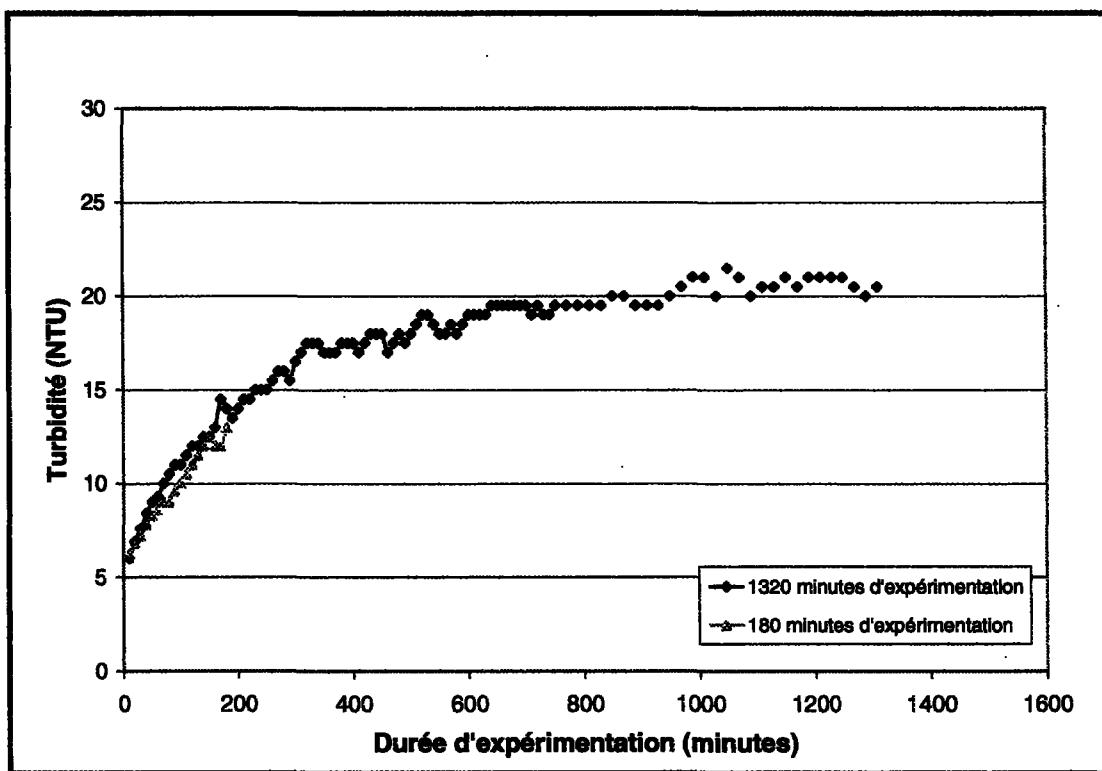


Figure 6.36 - Variation de la turbidité en fonction de la durée d'expérimentation pour le mélange double IA dans le système Couette

Le graphique met en évidence que la turbidité augmente pour atteindre un état d'équilibre aux alentours de 500 minutes. Après ce temps, la turbidité atteint une valeur moyenne de 19 NTU. Ainsi, le temps requis pour atteindre un état d'équilibre avec le mélange IA (~ 500 minutes) est différent de celui pour la simple addition de polymère A (~ 140 à 160 minutes). Il est ainsi possible de penser que la nature des agents (A, B, BA, AB, DA et IA) et des conditions d'opération (niveau et durée d'agitation) utilisés influenceraient l'état d'équilibre du système expérimental. Conséquemment, plus la flocculation est efficace (basse turbidité), plus le temps nécessaire à l'observation d'un état d'équilibre est long. Il ne faut toutefois pas négliger qu'une accumulation continue de sédiment dans le système Couette (sur une période de 22 heures) peut entraîner une contamination de la liqueur. (beaucoup plus de sédiment pour la même quantité de liqueur Bayer). En somme, une durée de 180 minutes n'était peut être pas suffisante pour permettre au système d'atteindre l'équilibre. Néanmoins, la variation de turbidité entre 180 (13 NTU) et 1320 (20 NTU) minutes n'est pas très importante compte tenu de l'erreur de reproductibilité de la méthode du système Couette (± 2 NTU).

6.5.4 Triple addition dans le système Couette

Quelques essais de flocculation ont été effectués afin d'observer si les mélanges triples sont plus efficaces que les mélanges doubles, tel qu'observé dans les essais en test du cylindre. Les séquences d'injection choisies sont celles ayant démontré le plus d'efficacité dans le test du cylindre (IAB et IAA). Les points d'injection ne sont pas fixés à l'avance mais doivent respecter l'ordre d'injection (ordre des points d'injection ; conduite 24 tours,

conduite 16 tours, conduite 8 tours, injecteur 2, injecteur 3 et injecteur 4). Les dosages utilisés sont de 400 g/t d'agent I, 60 g/t de polymère A et de 40 g/t de polymère B. La Figure 6.37 présente la variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation. Le meilleur résultat obtenu est de 18 NTU pour IAB (400-60-40) à 80 rpm. Pour les essais en double addition, une turbidité de 13 NTU a été obtenue avec le mélange IA (400-60) à 80 rpm. Par conséquent, l'utilisation de mélange triple dans le système Couette n'améliore pas la turbidité résiduelle de la suspension.

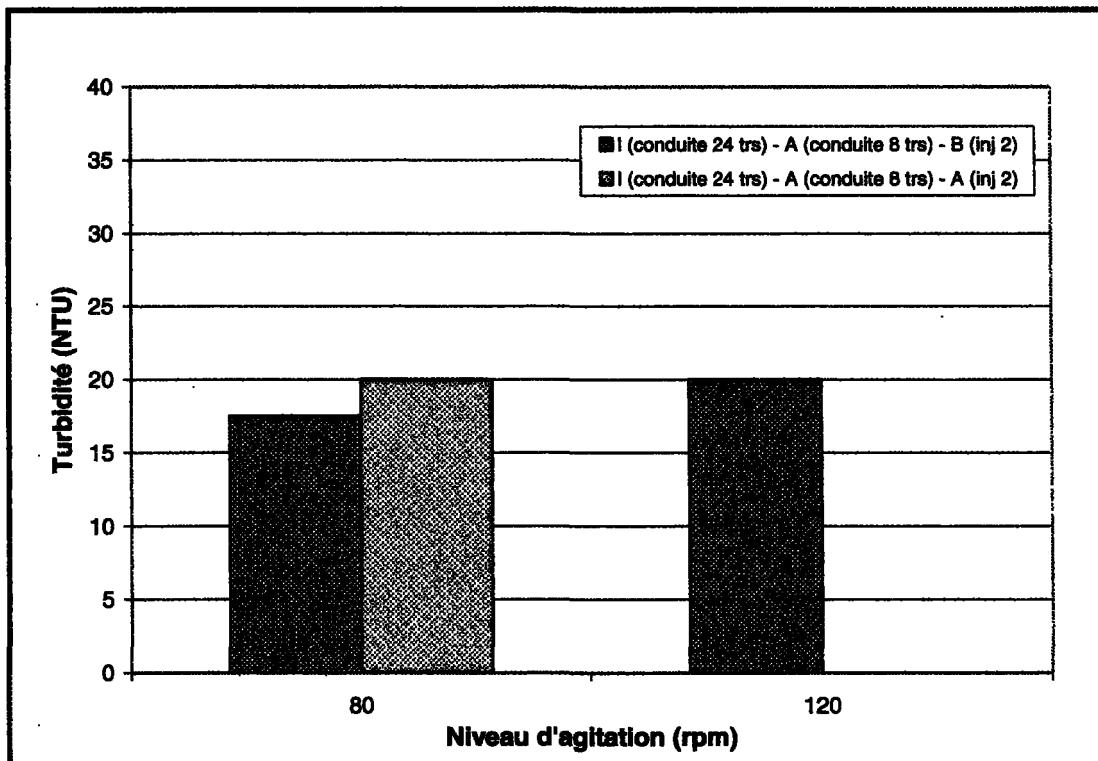


Figure 6.37 - Variation de la turbidité en fonction du niveau d'agitation pour des mélanges triples dans le système Couette, 180 minutes d'expérimentation

6.6 Synthèse

Au cours du présent projet de recherche, différentes méthodes de flocculation ont été proposées afin d'abaisser la turbidité résiduelle de la surverse d'une suspension de boues rouges. La présente section a pour but d'exposer les principales observations retenues durant cette étude. Conséquemment, un récapitulatif des résultats obtenus pour chacune des mesures effectuées au cours des expérimentations est présenté.

6.6.1 Turbidité

La turbidité de la surverse est la mesure principale effectuée lors des expérimentations. Elle permet d'évaluer la clarté de la liqueur Bayer (section 5.6.1). Plusieurs polymères et agents de flocculation ont été utilisés en combinaison avec des séquences d'injection et des niveaux d'agitation spécifiques afin d'en abaisser la valeur. Le tableau 6.4 (page 196) présente les plus bas résultats de turbidité obtenus pour chacun des types d'addition de polymère.

6.6.1.1 *Simple addition de polymère*

Deux polymères ont été utilisés au cours des expérimentations (A et B). Des essais préliminaires en test du cylindre ont permis de fixer la concentration des solutions de polymères (0,01 % p/p) et leurs dosages respectifs. L'utilisation des polymères dans le montage expérimental démontre que la turbidité de la surverse varie avec le niveau d'agitation (cloche inversée). Cette tendance pourrait être attribuable aux effets du niveau d'agitation sur la formation des agrégats. En effet, les turbidités minimales

correspondraient à un état d'équilibre entre les forces de fragmentation et de formation des agrégats. Par ailleurs, les variations de turbidité dues au niveau d'agitation pour les polymères A et B, sont beaucoup moins importantes dans les conduites torsadées que dans les injecteurs Couette, indiquant ainsi que le gradient de vitesse agit différemment sur la formation des agrégats en fonction du type d'injection utilisé.

La durée d'agitation semble également être un facteur important dans l'optimisation de la floculation. En effet, le polymère se mélange moins bien avec la suspension lorsque le temps d'agitation est de courte durée (injecteur 4 représentant la plus courte durée), minimisant le nombre d'interactions entre les particules et les chaînes de polymères et augmentant ainsi la turbidité résiduelle de la surverse. Les effets de la durée d'agitation semblent moins importants pour les conduites torsadées, indiquant ainsi que les conditions de mélange du polymère et des particules de boues y sont suffisamment efficaces.

Il existe deux différences significatives entre le polymère A et le polymère B. Tout d'abord, les valeurs de turbidités obtenues avec le polymère A sont généralement inférieures à celles obtenues par le polymère B (conditions similaires) indiquant ainsi que le polymère A serait plus efficace pour floculer une suspension de boues rouges. Par ailleurs, les niveaux d'agitation requis pour atteindre une turbidité minimale avec le polymère A sont de (60 à 140 rpm) et de (50 à 100 rpm) pour le polymère B. Conséquemment, les agrégats formés avec le polymère B semblent plus fragiles sous l'action d'un important gradient de vitesse et se brisent plus facilement.

6.6.1.2 Double addition de polymère

La double addition de mélange de polymères a permis d'abaisser la turbidité de la surverse comparativement à une simple addition de polymère. En effet, les polymères A et B semblent avoir des interactions qui permettent d'améliorer l'efficacité de la flocculation. Néanmoins, l'ordre et la séquence d'injection des polymères influencent l'efficacité du mélange utilisé. Ainsi, les mélanges BA semblent plus efficaces que les mélanges AB. De plus, la séquence d'injection (conduite torsadée 24 tours – injecteur 2) semble favoriser la flocculation.

6.6.1.3 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation

Deux agents de flocculation ont été utilisés ; D et I. L'utilisation de ces agents en simple addition ne semble pas améliorer la turbidité de la surverse (turbidité supérieure à 160 NTU) ainsi peu d'essais ont été effectués. Néanmoins, lorsque ces agents sont combinés à un polymère, l'efficacité de la flocculation s'en trouve grandement améliorée. Cependant, comme dans le cas des mélanges de polymères (A et B), l'ordre et la séquence d'injection des mélanges d'agents influencent l'efficacité de la flocculation. Ainsi, les mélanges qui semblent les plus efficaces sont IA et DA. La séquence d'injection la plus efficace pour le mélange DA semble être (conduite 8 tours – injecteur 2) et (conduite 24 tours – injecteur 2) pour le mélange IA. Des niveaux d'agitation optimaux de 100 rpm pour le mélange DA et de 80 à 120 rpm pour le mélange IA ont été trouvés. Des résultats exceptionnellement bas de turbidité ont été obtenus soit de 15 NTU pour DA (400-60) et de 12 NTU pour IA (300-40). Cependant, il y a un inconvénient à l'utilisation de l'agent D

puisque sous certaines conditions une précipitation de l'alumine a eu lieu dans la liqueur Bayer.

| Essai | Temps (min) | Agitation (trpm) | Durée d'addition | Turbidité (NTU) |
|---|-------------|------------------|-------------------------------|-----------------|
| Doubletage de base | - | - | - | ~ 6 |
| Double addition de polymère A | 48 | 140 | Conduite 8 Trs | 36 |
| Double addition de polymère B | 40 | 60 | Injecteur 2 | 73 |
| Double addition de polymères A+B | (48-40) | 80 | Conduite 8 Trs / Injecteur 2 | 39 |
| Double addition de polymère A+B | (30-12) | 130 | Conduite 24 Trs / Injecteur 2 | 19 |
| Double addition de polymère de flocculation C | (400-60) | 100 | Conduite 8 Trs / Injecteur 2 | 15 |
| Double addition d'agents de flocculation C | (300-40) | 80 | Conduite 24 Trs / Injecteur 2 | 12 |

Tableau 6.4 - Conditions optimales et niveaux de turbidité les plus bas obtenus au cours des expérimentations

6.6.2 Vitesse de sédimentation

6.6.2.1 Simple addition de polymère

La vitesse de sédimentation a été évaluée afin de caractériser la performance de la flocculation. En simple addition de polymères A et B, les vitesses moyennes de sédimentation des particules sont maximales lorsque la turbidité est minimale. Cette tendance est la même qu'observée en test du cylindre. Ainsi, plus les agrégats sont

volumineux, plus ils sédimentent rapidement et moins il y a de particules en suspension. En effet, les vitesses de sédimentation des particules obtenues avec le polymère A sont supérieures à celles obtenues par le polymère B (turbidité A < turbidité B). Par ailleurs, plus la durée d'agitation est longue, plus la moyenne des vitesses de sédimentation est élevée (vitesse plus rapide pour l'injecteur 2 que pour l'injecteur 4) démontrant ainsi que les conditions de formation des agrégats dans l'injecteur 2 favoriseraient la formation d'agrégats plus gros et/ou plus denses.

À l'inverse, dans les conduites torsadées, le profil de vitesse diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation, indépendamment de la turbidité. Ceci pourrait s'expliquer par les effets du gradient de vitesse sur la formation des agrégats qui varierait de la conduite torsadée à l'injecteur Couette. De plus, la formation des agrégats est influencée par l'injection du polymère qui s'effectue au centre de la conduite torsadée, favorisant ainsi une meilleure dispersion du polymère sur une plus courte période de temps contrairement aux injecteurs Couette.

6.6.2.2 Double addition de polymère

Le profil de vitesse est plus difficile à analyser en doubles additions de polymère puisque il y a des interactions polymère-polymère qui peuvent influencer la formation des agrégats (densité et taille). Néanmoins, il est possible d'observer que lorsque la quantité de polymère B augmente, la vitesse de sédimentation augmente également. Cette tendance est la même en test du cylindre⁽¹⁾. Ainsi, le polymère B, lorsque utilisé en double addition

favorise la formation d'agrégats plus gros et/ou plus volumineux. La vitesse de sédimentation des particules est également influencée par le niveau d'agitation et la séquence d'injection des polymères. Ainsi, l'augmentation du niveau d'agitation favoriserait une diminution de la vitesse de sédimentation. En effet, plus le niveau d'agitation est élevé, plus les agrégats sont soumis à des gradients de vitesse importants ce qui peut contribuer à diminuer la taille des agrégats réduisant ainsi la vitesse de sédimentation. À l'inverse, pour des dosages identiques et des séquences d'injection variables, la vitesse de sédimentation varie inversement à la turbidité (vitesse maximum pour turbidité minimum), tel qu'observé dans les simples additions de polymère.

6.6.2.3 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation

Pour les doubles additions de mélanges d'agents de flocculation, le profil de vitesse varie différemment mais quelques similitudes peuvent être observées entre les deux agents. Ainsi, pour des conditions d'opération fixes et des dosages variables, la vitesse de sédimentation augmente lorsque la quantité de polymère A diminue dans le mélange. Par ailleurs, les vitesses de sédimentation sont maximales lorsque la séquence d'injection (conduite torsadée 24 tours – injecteur 2) est utilisée et sont minimales pour la séquence (conduite torsadée 8 tours - injecteur 2). Cette tendance a également été observée pour les doubles additions de polymères (AB). Ainsi, certaines séquences favoriseraient la création d'agrégats plus volumineux et/ou plus denses. De plus, la vitesse diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation comme dans le cas des doubles additions de polymères.

6.6.3 Hauteur de la couche de sédiment

6.6.3.1 Simple addition de polymère

La hauteur de la couche de sédiment est une mesure démontrant l'influence de la flocculation sur la compaction de la boue. Généralement, lorsque la turbidité est à son niveau le plus bas, la hauteur de la couche de sédiment est maximale, indiquant ainsi que l'efficacité de la flocculation a un impact sur la compaction de la boue.

6.6.3.2 Double addition de polymère

La hauteur moyenne de la couche de sédiment diminue lorsque la quantité de polymère A dans le mélange diminue. La séquence d'injection et le niveau d'agitation influence également la hauteur de la couche. En effet, celle-ci est minimale lorsque la séquence (conduite torsadée 24 tours – injecteur 2) est utilisée et est maximale pour la séquence (conduite torsadée 8 tours - injecteur 2). De plus, la hauteur de la couche diminue avec l'augmentation du niveau d'agitation. En somme, la hauteur de la couche de sédiment varie inversement au profil de vitesse observé dans les mêmes conditions.

6.6.3.3 Double addition d'un mélange d'agents de flocculation

Pour les doubles additions de mélanges d'agents de flocculation, la hauteur moyenne de la couche de sédiment varie différemment mais quelques similitudes peuvent être observées entre les deux agents. Tout d'abord, pour des quantités données de polymère A, la hauteur moyenne diminue avec la diminution du dosage de l'agent (D ou I). Toutefois, cette diminution est moins prononcée pour le mélange d'agent DA. Par ailleurs, la hauteur

moyenne de la couche est maximale lorsque la séquence d'injection (conduite torsadée 8 tours – injecteur 2) est utilisée et est minimale pour la séquence (conduite torsadée 24 tours - injecteur 2). De plus, la hauteur de la couche augmente avec l'augmentation du niveau d'agitation. Conséquemment, les valeurs des hauteurs des couches de sédiment varient inversement au profil de vitesse observé lorsque les mélanges doubles sont utilisés.

6.6.4 Concentration en matières particulaires de la surverse

Cette mesure est associée à la clarté de la suspension flokulée (section 5.6.2). Le tableau 6.5 présente les concentrations en matières particulaires associées aux valeurs de turbidité les plus basses obtenues au cours des expérimentations. Il a cependant été impossible de mesurer la concentration en matières particulaires du mélange DA puisque la liqueur Bayer était instable et qu'il y avait formation d'un précipité. Cette instabilité n'a pas été observée pour les autres mélanges.

| Méthode | Concentration en matières particulaires (mg/l) | Turbidité (NTU) |
|----------------------------------|--|-----------------|
| Injecteur Bayard de base | 2 | ~6 |
| Double addition du précurseur A | 12 | 36 |
| Double addition du précurseur B | 42 | 73 |
| Double addition du précurseur DA | 7 | 19 |
| Double addition d'agents DA | - | 15 |
| Double addition d'agents LA | 6 | 12 |

Tableau 6.5 - Concentration en matières particulaires associée aux niveaux de turbidité les plus bas obtenus au cours des expérimentations

CONCLUSION

L'objectif premier du présent projet de recherche consistait à effectuer des essais de flocculation en continu dans un système Couette afin d'établir des conditions optimales de séparation solide/liquide et de réduire la quantité de matières particulières en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à ceux retrouvés en usine.

Plusieurs variables peuvent influencer la flocculation telles que le type d'agent de flocculation, la séquence d'introduction, l'intensité et la durée de l'agitation. Afin de permettre un meilleur contrôle de ces paramètres, un montage expérimental basé sur la géométrie Couette a été développé. Ce dernier permet de simuler la flocculation en continu sous les conditions généralement retrouvées dans un circuit de lavage du procédé Bayer. L'appareil Couette permet de produire des niveaux d'agitation de façon reproductibles et contrôlés contrairement au piston à disque perforé du test du cylindre. La reproductibilité de la méthode du système Couette a été évaluée en répétant 6 fois le même essai. L'erreur de reproductibilité moyenne de la méthode de mesure de turbidité du système Couette est d'environ ± 2 NTU. Des calculs similaires ont été appliqués pour déterminer l'écart-type (intervalle de confiance de 95 %) des autres mesures associées aux expérimentations dans le système Couette.

Les premières séries d'essais effectuées dans le système Couette visaient à déterminer les conditions d'opération optimales (niveau et durée d'agitation) permettant d'obtenir le plus bas niveau de turbidité lors d'une simple addition de polymère. Ces essais ont permis de mettre en évidence que les conditions optimales de flocculation diffèrent d'un type de polymère à l'autre. En effet, les conditions optimales de flocculation du polymère A (0,01 % p/p) à 48 g/t sont ; l'injecteur 2 et la conduite torsadée 8 tours comme meilleurs points d'injection et un niveau d'agitation variable entre 60 et 140 rpm. Par ailleurs, les conditions optimales du polymère B à 40 g/t (0,01 % p/p) sont ; l'injecteur 2 et la conduite torsadée 24 tours comme meilleurs points d'injection et un niveau d'agitation variable entre 50 et 100 rpm. Dans ces conditions, il a été possible d'obtenir une turbidité minimale de 36 NTU pour le polymère A et de 73 NTU pour le polymère B. En somme, le polymère A semble plus efficace pour flocculer une suspension de boues rouges et plus résistant aux valeurs élevées de gradient de vitesse que le polymère B. Donc, le niveau d'agitation est une variable très importante dans l'optimisation du processus de flocculation. Il pourrait être intéressant d'effectuer des essais de flocculation avec le polymère A pour des niveaux d'agitation supérieurs à 140 rpm afin d'observer si la flocculation y serait plus efficace.

Dans certains cas (injecteur Couette) et pour des conditions d'opération similaires, il a été observé que la vitesse de sédimentation des particules est maximale lorsque la turbidité est à son niveau le plus bas. Dans d'autres cas (conduite torsadée), il ne semble pas y avoir de lien direct entre la turbidité et la vitesse de sédimentation⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾. Ce phénomène pourrait être associé à la structure des agrégats qui varierait en fonction des

effets du gradient de vitesse et des conditions d'injection des polymères rencontrés dans la conduite torsadée et l'injecteur Couette. Conséquemment, la durée de l'agitation (injecteur ou conduite) est un autre facteur important dans le processus de flocculation.

Par ailleurs, il a été démontré que les conditions d'agitation requises pour obtenir une flocculation optimale dépendent de la composition typique de la boue rouge et de la nature du flocculant⁽¹⁰⁾. En effet, pour le même polymère, les conditions d'opération diffèrent d'un type de boue à l'autre. Une étude plus approfondie de la matière première pourrait permettre une meilleure compréhension du processus de flocculation et des relations existant entre les particules en suspension et les polymères.

Une autre variable considérée dans cette étude est la double addition d'un mélange de polymères. Le plus bas résultat de turbidité, soit de 19 NTU, est obtenu avec le mélange BA (30-12) à 130 rpm et où le polymère B est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. En comparant ce résultat aux résultats de turbidité obtenus en utilisant le polymère A (polymère le plus efficace en simple addition), ce mélange permet de réduire la turbidité de la surverse de 47 %. D'autres essais, avec des proportions de polymère intermédiaires, pourraient être effectués afin de déterminer si le mélange AB (30-12) est le plus efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. De plus, une étude plus approfondie des effets du niveau d'agitation et de la séquence d'injection sur la structure des agrégats pourrait également aider à la compréhension du phénomène de flocculation en double addition.

La double addition d'un mélange d'agents de flocculation est une autre variable importante. Deux types d'agents ont été utilisés : D et I. Le meilleur résultat de turbidité obtenu avec l'agent D (1,00 % p/p) est de 15 NTU pour un mélange DA (400-60) à 100 rpm et où l'agent D est injecté dans la conduite torsadée 8 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Ainsi, pour un niveau d'agitation moindre, le mélange DA semble plus efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues que le mélange BA. Par ailleurs, pour certains essais il a été observé qu'il y avait formation d'un précipité (alumine). Étant donné l'efficacité du mélange DA, des expérimentations supplémentaires seraient nécessaires afin de déterminer les causes exactes de la formation du précipité.

La double addition d'un mélange IA a permis d'obtenir des résultats de turbidité exceptionnellement bas. En effet, le mélange IA (300-40) à 80 rpm a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité soit de 12 NTU. L'agent de flocculation I est injecté dans la conduite torsadée 24 tours et le polymère A dans l'injecteur 2. Ainsi, pour un dosage moindre et un niveau d'agitation moins élevé, le mélange IA est plus efficace que le mélange DA. Mentionnons également qu'il est possible de diminuer les dosages du mélange IA tout en conservant la turbidité près de sa valeur minimale. En effet, pour des conditions d'opération similaires, le mélange IA (100-40) permet d'obtenir une turbidité de 16 NTU. Cet aspect du mélange IA est très intéressant puisque les agents de flocculation sont souvent très coûteux. D'autre part, le mélange IA (300-40) a démontré un bon degré d'efficacité aux niveaux d'agitation élevés. Par conséquent, des essais de flocculation pour

des niveaux d'agitation supérieurs à 140 rpm pourraient peut-être permettre d'abaisser la turbidité.

La variation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boues rouges a permis de mettre en évidence l'efficacité de mélange du système Couette comparativement à celle du test du cylindre. En effet, pour trois concentrations différentes, aucune variation de turbidité n'a été observée dans le système Couette. À l'inverse, l'augmentation de la concentration en matières particulaires en test du cylindre favorise la diminution de la turbidité. Donc, le niveau d'agitation du système Couette est suffisamment efficace pour permettre la rencontre des particules en suspension et des agents de flocculation indépendamment de la concentration de la boue. Les résultats obtenus confirment encore une fois que le niveau d'agitation est un facteur important dans le processus de flocculation.

La triple addition d'un mélange d'agents de flocculation est une variable qui a également été évaluée. Des essais, effectués avec les agents D ou I et les polymères A et B, ont permis de mettre en évidence que la triple addition ne semble pas plus efficace que la double addition d'un mélange d'agents de flocculation. Une étude plus approfondie pourrait peut-être permettre d'abaisser la turbidité. Cependant, il est plus difficile de déterminer des conditions d'opération optimales lorsqu'il y a plusieurs agents dans le mélange. En somme, il ne semble pas nécessaire d'améliorer la turbidité des mélanges triples étant donné les bons résultats de turbidité obtenus avec les mélanges doubles.

L'emploi de mélanges doubles de polymères et/ou d'agents de flocculation, sous des conditions d'agitation optimales, permet d'obtenir des niveaux de turbidité exceptionnellement bas. En effet, les concentrations en matières particulières associées aux turbidités des essais en double addition sont inférieures (tableau 6.5) à celles retrouvées en usine après filtration (10 mg/L). Cette efficacité des mélanges doubles résulte probablement d'interactions entre les polymères et/ou les agents de flocculation. Considérant les bons résultats obtenus sous les conditions des circuits de lavages du procédé Bayer, il a été envisagé d'utiliser ce système expérimental sous les conditions retrouvées dans les décanteurs à haut rendement du même procédé.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Normandin, M.; Étude sur la clarification d'une suspension de boues rouges et de liqueur bayer par flocculation, Mémoire de Maîtrise, UQAC, 2005, 144 pages.
- (2) Connelly, L.J., Owen, D.O. et Richardson, P.F.; Synthetic flocculant technology in the Bayer process, Light Metals, 1986, p. 61-68.
- (3) Owen, A.T., Fawell, P.D., Swift, J.D., Farrow, J.B., The impact of polyacrylamide flocculant solution age on flocculation performance, International Journal of Mineral Processing, 2002, p. 124-143.
- (4) Farrow, J.B. et Warren, L.J.; A new technique for characterizing flocculated suspensions, Dewatering Technology and Practice, Australia, 1989, p. 61-64.
- (5) Xiang, Yu, Somasundaran, P., Enhanced flocculation with double flocculant, vol. 81, Colloids and Surfaces. A. Physicochemical and Engineering Aspects, 1993, p. 17-23.
- (6) Norme ASTM D2035-80, Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water, 1999.
- (7) Farrow, J.B. et Swift, J.D.; A new procedure for assessing the performance of flocculants, International Journal of Mineral Processing, 1996, Vol 46, p. 263-275.

- (8) Fawell, P.D., Farrow, J.B. et Swift, J.D.; Focused beam reflectance measurement for continuous assessment of flocculant performance, Polymers in Mineral Processing, p. 91-104.
- (9) Scott, J.P., Fawell, P.D., Ralph, D.E. et Farrow J.B.; The shear degradation of high-molecular-weight flocculant solutions, Journal of Applied Science, 1996, Vol. 62, p. 2097-2106.
- (10) Farrow, J.B. et Swift, J.D.; Agitation and residence time effects during the flocculation of mineral suspensions, Fourth International Alumina Quality, Darwin, 7 juin, 1996, p. 355-363.
- (11) Gagnon, M.J., Simard, G., Charette, A., Brassard, M., Veillette, R. et Péloquin, G.; Shear-induced flocculation and break up of red mud aggregates, Light Metals, 2001, p. 59-63.
- (12) Gagnon, M.J., Leclerc, A., Simard, G. et Péloquin G.; A fractal model for the aggregate size distributions generated during red mud flocculation, Light Metals, 2003, p. 105-111.
- (13) Gagnon, M.J., Simard, G., Charette, A. et Péloquin, G.; Characterization of red mud aggregate populations generated under shear conditions, Light Metals Métaux legers, Proceeding of the International Symposium on Light Metals, Toronto, Ontario, Canada June 2001, p. 155-166.

- (14) Gagnon, M.J., Simard, G., Normandin, M. et Pélquin, G; Behavior of red mud agglomerated with various flocculants under shear conditions, Light Metals, 2002, p. 107-114.
- (15) Gagnon, M.J., Simard G. et Leclerc A.; Effect of flocculating agent dosages on the performance of red mud flocculation under shear conditions; Light Metal Métaux Légers, Proceeding of the International Symposium on Light Metals, Montréal, Québec, Canada, 2002, p. 13-24.
- (16) Larouche, Daniel; Ingénierie de l'Aluminium, Département d'Ingénierie 6GEN654 UQAC, 2002, Chapitre II, p. 9-18.
- (17) Site Internet ; <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite>
- (18) Ostap, Steve; Chemistry of Low Temperature Digestion in the Bayer Process, accession number CRDA106809, 2000, 28 pages.
- (19) Introduction au Procédé Bayer, Alcan, p. 42-172.
- (20) Rushton, A., Ward, A.S. et Holdich, R.G.; Solid-Liquid Filtration and Separation Technology, 2^e édition, Wiley-VCH, 2000 République fédérale d'Allemagne, p. 1-587.
- (21) Schweitzer, Philip A.; Handbook of separation techniques for chemical engineers, Third Edition, McGraw-Hill, 1996, p. 4-130 à 4-159.

- (22) Jorgensen, Sven Erik; Industrial waste water management, Elsevier scientific publishing company, 1979, 388 pages.
- (23) Tchobanoglous, George et Burton, Franklin L.; Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse, Third Edition, McGraw-Hill, 1991, p. 220-240.
- (24) Sundstrom, Donald W. and Klei, Herbert E.; Wastewater Treatment, Prentice-Hall, 1979, p. 187-208.
- (25) Svarovsky, Ladislav; Solid-Liquid-Separation, Fourth Edition, Butterworth Heinemann, 2000, p. 104-128.
- (26) Momento technique de l'eau, 9^{ème} édition, Tome 1, Copyright par Degremont, Paris, p. 1-271.
- (27) Edeline, F.; L'épuration physico-chimique des eaux, 2^{ème} édition, Cebedoc Editeur, Paris, 1992, 283 pages.
- (28) Schroeder, Edward, D.; Water and Wastewater treatment, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1977, p. 135-160.
- (29) Poirier, M.R.; Evaluation of flocculation and filtration procedures applied to WSRC sludge: A report from B. Yarar, Colorado School of Mines, 16 avril 2001.
- (30) Kirwan, Luke J., Fawell, Phillip D. et Bronswijk, Wilhelm Van; An in Situ FTIR-ATR Study of Polyacrylate Adsorbed onto Hematite at High pH and High Ionic Strength, Langmuir 2004, 20, p. 4093-4100.

- (31) Fawell, Phillip D., Kirwan, Luke J. et Bronswijk, Wilhelm Van; Adsorption of Polyacrylates on Hematite: In Situ Examination by FTIR-ATR at High and low pH, Proceedings of the 6 th international alumina quality wokshop, Brisbane, Australie, 8-13 septembre 2002, 8 pages.
- (32) Schramm, Gebhard; A Pratical Approach to Rheology and Rheometry, HAAKE, 1994, 300 pages.
- (33) Couaraze G. et Grossiord J.L.; Initiation à la Rhéologie, Lavoisier- Tec & Doc, deuxième édition, 1991, 272 pages.
- (34) White, Frank M.; Fluid mechanics, WCB McGraw-Hill, Fourth Edition, 1999, 826 pages.
- (35) Bird R. Byron, Stewart Warren E. and Lightfoot Edwin N.; Transport Phenomena, John Wiley and Sons Inc, 2002, 895 pages.
- (36) Hansen Arthur G.; Fluid Mechanics, John Wiley and Sons Inc, New-York, 1967, 531 pages.
- (37) Schlichting H. et Gersten K.; Boundary Layer Theory, Springer, 8th revised and enlarged edition, 1999, 800 pages.
- (38) Tennekes H., Lumley J.L.; A first Course in turbulence, The MIT Press, Cambridge, 1972, 300 pages.

- (39) Landau L.D., Lifshitz E.M.; Fluids Mechanics, Pergamon Press, Oxford, 1982, 536 pages.
- (40) Brodkey Robert S., Hershey Harry C.; Transport Phenomena a unified approach, McGraw-Hill, New-York, 1988, 847 pages.
- (41) Kataoka, Kunio; Taylor Vortices and instabilities in circular Couette flows, Chapitre 9, Volume 1, Department of Chemical Engineering, Japan, 1986, p. 236-272.
- (42) Darby, N.A., Newton, C.J. et Sharman, J.D.B.; Simulation of Bayer liquor pipeflows using a rotating cylinder electrode, Light Metal, 1999, p. 87-94.
- (43) Crumeyrolle Olivier, Latrache Noureddine, Ezersky Alexander and Mutabazi Innocent; Modes d'instabilités observés dans un écoulement de Taylor-Couette viscoélastique, Elsevier, Mécanique et Industries, Volume 4, 2003, p. 397-409.
- (44) Oles, V.; Shear induced aggregation and breakup of polystyrene latex particles, Journal of Colloid and Interface Science, 1992, Vol 154, No 2, p. 351-358.
- (45) Gregory, John; Flocculation in laminar tube flow, Journal of Engineering Science, Volume 36, No 11, 1981, p. 1789-1794.
- (46) Gregory, John; Laminar dispersion and the monitoring of flocculation process, Journal of Colloid and Interface Science, Volume 118, No 2, 1987, p. 398-409.

- (47) Swift, J.D., Simic, K., Johnston, R.R.M., Fawell, P.D. et Farrow, J.B.; A study of the polymer flocculation reaction in a linear pipe with a focused beam reflectance measurement probe, International Journal of Mineral Processing, Volume 73, 2004, p. 103-118.
- (48) Carissimi, E. et Rubio, J.; The flocs generator reactor-FGR: a new basis for flocculation and solid-liquid separation, International Journal of Mineral Processing, Volume 75, 2005, p. 237-247.
- (49) Gagnon, M.J.; Chimie analytique laboratoire, UQAC.
- (50) Normandin, M. et Bouchard, M.L.; Travail de recherche, Université du Québec à Chicoutimi, 2005, 30 pages.
- (51) Arryanto, Y. et Bark, L.S.; Improved and rapid method for the spectrofluorimetric determination of trace amounts of polyacrylamides in waters, Analyst, Volume 116, Novembre 1991, p. 1149-1153.

LISTE DES SYMBOLES

Lettres italiques

| | | |
|----------------------|---|--------------------------------|
| <i>A</i> | Aire projetée de la particule | m^2 |
| <i>b</i> | Indice d'écoulement | pas d'unité |
| <i>C</i> | Concentration des solides en fraction volumique | pas d'unité |
| <i>C_d</i> | Coefficient de traînée | pas d'unité |
| <i>cte</i> | Constante prenant la valeur de 4 ou 6 | pas d'unité |
| <i>d</i> | Diamètre de la particule | m |
| <i>De</i> | Nombre de Dean | pas d'unité |
| <i>F_b</i> | Force de flottabilité | N ou kgm/s^2 |
| <i>F_f</i> | Force de friction | N ou kgm/s^2 |
| <i>F_g</i> | Force gravitationnelle | N ou kgm/s^2 |
| <i>g</i> | Accélération gravitationnelle | $9,8 \text{ m/s}^2$ |
| <i>G</i> | Gradient de vitesse, taux de cisaillement ou taux de déformation | s^{-1} |
| <i>G_i</i> | Taux de déformation pour le cylindre intérieur | s^{-1} |
| <i>G_r</i> | Taux de déformation pour la position radiale r | s^{-1} |
| <i>h</i> | Hauteur (des cylindres coaxiaux ou entre deux plaques parallèles) | m |

| | | |
|----------------------|--|------------------------------------|
| <i>I</i> | Force ionique de la solution | mol/L |
| <i>k</i> | Constante de Boltzmann | 1.38×10^{-23} J/K |
| <i>K</i> | Indice de consistance | pas d'unité |
| <i>L</i> | Longueur de la conduite | m |
| <i>m</i> | Masse de la particule | kg |
| <i>me</i> | Mobilité électrophorétique | pas d'unité |
| <i>M_d</i> | Couple mesuré | N m |
| <i>n</i> | Concentration de particule | nombre de particule/m ³ |
| <i>nbt</i> | Nombre de rotation du cylindre par minute | min ⁻¹ |
| <i>p</i> | Pression | Pa ou N/m ² |
| <i>Q</i> | Débit volumique de l'écoulement | m ³ /s |
| <i>R</i> | Rayon de la conduite | m |
| Re | Nombre de Reynolds | pas d'unité |
| <i>r_i</i> | Rayon du cylindre interne | m |
| <i>r_o</i> | Rayon du cylindre externe | m |
| <i>r, z, θ</i> | Composantes du vecteur vitesse en coordonnées cylindriques | pas d'unité |
| <i>S</i> | Flux de particules | m/s |
| <i>t</i> | Temps | s |
| <i>T</i> | Température absolue | K |
| <i>Ta</i> | Nombre de Taylor | pas d'unité |
| <i>U</i> | Vitesse de sédimentation d'une couche de particule | m/s |
| <i>u, v, w</i> | Composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes | m/s |

| | | |
|---------------------|---|--------------|
| Vol | Volume de la particule | m^3 |
| v_o | Vitesse au centre de la conduite | m/s |
| v_r | Vitesse du fluide à la distance r de l'axe de la conduite | m/s |
| v_s | Vitesse de sédimentation de la particule | m/s |
| $v_{\theta_{\max}}$ | Vitesse du cylindre intérieur | m/s |
| V | Vitesse | m/s |

Lettres grecques

| | | |
|--------------------|---|---|
| α | Fraction des chocs efficace | pas d'unité |
| δ | Épaisseur de la double couche | m |
| ϵ | Constante diélectrique de la solution | pF/m |
| κ | Indice de courbure de la conduite torsadée | pas d'unité |
| ρ_{fluid} | Densité du fluide | kg/m ³ |
| $\rho_{particule}$ | Densité de la particule | kg/m ³ |
| μ | Viscosité dynamique du fluide | kg/m s |
| ν | Viscosité cinématique | m ² /s |
| τ | Contrainte de cisaillement (force/unité de surface) | kg/m s ² ou N/m ² |
| τ_r | Contrainte de cisaillement à la position radiale r | kg/m s ² ou N/m ² |
| τ_y | Contrainte d'écoulement | kg/m s ² ou N/m ² |
| Ω | Vitesse angulaire du cylindre mobile | rad/sec |
| ζ | Potentiel Zéta | mV |

ANNEXE A

RAPPELS MATHÉMATIQUES

A.1 Vitesse et accélération

La vitesse est un vecteur variant en fonction de la position dans l'espace et du temps.

Les trois composantes cartésiennes u , v et w sont des scalaires. Voici le vecteur vitesse :

$$V(x, y, z, t) = iu(x, y, z, t) + jv(x, y, z, t) + kw(x, y, z, t) \quad (\text{A-1})$$

Où i , j et k sont les trois vecteurs unitaires cartésiens.

L'accélération, quant à elle, est obtenue en effectuant la dérivée par rapport au temps du vecteur vitesse.

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) = \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V \quad (\text{A-2})$$

Locale Convective

Il est intéressant de mentionner que l'accélération est constituée de deux termes soit l'accélération locale et l'accélération convective. Le terme local disparaît lorsque l'écoulement est stable (indépendant du temps).

A.2 Vitesse angulaire

La vitesse angulaire est un paramètre qui entre dans la détermination des écoulements Couette. Elle est associée au rotationnel du vecteur vitesse. La Figure A.1 illustre la déformation d'un élément fluide.

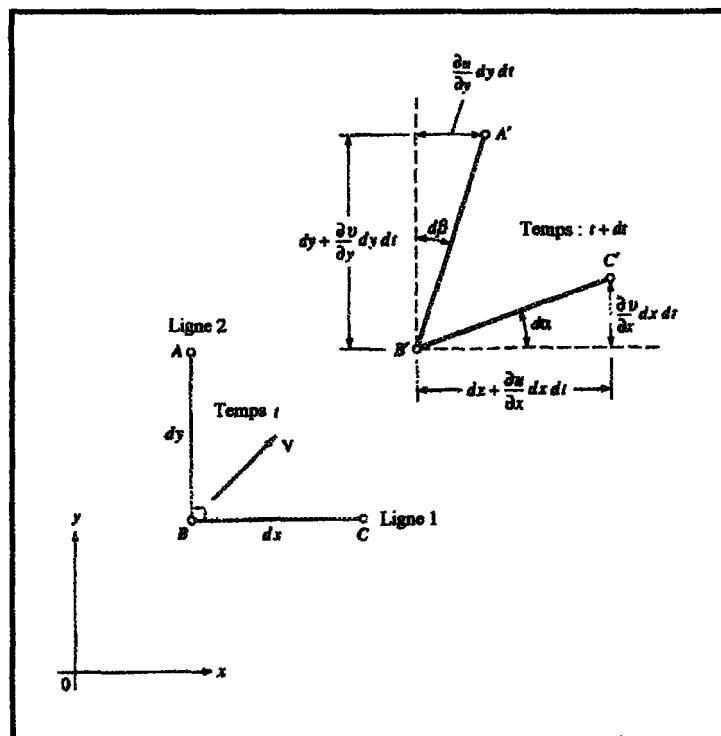


Figure A.1 - Déformation d'un élément fluide

Soit deux lignes fluides, initialement perpendiculaires et de mêmes longueurs au temps t , elles vont se déplacer et se déformer jusqu'au temps $t + dt$. À ce moment, elles possèdent différentes longueurs et ne sont plus perpendiculaires.

A.2.1 Rotationnel

Le rotationnel exprime le taux de changement angulaire d'un objet par rapport aux axes x , y et z . Il s'exprime sous forme d'un vecteur w et est perpendiculaire au vecteur vitesse.

$$w = iw_x + jw_y + kw_z \quad (\text{A-3})$$

$$w = \frac{1}{2}(\operatorname{curl} V) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (\text{A-4})$$

A.2.2 Vorticité

Soit la vitesse angulaire autour de l'axe z

$$w_z = \frac{1}{2} \left(\frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \right) \quad (\text{A-5})$$

En se référant à la Figure A.1 $d\alpha$ et $d\beta$ sont directement reliés à la dérivé de la vitesse dans un petit élément dt ;

$$d\alpha = \lim_{dt \rightarrow 0} \left[\tan^{-1} \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) dx dt}{dx + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx dt} \right] = \frac{\partial v}{\partial x} dt \quad (\text{A-6})$$

$$d\beta = \lim_{dt \rightarrow 0} \left[\tan^{-1} \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) dy dt}{dy + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) dy dt} \right] = \frac{\partial u}{\partial y} dt \quad (\text{A-7})$$

En combinant les trois précédentes équations on obtient ainsi ;

$$w_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{A-8})$$

De façon similaire on obtient;

$$w_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \text{et} \quad w_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (\text{A-9a et A-9b})$$

Conséquemment, la vorticité est une façon différente d'exprimer le rotationnel (équation (A-4)).

$$\xi = 2w = \operatorname{curl} V \quad (\text{A-10})$$

Cependant, puisque les écoulements Couette s'effectuent à l'intérieur de cylindres coaxiaux, il faut transformer les équations précédentes pour les transférer en coordonnées cylindriques. Ainsi;

Selon r

$$w_r = \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \quad (\text{A-11})$$

Selon θ

$$w_\theta = \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \quad (\text{A-12})$$

Selon z

$$w_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \quad (\text{A-13})$$

Pour obtenir la vitesse angulaire, il suffit d'utiliser la représentation matricielle suivante;

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-14})$$

Et les effets sur un vecteur r sont équivalents au produit vectoriel avec w ;

$$\Omega_r = w \times r \quad (\text{A-15})$$

A.3 Équation de continuité

L'équation de continuité est un autre principe utile dans l'analyse des écoulements Couette, l'équation de continuité. Cette équation stipule qu'il y a conservation de la masse d'un fluide en mouvement (dans le temps). Ainsi, pour une masse totale M contenue dans un volume;

$$M_V(t) = \int_V \rho dV \quad (\text{A-16})$$

Soit une approche lagrangienne où le volume se déplace dans le temps. Ce dernier change de forme mais conserve sa masse constante comme le démontre l'image suivante;

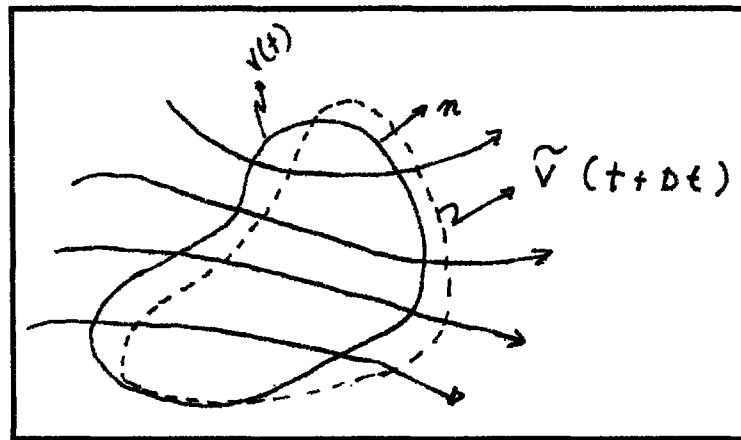


Figure A.2 - Variation d'un élément dans le temps

En analysant le taux de variation de la masse volumique, c'est-à-dire en appliquant une dérivée particulière à M_V ;

$$\frac{DM_V}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_V'(t + \Delta t) - M_V(t)}{\Delta t} = 0 \quad (A-17)$$

Où $M_V'(t + \Delta t) = M_V(t + \Delta t) + \dot{M}_s \Delta t$, autrement dit, la masse volumique pour un temps donné égale la valeur de cette masse plus le flux de matière en ce point.

$$\frac{DM_V}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_V(t + \Delta t) - M_V(t)}{\Delta t} + \dot{M}_s(t) = 0 \quad (A-18)$$

et

$$\frac{DM_V}{Dt} = \frac{\partial M_V}{\partial t} + \dot{M}_s(t) = 0 \quad (A-19)$$

Sous forme intégrale l'équation (A-19) devient;

$$\frac{DM_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S \rho v n dS = 0 \quad (A-20)$$

En appliquant le théorème de Gauss, l'équation de continuité sous forme différentielle devient;

$$\frac{DM_v}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (\text{A-21})$$

A.3.1 Équations de continuité en coordonnées cylindriques

Pour le traitement des écoulements Couette dans des cylindres coaxiaux, l'équation de continuité doit être adaptée pour les coordonnées cylindriques. Soit un point P, à une distance Z le long de l'axe, à une distance radiale r de cet axe et avec un angle de rotation θ . Les trois composantes de la vitesse sont une vitesse axiale v_z , une vitesse radiale v_r et une vitesse de rotation v_θ laquelle est positive dans le sens antihoraire.

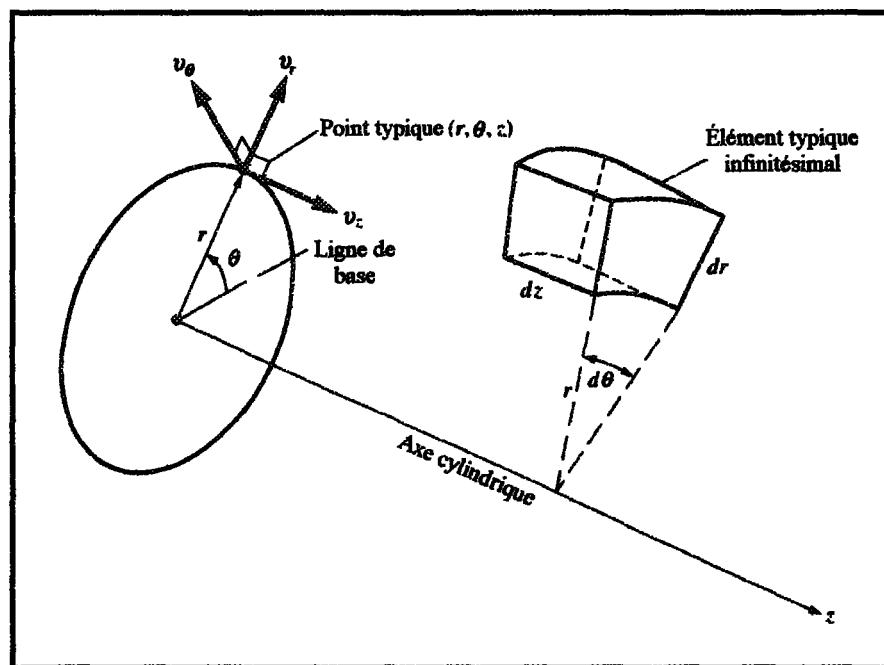


Figure A.3 - Visualisation pour la transformation en coordonnées cylindriques

En effectuant la transformation des coordonnées comme suit ;

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad \text{et} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad \text{et} \quad z = z \quad (\text{A-22a, A-22b et A-22c})$$

L'équation de continuité (A-21) devient ;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (\text{A-23})$$

Pour un fluide incompressible, il est possible de simplifier cette équation en supposant que les changements de densité sont négligeables d'où $\partial \rho / \partial t = 0$.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = 0 \quad (\text{A-24})$$

A.4 Équation de quantité de mouvement

Un autre principe important dans la compréhension des écoulements Couette est la conservation de la quantité de mouvement. Ce principe a pour fondement la seconde loi de Newton sur le mouvement qui stipule que le taux de variation de la quantité de mouvement est la somme des forces de corps et des forces de surface. Ainsi, selon la mécanique classique, la quantité de mouvement (I) se définit comme suit ;

$$I(t) = \sum m v \quad (\text{A-25})$$

En se servant de l'approche lagrangienne sur un fluide continu, la quantité de mouvement devient ;

$$I_v(t) = \int_V \rho v dV \quad (\text{A-26})$$

En appliquant ce principe sur un élément de volume ;

$$\frac{DI_V}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{I_V'(t + \Delta t) - I_V(t)}{\Delta t} = \sum \text{Forces} \quad (\text{A-27})$$

En intégrant, l'équation (A-27) devient;

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} dV + \int_S (\rho v \cdot n) v dS = \sum \text{Forces} \quad (\text{A-28})$$

Puisqu'un élément de volume possède trois dimensions, il faut donc adapter l'équation précédente pour les coordonnées cartésiennes en x , y et z .

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} dV + \int_S (\rho v \cdot n) u dS = (\sum \text{Forces})_x \quad (\text{A-29})$$

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} dV + \int_S (\rho v \cdot n) v dS = (\sum \text{Forces})_y \quad (\text{A-30})$$

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} dV + \int_S (\rho v \cdot n) w dS = (\sum \text{Forces})_z \quad (\text{A-31})$$

Le deuxième terme, des trois dernières équations, peut être transformé directement grâce au théorème de Gauss (transformation d'une intégrale de surface en intégrale volumique);

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} dV + \int_V \nabla(\rho u) \cdot \vec{v} dV = (\sum \text{Forces})_x \quad (\text{A-32})$$

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} dV + \int_V \nabla(\rho v) \cdot \vec{v} dV = (\sum \text{Forces})_y \quad (\text{A-33})$$

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} dV + \int_V \nabla(\rho w) \cdot \vec{v} dV = (\Sigma Forces)_z \quad (A-34)$$

De façon générale;

$$\frac{DI_V}{Dt} = \int_V \frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} dV + \int_V \nabla(\rho \vec{v}) dV = (\Sigma Forces) \quad (A-35)$$

$$\frac{DI_V}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v}) = (\Sigma Forces) / volume \quad (A-36)$$

Il y a alors apparition d'un tenseur dyadique qui se définit comme suit;

$$\nabla(\rho \vec{v}) = \vec{v} \nabla \rho \vec{v} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \quad (A-37)$$

$$\frac{DI_V}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v}) = \vec{v} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} \right] + \rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \right] = (\Sigma Forces) / volume \quad (A-38)$$

Le premier terme représente l'équation de continuité et la totalité de l'expression peut être représentée par $\rho(Dv/Dt)$ qui est la dérivé particulière sous forme conservatrice. Maintenant, il reste à déterminer les forces qui sont appliquées en x , y et z . Cependant, pour simplifier les calculs, le liquide utilisé est de nature incompressible (liqueur Bayer) ce qui permet de retirer le terme de continuité puisqu'il devient nul. L'équation de la quantité de mouvement devient donc;

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = (\Sigma Forces) / volume \quad (A-40)$$

Selon l'axe des x (similaire pour y et z)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left[u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} \right] = (\Sigma Forces)_x / V \quad (A-41)$$

A.4.1 Détermination des forces de surface et de corps

Les différentes forces qui entre en action dans l'équation de la quantité de mouvement (ou l'équation de Navier-Stokes) peuvent être déterminées. Sur un élément de volume, plusieurs types de force peuvent être à l'action tels que la force de gravité, de Coriolis, centrifuge et bien d'autres. Soit la force de gravité;

$$F_g = \vec{m}g = \int_V \rho \vec{g} dV \quad (A-42)$$

Chaque surface de l'élément de volume subit différentes contraintes tangentielles et normales tel qu'illustré sur la Figure A.4;

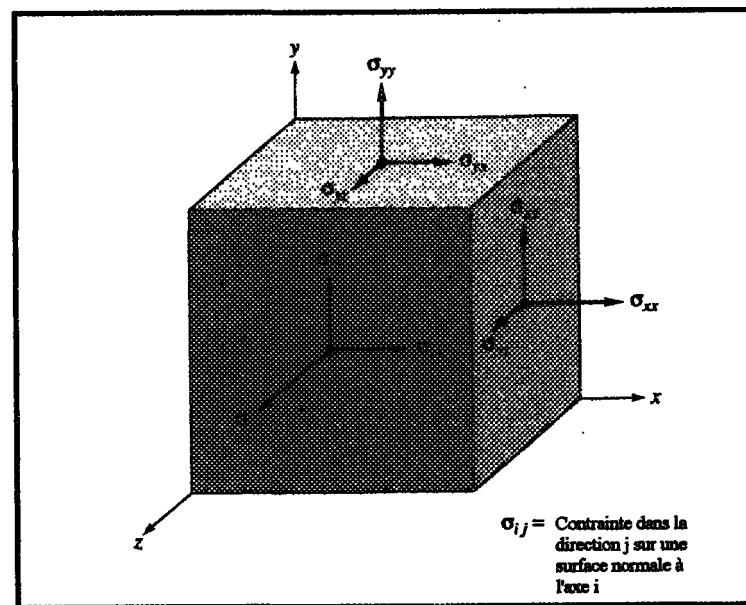


Figure A.4 - Notation pour les contraintes

Ces différentes contraintes sont représentées par la somme de pressions hydrostatiques et de contraintes visqueuses sur l'élément.

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} -p + \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & -p + \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & -p + \tau_{zz} \end{vmatrix}$$

Figure A.5 - Tenseur des contraintes

Plusieurs simplifications peuvent être faites pour obtenir une expression générale des forces de surface de la forme suivante;

$$\rho g - \nabla p + \nabla \tau_y = \rho \frac{dV}{dt} \quad (A-43)$$

$$\text{Où } \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \quad (A-44)$$

Cette équation peut être adaptée pour chacune des composantes x , y et z .

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (A-45)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (A-46)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (A-47)$$

Pour un fluide newtonien et incompressible (liqueur Bayer), certaines simplifications peuvent être émises puisque les contraintes visqueuses sont proportionnelles au taux de déformation et au coefficient de viscosité. Ainsi, l'équation générale devient de la forme suivante;

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (\text{A-48})$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} \quad (\text{A-49})$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt} \quad (\text{A-50})$$

Puisque;

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (\text{A-51a, b, c, d, e et f})$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

A.4.2 Équation de quantité de mouvement en coordonnées cylindriques

Encore un fois, il est important de transférer les équations en coordonnées cylindriques pour les adapter aux écoulements Couette dans des cylindres coaxiaux. Le principe est similaire à celui de l'équation de continuité (section A.3.1). Voici les équations déjà transformées en coordonnées cylindriques;

Selon r ;

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{1}{r} v_\theta^2 \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zr}) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right] + \rho g_r \quad (\text{A-52})$$

Selon θ ;

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_\theta v_r}{r} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} - \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta\theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{z\theta}) + \frac{\tau_\theta - \tau_{r\theta}}{r} \right] + \rho g_\theta \quad (\text{A-53})$$

Selon z ;

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta z}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zz}) \right] + \rho g_z \quad (\text{A-54})$$

En adaptant pour un fluide newtonien et incompressible, les équations (A-52, A-53 et A-54) deviennent;

Selon r ;

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + (V \cdot \nabla) v_r - \frac{1}{r} v_\theta^2 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \nu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (\text{A-55})$$

Selon θ ;

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + (V \cdot \nabla) v_\theta + \frac{1}{r} v_r v_\theta = - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + g_\theta + \nu \left(\nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \quad (\text{A-56})$$

Selon z ;

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (V \cdot \nabla) v_z = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \nabla^2 v_z \quad (\text{A-57})$$

ANNEXE B

PRÉPARATION DES SOLUTIONS

B.1 Préparation de la liqueur Bayer

La méthode de préparation de la liqueur Bayer est importante puisque la liqueur doit posséder la même turbidité initiale à chaque expérimentation (1 essai nécessite 110 L de liqueur Bayer). La liqueur Bayer est préparée dans 4 réservoirs de 460 L. Chaque réservoir est préalablement rempli d'eau (environ 230 L). A chacun des réservoirs, une quantité donnée de liqueur mère est ajoutée afin d'obtenir une liqueur Bayer d'environ 15 g/L de caustique. La quantité utilisée varie en fonction de la concentration de la liqueur mère. Ainsi pour une liqueur de 220 g/L, environ 35 L sont ajoutés dans chacun des réservoirs. Une quantité de carbonate de sodium est également ajoutée (environ 6 kg / réservoir pour une liqueur mère de 220 g/L). De l'eau est ensuite ajoutée pour remplir complètement les réservoirs. Le contenu de chacun des réservoirs est mélangé sur une période de 5 heures à l'aide d'une pompe. Un temps de repos de quelques jours (environ 4 jours) est nécessaire pour atteindre la turbidité minimale du réservoir (environ 6 NTU ou ≈ 2 mg/L). La liqueur est ensuite analysée pour confirmer la concentration en caustique et en carbonate. Si nécessaire la concentration peut être réajustée.

B.1.1 Utilisation de la liqueur Bayer

Puisque la quantité de liqueur est importante pour chacune des expériences, il est nécessaire d'établir une bonne gestion de son utilisation. En effet, chacun des réservoirs permet d'effectuer 4 essais (1 semaine d'expérimentation). Après chaque essai, la liqueur est recyclée dans des contenants puis retournée dans le réservoir vide. Il n'est pas adéquat d'utiliser immédiatement cette liqueur puisque sa concentration en matières particulières ne correspond pas à celle désirée ($> 2 \text{ mg/L}$). Il est donc important de laisser reposer la liqueur environ 2 semaines pour permettre aux particules en suspension de décanter dans le fond du réservoir. Mentionnons que le réservoir une fois vide est nettoyé afin d'enlever les résidus accumulés au fond.

B.2 Préparation de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer

Dans un réservoir d'une capacité de 87 L ($\approx 0,53 \text{ m}$ de hauteur et $\approx 0,45 \text{ m}$ de diamètre) ajouter environ 70 L de liqueur Bayer (15 g/L de caustique et 15 g/L de carbonate de sodium). Agiter la solution avec un agitateur électrique à écoulement axial (Lightnin EV1P25M). Introduire dans le vortex environ 3L de boues rouges humides et agiter la suspension pendant environ 30 minutes. Effectuer un test de fraction solide pour vérifier la quantité de particules solides en suspension qui devrait être d'environ 50 g/L. Si cette dernière n'est pas adéquate, réajuster la suspension de boues rouges en effectuant de nouveau les étapes précédentes.

B.3 Préparation des solutions de polymère

La méthode utilisée⁽¹⁾ pour la préparation des solutions de polymère a été développée au cours d'une recherche antérieure et a démontrée un bon degré de reproductibilité pour des essais de flocculation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. Préparer une solution de NaOH 10 g/L en dissolvant $20,0 \pm 0,1$ g de NaOH dans un volumétrique de 2 L et compléter jusqu'à la jauge avec de l'eau distillée ; puis mélanger. Peser exactement $99,50 \pm 0,01$ g de cette solution dans un bêcher de 250 mL. Peser $0,50 \pm 0,01$ g de flocculant. Placer l'agitateur mécanique (impeller) dans le bêcher, agiter fortement la solution de NaOH (environ 300 rpm) et ajouter le flocculant graduellement. Laisser agiter pour une période d'environ 5 minutes. Si le flocculant est en poudre, prendre soin de ne pas laisser tomber de morceaux de flocculant dans la solution parce que cela causerait la formation de grumeaux de flocculant non dissous. Laisser agiter pendant une période de 8 heures sur une plaque agitatrice dans un contenant opaque (Nalgène 500 mL). La solution est ensuite entreposée dans un endroit frais pendant ~ 72 h pour ensuite être utilisée pour des essais de flocculation. La solution est utilisée pour une période de six jours et est ensuite renouvelée.