



Université du Québec à Chicoutimi

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

par

Mélanie Normandin

Étude sur la clarification d'une suspension de boue rouge et de liqueur Bayer par floculation

08 mai 05



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

Dans le cadre de la maîtrise en Ingénierie de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), ce mémoire présente une étude portant sur les principaux paramètres susceptibles d'améliorer la clarté d'une suspension de boue rouge par floculation. Ce travail de recherche a été réalisé en collaboration avec le Groupe de Recherche Universitaire en Séparation Solide Liquide (GRUSSL) de l'UQAC et le Centre de Recherche et de Développement Arvida (CRDA) du groupe Alcan. Tous les essais de floculation ont été effectués suivant la méthodologie du test du cylindre. Cette méthodologie permet d'estimer l'efficacité de l'étape de décantation du procédé Bayer. Trois mesures importantes sont déterminées par cette méthodologie : la vitesse de sédimentation, la clarté du liquide surnageant (exprimé en mg/L) et le pourcentage de solides dans le sédiment final. Évidemment, des corrélations sont observées entre les résultats obtenus par ce test et ceux obtenus pour les décanteurs en usine. L'objectif principal de ce projet était de réduire la quantité de matières particulaires en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à ceux retrouvés actuellement en usine. Pour arriver à réaliser une étude comparative sur la clarté d'une surverse, la méthodologie du test du cylindre a été optimisée afin de réduire la variabilité des mesures de vitesse de décantation pour des essais effectués dans les mêmes conditions expérimentales. L'optimisation de la méthodologie du test du cylindre a permis de réduire considérablement la variabilité des mesures de vitesse. Des écarts de 5% et moins sont maintenant obtenus pour des vitesses de sédimentation entre un polymère d'essai et un polymère témoin. Les essais de clarté ont été réalisés en deux parties : une première partie des essais a été effectuée aux conditions d'opération retrouvées en usine, au niveau des décanteurs secondaires ou laveurs, et la seconde partie des essais a été réalisée aux conditions d'opération retrouvées en usine, dans les décanteurs à haut rendement (DHR). Les variables à l'étude sont le type d'agents de floculation, le dosage et la séquence

d'injection des polymères, la concentration en matières particulaires de la suspension et la concentration des solutions de polymère. Au niveau des décanteurs secondaires, l'augmentation de la concentration de la solution de polymère ainsi que de la concentration en matières particulaires de la suspension ont permis de mettre en évidence une amélioration notable de la clarté d'une surverse. La double addition de polymère s'est révélée très efficace puisqu'elle a permis d'atteindre l'objectif principal. Cette addition a permis de réduire de moitié la clarté d'une surverse. Toutefois, l'amélioration la plus significative de la clarté a été obtenue avec la triple addition de polymère. Le meilleur résultat obtenu pour la clarté est de 2,2 mg/L. En usine, les mesures de clarté se situent généralement entre 150 et 200 mg/L avant l'étape de filtration du procédé. Après l'étape de filtration en usine, cette mesure est d'environ 10 mg/L. La triple addition de polymère est donc très efficace pour réduire la clarté d'une surverse. Au niveau des décanteurs à haut rendement, l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension a également permis de mettre en évidence une amélioration significative de la clarté de la surverse. Pour cette partie des expérimentations, l'amélioration la plus notable de la clarté d'une surverse a également été obtenue avec la triple addition de polymère. Le meilleur résultat obtenu pour la clarté est de 11,6 mg/L. La triple addition de polymère est par conséquent très efficace, à deux différentes conditions d'opération, puisqu'elle permet d'atteindre un niveau de clarté équivalent ou inférieur à ceux obtenus en usine après l'étape de filtration dans le procédé Bayer.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE I..... | 1 |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1.1. <i>Le projet</i> | 1 |
| 1.2. <i>Objectifs</i> | 4 |
| 1.3. <i>Travaux antérieurs et aspects originaux de la recherche</i> | 5 |
| CHAPITRE 2 | 10 |
| THÉORIE | 10 |
| 2.1. <i>Le procédé Bayer</i> | 10 |
| 2.1.1. <i>Broyage de la bauxite</i> | 10 |
| 2.1.2. <i>Mélange</i> | 11 |
| 2.1.3. <i>Digestion</i> | 12 |
| 2.1.4. <i>Séparation solide-liquide</i> | 14 |
| 2.1.5. <i>Traitement des boues rouges</i> | 15 |
| 2.1.6. <i>Filtration</i> | 15 |
| 2.1.7. <i>Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium</i> | 16 |
| 2.1.8. <i>Calcination et traitement de l'hydrate</i> | 19 |
| 2.2. <i>Les procédés de séparation solide-liquide</i> | 20 |
| 2.2.1. <i>Sédimentation des suspensions diluées et concentrées</i> | 20 |
| 2.2.1.1. <i>Sédimentation diluée</i> | 20 |

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------|
| 2.2.1.2. | <i>Sédimentation retardée</i> | 25 |
| 2.2.1.2.1. | <i>Sédimentation en fournée : La théorie de Kynch</i> | 26 |
| 2.2.1.2.2. | <i>L'agitation et les canaux durant la sédimentation</i> | 28 |
| 2.2.2. | <i>Les techniques de traitement préliminaire</i> | 29 |
| 2.2.2.1. | <i>La coagulation et la floculation</i> | 30 |
| 2.2.2.1.1. | <i>Stabilité des suspensions colloïdales</i> | 30 |
| 2.2.2.1.2. | <i>Théorie de la double couche</i> | 34 |
| 2.2.2.1.3. | <i>Le potentiel Zéta</i> | 35 |
| 2.2.2.1.4. | <i>Double couche et potentiel Zéta</i> | 36 |
| 2.2.2.1.5. | <i>La coagulation</i> | 38 |
| 2.2.2.1.6. | <i>La floculation</i> | 40 |
| CHAPITRE 3 | | 44 |
| MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE | | 44 |
| 3.1. | <i>Méthodologie du test de sédimentation des boues rouges</i> | 45 |
| 3.1.1. | <i>Optimisation du test de sédimentation des boues rouges</i> | 46 |
| 3.1.2. | <i>Mesures et paramètres</i> | 56 |
| CHAPITRE 4 | | 60 |
| RÉSULTATS ET DISCUSSION | | 60 |
| 4.1. | <i>Décanteurs secondaires (laveurs)</i> | 61 |
| 4.1.1. | <i>Concentration de l'agent de floculation</i> | 62 |
| 4.1.2. | <i>Double addition d'un mélange de polymère</i> | 68 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 Copolymère contenant les unités répétitives d'acrylamide et d'acrylate de sodium | 6 |
| Figure 1.2 Schématisation de l'effet du pH sur la configuration des polymères en solution..... | 7 |
| Figure 2.1 Schéma typique d'une unité de broyage | 11 |
| Figure 2.2 Schéma de l'étape de digestion | 12 |
| Figure 2.3 Décantation des solides insolubles | 14 |
| Figure 2.4 Étapes de filtration | 16 |
| Figure 2.5 Schéma détaillé de l'étape de précipitation..... | 18 |
| Figure 2.6 Courbe de sédimentation en fournée..... | 27 |
| Figure 2.7 Stabilité d'une suspension colloïdale | 33 |
| Figure 2.8 Théorie de la double couche..... | 34 |
| Figure 2.9 Schématisation de la double couche | 37 |
| Figure 2.10 Schématisation des différentes énergies de la double couche | 38 |
| Figure 2.11 Courbes d'énergie potentielle | 39 |
| Figure 2.12 Le modèle de floculation | 41 |
| Figure 3.1 Vitesses de sédimentation retardée obtenues pour dix essais répétitifs et trois agents de floculation différents en utilisant la méthodologie initiale du test du cylindre | 47 |
| Figure 3.2 Dosage de l'agent floculant nécessaire pour obtenir une vitesse de sédimentation retardée de ~ 15 m/h pour une période de cinq jours..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.3 Temps d'écoulement (viscosités) pour trois agents de floculation différents à 0.01 % p/p préparés à partir de la méthode initiale de préparation des solutions de polymère, sur une période de cinq jours..... | 49 |
| Figure 3.4 Temps d'écoulement (viscosités) pour trois différents agents de floculation à 0.01 % p/p préparés à partir la méthode révisée de préparation des solutions de polymère, sur une période de cinq jours..... | 50 |
| Figure 3.5 Mécanisme général du changement dans la configuration d'une solution de polymère.... | 51 |
| Figure 3.6 Concentration en matières particulaires de la boue retrouvée dans chaque cylindre en utilisant la méthode initiale et révisée de préparation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer | 53 |
| Figure 3.7 Vitesses de sédimentation retardée obtenues pour dix essais répétitifs et trois agents de floculation différents en utilisant la méthodologie révisée du test du cylindre..... | 55 |
| Figure 4.1 Turbidité moyenne en fonction de la concentration moyenne en matières particulaires de la surverse..... | 62 |
| Figure 4.2 Déviations standards calculées des vitesses de sédimentation retardée obtenues pour une série de dix essais (avec trois polymères) en fonction de la concentration du polymère | 64 |
| Figure 4.3 Turbidité de la surverse en fonction de la concentration du polymère | 65 |
| Figure 4.4 Filtration relative de la surverse en fonction de la concentration du polymère | 66 |
| Figure 4.5 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction de la concentration du polymère | 67 |
| Figure 4.6 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange | 69 |

| | |
|--|----|
| Figure 4.7 Filtration relative de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange | 70 |
| Figure 4.8 Concentration moyenne de matières particulaires du sédiment en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange | 71 |
| Figure 4.9 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange | 74 |
| Figure 4.10 Filtration relative de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange | 75 |
| Figure 4.11 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange | 76 |
| Figure 4.12 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 79 |
| Figure 4.13 Filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 80 |
| Figure 4.14 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 81 |
| Figure 4.15 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 84 |
| Figure 4.16 Filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 85 |
| Figure 4.17 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 86 |
| Figure 4.18 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 91 |
| Figure 4.19 Filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 92 |
| Figure 4.20 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.21 Vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue | 96 |
| Figure 4.22 Concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue..... | 97 |
| Figure 4.23 Turbidité moyenne en fonction de la concentration moyenne de matières particulaires de la surverse..... | 99 |
| Figure 4.24 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 100 |
| Figure 4.25 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 101 |
| Figure 4.26 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 103 |
| Figure 4.27 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 104 |
| Figure 4.28 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 106 |
| Figure 4.29 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 107 |
| Figure 4.30 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 109 |
| Figure 4.31 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 110 |
| Figure 4.32 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 112 |
| Figure 4.33 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 113 |
| Figure 4.34 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation | 115 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.35 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation..... | 116 |
| Figure 4.36 Vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue | 119 |
| Figure 4.37 Concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue..... | 120 |
| Figure 4.38 Vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue | 121 |
| Figure 4.39 Concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue..... | 122 |

LISTE DES SYMBOLES

Lettres italiques

| | | |
|-------|--|--|
| A_p | Aire projetée d'une particule | m^2 |
| C | Concentration en matières particulaires par fraction de volume | — |
| C_D | Coefficient de traînée | — |
| g | Constante gravitationnelle | $m \cdot s^{-2}$ |
| G | Flux de particules | $m \cdot s^{-1}$ |
| h | Hauteur | m |
| K_B | Constante de Boltzmann | $1.3807 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ |
| Me | Mobilité électrophorétique | — |
| N_0 | Nombre initial de particules | m^{-3} |
| Re | Nombre de Reynolds | — |
| t | Temps | s |
| T | Température | K |
| u | Vitesse relative de la particule | $m \cdot s^{-1}$ |
| u_t | Vitesse de sédimentation terminale | $m \cdot s^{-1}$ |
| U | Vitesse de sédimentation | $m \cdot s^{-1}$ |
| x | Diamètre de la particule | m |
| Z | Potentiel zéta | mV |

Lettres grecques

| | | |
|---------------|----------------------------|--------------------|
| μ | Viscosité du liquide | Pa s |
| ρ | Densité du liquide | kg m ⁻³ |
| ρ_s | Densité du solide | kg m ⁻³ |
| τ | Contrainte de cisaillement | N m ⁻² |
| ε | Constante diélectrique | pF m ⁻¹ |
| η | Viscosité dynamique | Pa s |

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Le projet

L'industrie de l'aluminium (ALCAN) utilise la bauxite comme source d'alumine pour la fabrication du métal. L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer. La première étape de ce procédé est le broyage du minerai. La seconde étape est le mélange de la bauxite broyée à la liqueur Bayer usée à laquelle est additionnée de l'hydroxyde de sodium. Le tri-hydrate d'alumine présent dans la bauxite est soluble dans une solution aqueuse de NaOH ce qui permet de l'isoler des autres composants du minerai. Comme le minerai est constitué de différents matériaux (oxydes de titane, oxydes de fer, sable, etc...), il faut les retirer de la suspension afin de produire de l'alumine d'une grande pureté. Le moyen le plus simple d'éliminer ces substances particulières de la liqueur est une floculation suivie d'une décantation par gravité dans un décanteur. La liqueur surageante contenant l'aluminate de sodium est recueillie à la surverse des décanteurs tandis que les matières particulières sont éliminées sous la forme d'une boue rouge épaisse au niveau de la souverse. Cette boue est ensuite disposée dans des sites prévus à cette fin. Le surageant est par la suite filtré afin d'en retirer les particules en suspension qui n'ont pu être floculées lors de l'étape de floculation.

L'aluminate de sodium ($\text{NaAl}(\text{OH})_4$) dissout dans la liqueur mère est ensuite précipité pour produire l'hydrate d'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dont la forme cristalline est de type gibbsite. Finalement, l'alumine hydratée est calcinée afin d'éliminer l'eau pour produire l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), communément appelé alumine.

Une étape importante du procédé est l'élimination par décantation des résidus solides de la pulpe d'extraction contenant l'hydrate d'aluminium en solution. La décantation s'effectue en ajoutant des polymères qui ont pour fonction d'agglomérer les particules solides sous la forme de flocons, et ainsi, augmenter la vitesse de sédimentation. Conséquemment, elle permet d'obtenir un surnageant contenant relativement peu de matières particulaires. La floculation est donc un processus très important pour l'industrie du traitement des minerais. Elle facilite l'élimination des matières en suspension et possiblement des colloïdes. Plusieurs facteurs influencent la floculation, tels que le type de polymère, le dosage des flocculants, la quantité de matières particulaires en suspension et les conditions d'opération.

La problématique principale, reliée à cette étape du procédé, est la difficulté à éliminer la totalité des matières particulaires en suspension dans la liqueur. Une floculation efficace permet d'obtenir un surnageant contenant relativement peu de matières en suspension. Lorsque la turbidité du surnageant est basse, peu de particules en suspension se retrouvent dans la surverse des décanteurs. Conséquemment, ceci facilite grandement la filtration subséquente de la liqueur qui est une des étapes critiques du procédé Bayer. En effet, l'étape de filtration est souvent problématique

pour l'industrie et ce, à plusieurs niveaux (ex : le colmatage des filtres entraîne un ralentissement de la production).

Une floculation efficace doit permettre de réduire la concentration en matières particulaires de la surverse et de réduire les problèmes apparaissant au niveau de la filtration, tout en réduisant les coûts associés à cette étape du procédé. Une augmentation de l'efficacité de la floculation permet également de réduire considérablement la consommation de flocculants synthétiques coûteux pour l'industrie. De plus, toute augmentation de la concentration en matières particulaires (% solides) à la sortie des décanteurs entraîne une diminution des pertes de caustique.

Considérant la baisse de la qualité de la bauxite (moins d'alumine disponible et plus de boue à disposer) et le désir d'accroître le niveau de production des usines d'alumine, il devient pertinent de considérer une amélioration éventuelle de cette étape du procédé Bayer.

Ce projet vise à étudier les variables susceptibles d'améliorer la clarté d'une suspension de boue rouge et de liqueur Bayer par floculation. Les variables considérées dans cette étude sont le type d'agents de floculation, le dosage et la séquence d'injection des flocculants, la concentration en matières particulaires de la suspension, la concentration des solutions de polymère et de la liqueur Bayer et la température de la suspension. L'une des difficultés majeures de ce projet est associée à la méthodologie expérimentale imposée pour réaliser cette étude. En effet, la méthodologie du test du cylindre s'est imposée d'elle-même pour plusieurs raisons majeures. Premièrement, le test du cylindre est une norme internationale en technique de séparation solide-liquide [1]. Trois mesures

importantes sont déterminées par cette méthodologie : la vitesse de sédimentation, la clarté du liquide surnageant et le pourcentage de solides dans le sédiment final. De plus, ce test empirique est utilisé par Alcan International afin de déterminer l'efficacité des flocculants utilisés lors de la décantation des boues rouges. Finalement, des corrélations sont observées entre les résultats obtenus par ce test et ceux obtenus pour les décanteurs en usine. Par contre, des essais préliminaires ont démontré un très bas niveau de reproductibilité de la méthodologie actuelle. Des variations importantes de vitesse de sédimentation, pour différents essais effectués dans les mêmes conditions expérimentales, permettent de constater le manque de reproductibilité de la méthode. La dispersion des résultats conduit à une évaluation imprécise de l'efficacité de la floculation. Par conséquent, la méthode du test du cylindre doit être révisée afin d'atteindre un niveau de reproductibilité adéquat et significatif dans les résultats expérimentaux.

1.2. Objectifs

1. Optimiser la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges (test du cylindre) afin de réduire la variabilité au niveau des mesures de vitesse de décantation pour une série d'essais effectuée dans des conditions expérimentales similaires.
2. Effectuer des essais de floculation dans un cylindre (test du cylindre) en contrôlant les différentes variables afin d'établir les conditions optimales de séparation solide-liquide.
3. Réduire la quantité de matières particulaires en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à ceux retrouvés actuellement en usine.

1.3. Travaux antérieurs et aspects originaux de la recherche

Historiquement, l'amidon a été utilisé comme floculant pour aider à la sédimentation de la boue rouge (pulpe) produite par le procédé Bayer. Dans le milieu des années 60, les polymères synthétiques ont été reconnus comme étant des floculants efficaces dans les procédés de séparation solide-liquide. Depuis les dix dernières années, l'utilisation des polymères synthétiques a gagné de l'importance dans l'industrie minière. Les polymères à hauts poids moléculaires, comparativement à l'amidon, permettent de réduire le dosage nécessaire pour flocculer une quantité équivalente de matières particulaires en suspension. Cette réduction du dosage est associée à la longueur de chaînes des polymères synthétiques et au mécanisme d'agrégation interparticulaire. Les hauts poids moléculaires retrouvés dans les polymères synthétiques ont donc permis de réduire les coûts associés à l'étape de séparation du procédé tout en améliorant l'efficacité de la floculation.

Les polymères anioniques sont généralement utilisés dans l'industrie utilisant la bauxite. Ces polymères sont habituellement des copolymères d'acrylamide et d'acide acrylique (acrylate de sodium) tels que présentés à la figure 1.1. Ces polymères sont légèrement anioniques, modérément anioniques, etc [2]. Les termes légèrement anioniques, modérément anionique, etc., font référence aux ratios relatifs d'acrylamide et d'acide acrylique dans le copolymère. La différence entre légèrement et modérément est arbitraire. Cependant, il est possible d'établir une échelle relative adéquate telle que présentée au tableau 1.1.

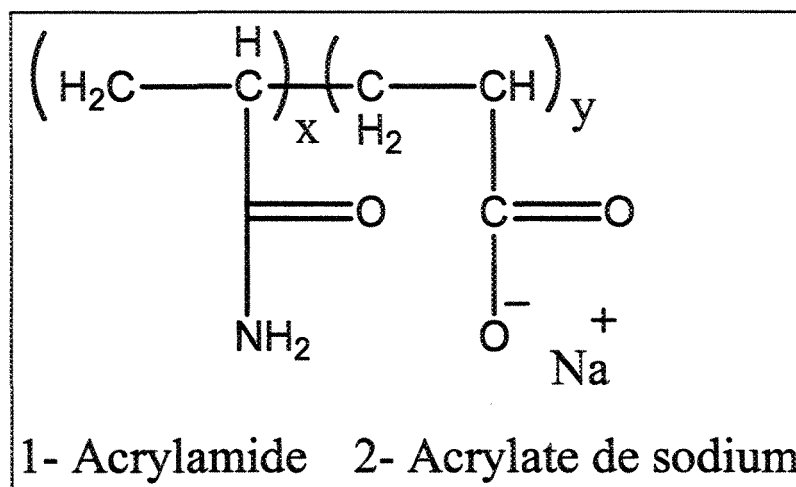


Figure 1.1 Copolymère contenant les unités répétitives d'acrylamide et d'acrylate de sodium

Tableau 1.1 Termes définissant la charge relative des polyacrylamides

| Charge relative | % d'acrylamide | % d'acide acrylique |
|-----------------------------|----------------|---------------------|
| Non ionique | 98-100 | 0-2 |
| Légèrement anionique | 80-98 | 2-20 |
| Modérément anionique | 60-80 | 20-40 |
| Modérée-hautement anionique | 30-60 | 40-70 |
| Hautement anionique | 0-30 | 70-100 |

Le rôle principal des groupements carboxylates est de favoriser le meilleur étalement possible de la chaîne de polymère en solution. Ceci permet d'obtenir plus facilement et efficacement un pontage interparticulaire. La Figure 1.2 montre l'effet du pH sur la configuration des polymères en solution.

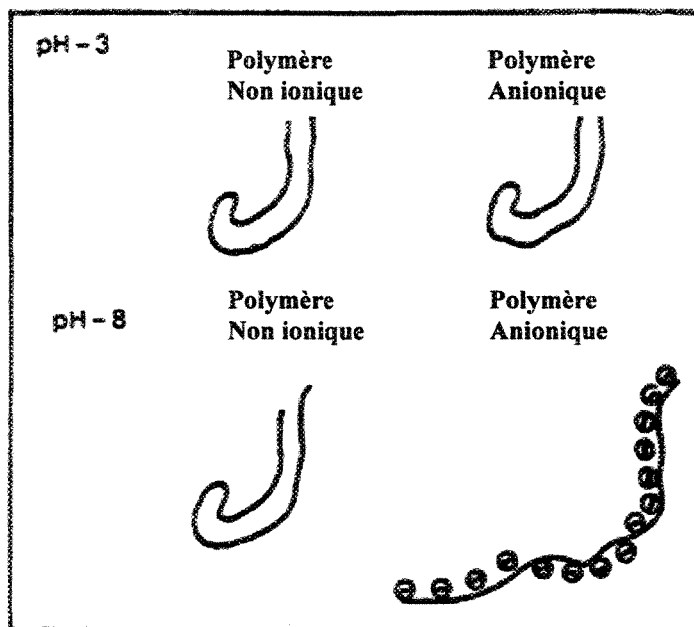


Figure 1.2 Schématisation de l'effet du pH sur la configuration des polymères en solution

À une valeur de pH élevé (pH = 8), l'acide acrylique est hydrolysé en acrylate, tandis qu'à bas pH (pH = 3), 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.

Différents mécanismes impliqués dans le processus de floculation ont été mis en évidence depuis plusieurs années. Puisque les polymères possèdent des mécanismes d'adsorption qui diffèrent en fonction des groupes fonctionnels qui y sont attachés [3], une combinaison de deux floculants entraîne une synergie dans la floculation. La floculation obtenue de l'addition de deux floculants produit un excellent pontage interparticulaire par les interactions polymère-polymère. La séquence d'addition des polymères a également un effet mesurable sur la floculation [4]. Cependant, les résultats des études portant sur la double injection de floculants sont fondés sur les mécanismes

contrôlant le processus de la floculation. Dans la présente étude, les résultats expérimentaux permettraient d'évaluer l'incidence de la double addition de polymères sur la clarté de la surverse.

Les polymères peuvent être utilisés seuls, en association avec d'autres polymères ou avec divers agents de floculation [5]. L'ajout de ces agents permet d'améliorer l'action du polymère et par conséquent la floculation ultérieure. En général, ce sont les polymères minéraux ou organiques, d'origine naturelle ou synthétique, qui favorisent la formation de floes. L'utilisation de ces agents permet d'améliorer l'efficacité de la floculation. Cependant, très peu d'études ont été réalisées sur l'utilisation de ces composés chimiques. Le couplage polymère-agent serait une avenue intéressante à développer pour la clarification d'une suspension de boue rouge et de la liqueur Bayer par floculation.

Une concentration élevée de particules en solution produit une plus grande fréquence de collisions due à une augmentation de la probabilité de rencontre entre les particules [6]. Ceci permet de croire que l'efficacité de la floculation est supérieure dans le cas des suspensions concentrées. De plus, le niveau d'agitation pourrait également être une variable importante pour l'efficacité de la floculation. Une agitation excessive favorise la rupture des flocons nouvellement formés, diminuant ainsi l'efficacité de la floculation. Une méthode d'agitation adéquate permet donc d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules en suspension et le polymère, et ainsi, d'améliorer la séparation solide-liquide.

Bajpai et Bajpai [7], en 1996, ont obtenu des résultats révélant que l'efficacité de la floculation augmente avec l'augmentation du dosage du polymère jusqu'à un dosage optimal. Ce dosage optimal est observé lorsqu'une turbidité minimale est obtenue lors d'une séparation solide-liquide par floculation. Lorsque le dosage optimal est observé, l'efficacité maximale de floculation est atteinte. La valeur optimale du dosage du polymère est définie [6] comme la dose de polymères à laquelle la surface de recouvrement des solides, par le polymère adsorbé, correspond à 50 % de la surface disponible. Le dosage est donc une variable importante à considérer pour atteindre l'efficacité maximale d'un flocculant.

CHAPITRE 2

THÉORIE

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 [8]. En seconde partie, les théories inhérentes à la séparation solide-liquide seront présentées.

2.1. Le procédé Bayer

L'aluminium est le métal le plus abondant sur terre. Évidemment, on le retrouve dans son état naturel sous la forme d'un oxyde (Al_2O_3) présent dans plusieurs minerais. La bauxite, qui contient une forte concentration d'oxyde d'aluminium, est le minerai le plus rentable à exploiter industriellement.

2.1.1. Broyage de la bauxite

Le minerai de bauxite est broyé puis tamisé. Les plus grosses particules sont écartées et retournées dans le circuit pour être à nouveau broyées. La figure 2.1 montre un schéma typique

d'une unité de broyage. Le broyage a pour but de faciliter la mise en solution de l'oxyde d'aluminium contenue dans la bauxite. Cette étape est nécessaire afin d'augmenter la surface de contact entre la liqueur et la bauxite et aussi d'améliorer le rendement de la digestion. Un broyage grossier signifie donc des pertes d'alumine dans le minerai. Par contre, un broyage trop fin signifie que trop d'énergie a été dépensée augmentant ainsi les coûts du procédé.

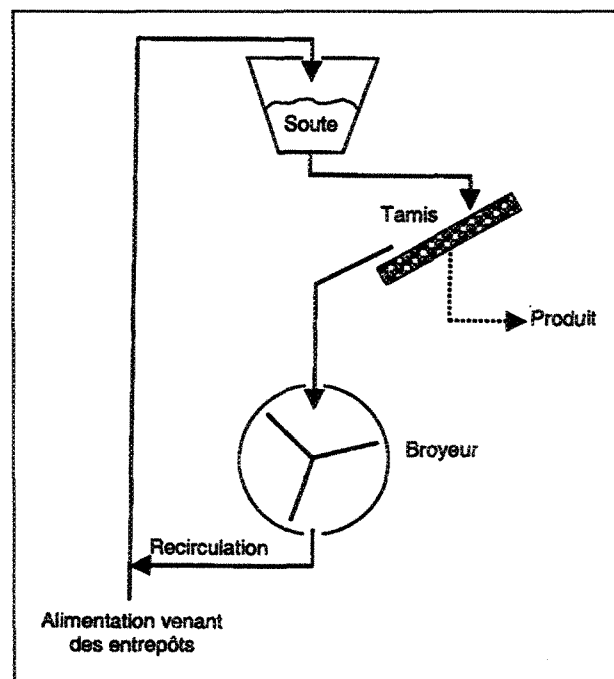


Figure 2.1 Schéma typique d'une unité de broyage

2.1.2. Mélange

Avant l'entrée de la bauxite broyée dans les autoclaves, de la chaux est ajoutée. Ce mélange est obtenu en versant de la chaux et de la bauxite dans une tour contenant de la liqueur usée provenant de l'étape de séparation solide-liquide. Cette liqueur est mélangée à la bauxite broyée pour produire une pulpe (bauxite-liqueur) contenant environ 50 % de matières solides. À la sortie de

cette tour, le mélange atteint une température d'environ 85 °C. L'addition de chaux à la bauxite est bénéfique pour deux raisons importantes : la première est de favoriser la précipitation du phosphate extrait de la bauxite; la seconde est de prévenir ou de réduire le taux de précipitation de l'hydrate d'alumine durant la séparation solide-liquide.

2.1.3. Digestion

La digestion est une étape critique du procédé Bayer. Son rôle est de solubiliser l'oxyde d'aluminium contenu dans la bauxite dans une solution de caustique. Le mélange contenant la bauxite broyée est transféré dans les autoclaves à 85 °C. De la liqueur Bayer usée est également injectée dans les autoclaves (~ 10 % de pulpe et 90 % de liqueur usée) en ayant été préalablement chauffé à 154 °C par de la vapeur vive via un échangeur de chaleur. La pression dans les autoclaves est généralement maintenue à 310 kPa et la température de la suspension à 143 °C. Cependant, elles peuvent varier en fonction de la composition de la bauxite. La figure 2.2 représente le schéma de digestion.

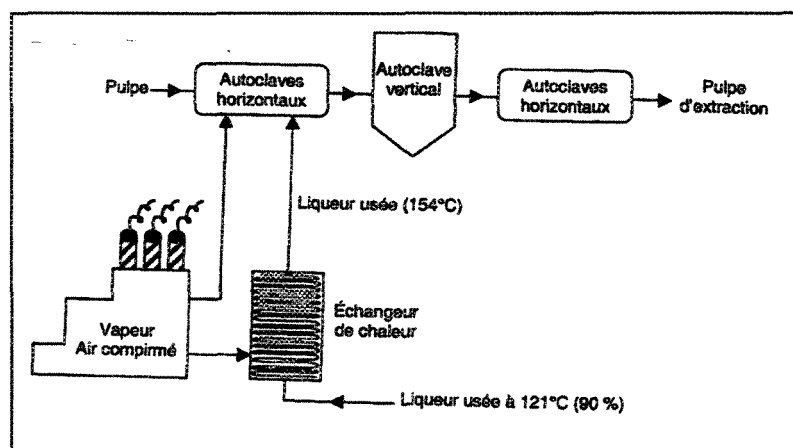


Figure 2.2 Schéma de l'étape de digestion

Les deux réactions chimiques importantes rencontrées lors de la digestion sont :

- L'oxyde d'aluminium présente dans la bauxite sous la forme de tri-hydrate d'alumine est dissous dans la liqueur :

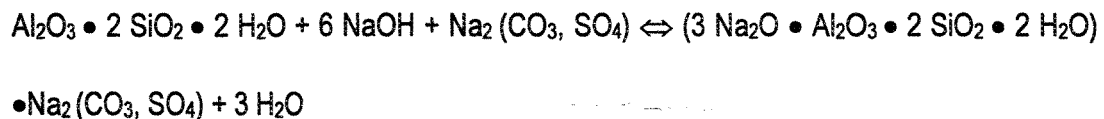
Tri-hydrate d'alumine + Caustique \Leftrightarrow Aluminate de sodium + Eau (en solution)



Cette réaction est réversible dépendamment des conditions de pression et de température. Les conditions utilisées lors de la digestion favorisent le déplacement de l'équilibre vers la droite et permettent la solubilisation de l'oxyde d'aluminium présente dans la bauxite. D'autres composés se solubilisent et sont à l'origine des impuretés de l'alumine issue du procédé Bayer.

- L'argile présente dans la bauxite sous forme de kaolinite est d'abord dissout puis réprécipité dans la liqueur pour former le produit de désilication (sodalite) :

Kaolinite + Caustique + Soda \Leftrightarrow Sodalite (solide) + Eau



La proportion de la silice (SiO_2), présente dans la bauxite, qui réagit avec le caustique, est appelée « silice réactive ». La sodalite solide formée par l'attaque de l'argile par le caustique est rejetée dans la boue lors de la séparation solide-liquide. Cela implique qu'une quantité de caustique est perdue pendant le procédé. Les experts estiment à une tonne de caustique perdue par tonne de silice

réactive présente dans la bauxite. Les coûts de production augmentent donc avec l'augmentation du contenu de silice réactive dans la bauxite. Pour obtenir une bonne désilication, la durée de digestion doit être de l'ordre d'une heure. Le produit de la digestion est appelé « pulpe d'extraction ».

2.1.4. Séparation solide-liquide

Avant d'être amenée au décanteur, la pulpe d'extraction doit passer par trois détendeurs qui abaissent successivement la pression de la pulpe de 140 kPa, à 70 kPa puis à 7 kPa. Cette détente produit une vapeur qui est réutilisée pour réchauffer la liqueur usée utilisée lors de l'étape de digestion. Par la suite, la pulpe d'extraction est dirigée vers les décanteurs pour séparer les deux phases de la pulpe. La séparation permet d'extraire les boues appauvries en alumine (soient le Fe_2O_3 , le SiO_2 , le TiO_2 , le $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, etc...) et de recueillir la liqueur mère contenant l'aluminate de sodium (NaAlO_2). La séparation des boues et de la liqueur s'effectue par une floculation suivie d'une décantation. La Figure 2.3 présente un schéma de l'étape de séparation solide-liquide.

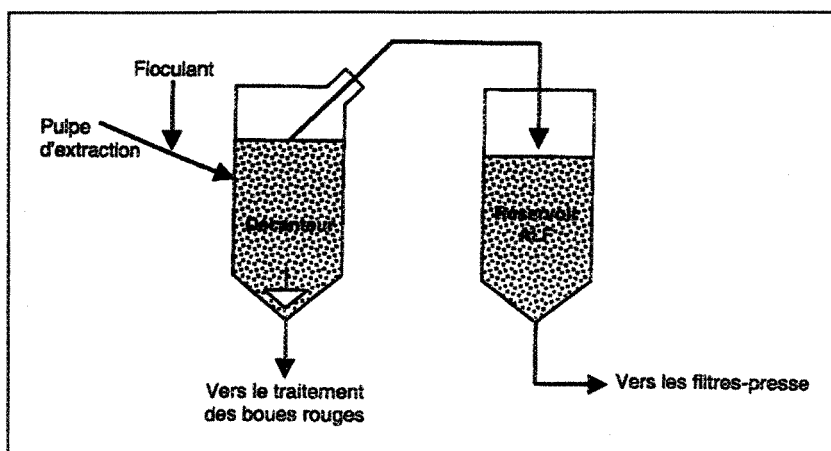


Figure 2.3 Décantation des solides insolubles

Un polymère synthétique est ajouté à la pulpe d'extraction pour permettre l'agglomération des particules solides en flocons plus volumineux et décantables. La problématique principale dans le procédé de floculation est la fragilité des flocons formés. En effet, les flocons formés se brisent lorsqu'ils subissent une contrainte de cisaillement au-dessus d'une valeur critique. Cela engendre une diminution de rendement pour l'étape de décantation. Le sédiment obtenu à la suite de cette étape est dirigé vers le site de traitement des boues rouges. Le surnageant résiduel (liqueur mère), qui contient le NaAlO_2 en solution, est dirigé vers le réservoir d'alimentation des filtres.

2.1.5. Traitement des boues rouges

Les boues rouges sont constituées par la partie de la bauxite qui n'a pas été dissoute dans la liqueur. Leur composition dépend évidemment de la provenance de la bauxite. Les boues rouges sont d'abord lavées puis épaissies. Ces deux opérations ont pour but la récupération de l'aluminate de sodium qui est réutilisé dans le cycle Bayer et l'appauvrissement des boues en soude afin de permettre leur stockage en milieu naturel.

2.1.6. Filtration

Le surnageant obtenu lors de l'étape de séparation est par la suite filtré afin d'en retirer les particules encore présentes en suspension dans la liqueur mère. À la surverse des décanteurs, du lait de chaux est ajouté pour agir comme aide filtrant. La filtration s'effectue sous une pression de 400 kPa. À la sortie des filtres, la solution est à une température de 107 °C. Les impuretés

accumulées sur le filtre sont dirigées vers le site de traitement des boues rouges. La Figure 2.4 présente un schéma de l'étape de filtration.

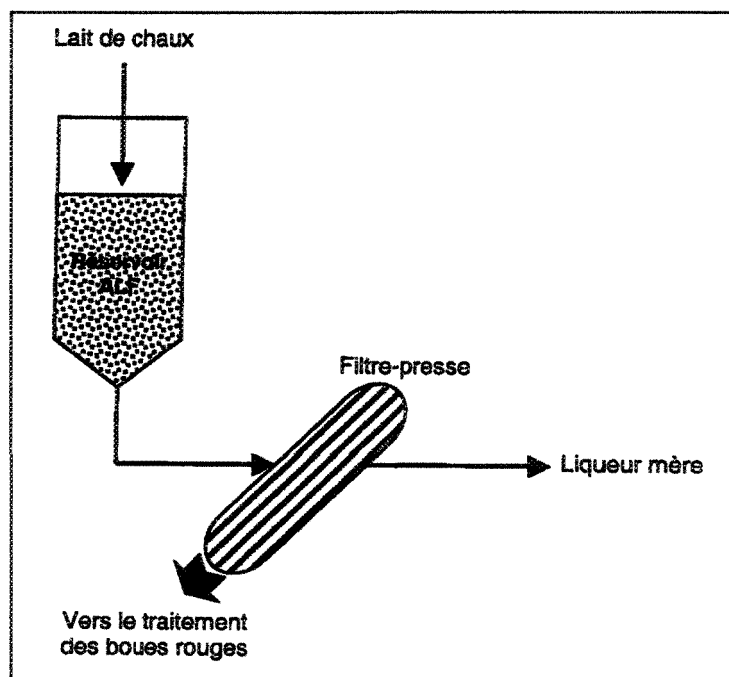


Figure 2.4 Étapes de filtration

2.1.7. Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium

La liqueur mère est d'abord refroidie à une température comprise entre 60 et 85 °C dans un détendeur qui récupère la vapeur pour réchauffer la liqueur usée retournant vers les autoclaves. La liqueur mère est ensuite entreposée dans des réservoirs où la précipitation est amorcée par l'ajout de particules d'hydrate récupérées en aval et ayant une taille inadéquate pour être dirigées vers la calcination. Il y a trois types de précipitateurs qui alimentent chacun un classificateur.

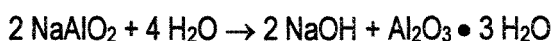
La Figure 2.5 présente un schéma détaillé de l'étape de précipitation.

- Le précipitateur spécial reçoit les plus petites amorces provenant du décanteur à plateaux. La suspension est dirigée vers le classificateur spécial. La souverse de ce dernier contient les amorces de tailles moyennes. La surverse contient les plus fines amorces qui sont dirigées vers les décanteurs à plateaux.

- Le précipitateur primaire reçoit la liqueur mère et les amorces moyennes proviennent du classificateur spécial. La souverse 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 précipitateur 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 souverse contient les particules d'hydrate suffisamment grosses pour être classées en tant que produit.

La réaction de précipitation est obtenue par dilution et refroidissement de la liqueur mère. Ces conditions permettent la réaction suivante:



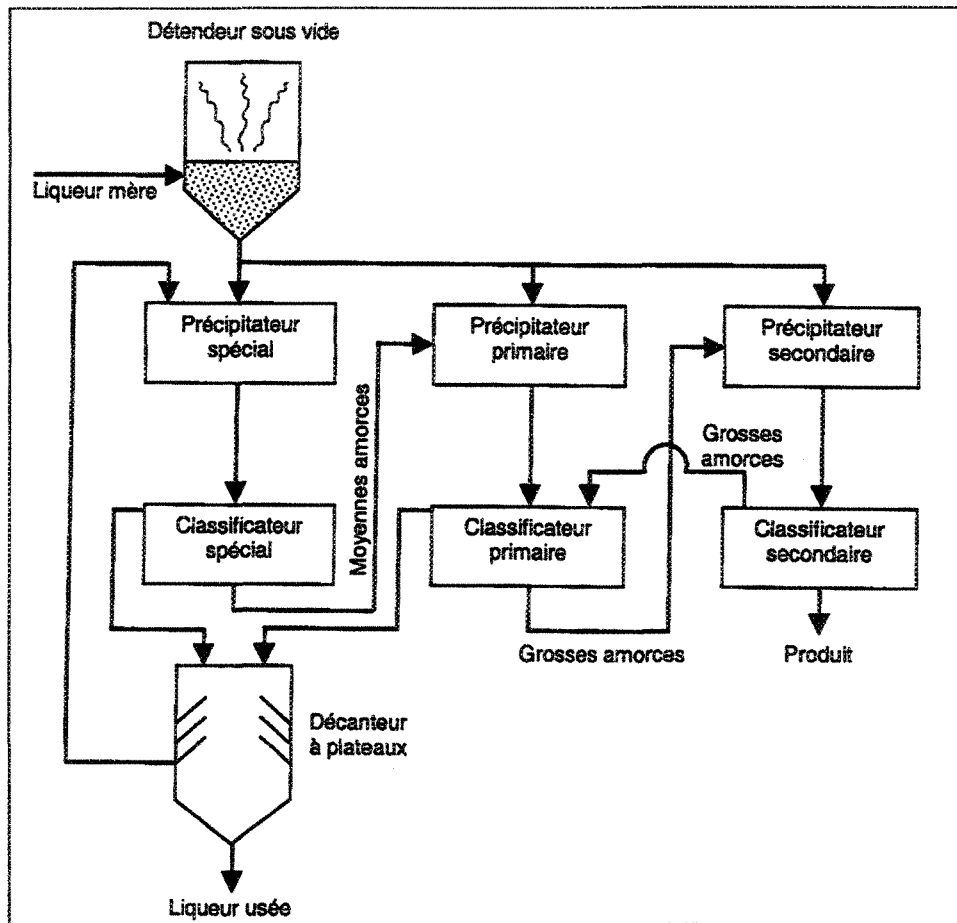


Figure 2.5 Schéma détaillé de l'étape de précipitation

Lors de la précipitation, la solution est lentement agitée de manière à 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. Le temps de décantation des particules submicroniques prend plusieurs jours. La succession de plateaux est utilisée pour minimiser la distance, donc le temps de décantation. La surverse des plateaux est la liqueur usée qui sera recyclée.

2.1.8. Calcination et traitement de l'hydrate

Le traitement de l'hydrate comprend six étapes :

1. Lavage de l'hydrate pour diminuer la concentration de la soude caustique contenant le tri-hydrate d'aluminium.
2. Décantation pour récupérer l'hydrate solide.
3. L'hydrate est déposé sur des filtres pour être lavé à nouveau et afin d'éliminer toute trace de caustique.
4. L'hydrate est séché à 150 °C dans des fours qui permettent d'éliminer 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 et 1200 °C afin d'éliminer l'eau liée à l'hydrate.



6. L'alumine est refroidie dans des lits fluidisés et est finalement transportée dans des silos d'entreposage. Les particules d'alumine ont des diamètres se situant entre 20 et 200 µm.

2.2. Les procédés de séparation solide-liquide

Il est difficile de trouver des procédés industriels de grande envergure qui ne comportent pas à un mode de séparation solide-liquide. Cette activité implique une vaste gamme de techniques et d'équipements. Cette section du chapitre 2 décrit les notions de base en sédimentation et les techniques de traitements préliminaires.

2.2.1. Sédimentation des suspensions diluées et concentrées

La sédimentation est la séparation des particules d'un fluide due à l'effet d'une force, comme la gravité, sur la masse des particules [9]. La taille, la densité ainsi que la concentration volumétrique des particules jouent un rôle majeur dans le comportement d'une suspension sous ces conditions. La sédimentation retardée ou l'épaississement est un terme utilisé pour décrire le comportement des suspensions concentrées où les vitesses de sédimentation sont largement reliées à la concentration plutôt qu'à la taille des particules.

2.2.1.1. Sédimentation diluée

L'équation générale du mouvement d'une petite particule solide dans un liquide peut être obtenue en appliquant la seconde loi de Newton [9]. Le système d'axes privilégié est positif pour les forces dirigées vers le haut et négatif pour les forces dirigées vers le bas.

$$A = D - F - P + L + B$$

(2.1) A = force nette sur la particule

D = force de traînée sur la particule

F = force de gravité et poussée d'Archimède

P = force de pression due au gradient de pression dans le liquide

L = force d'accélération de la masse apparente de la particule relative au liquide

B = force qui prend en compte les déviations de configuration d'écoulement (régime variable)

Cette équation peut être simplifiée afin de faciliter son utilisation. Par exemple, si la différence de pression dans le liquide est faible, P peut être ignorée et si la configuration d'écoulement est stable alors B est égale à zéro. L est normalement ignoré lorsque la densité du liquide est faible comparée à celle du solide. Si ces simplifications sont faites, l'équation (2.1) se réduit à :

$$A = D - F \quad (2.2)$$

Si la particule est sphérique et de diamètre x, la force nette A est donnée par:

$$A = \frac{\pi \cdot x^3}{6} \cdot \rho_s \cdot \frac{du}{dt} \quad (2.3)$$

où « ρ_s » est la densité du solide, « u » la vitesse relative de la particule et « t » le temps. L'effet de la force L est souvent inclus dans ce terme par l'utilisation de $(\rho_s + \kappa\rho)$ à la place de ρ_s . Le symbole κ

est un facteur qui prend en compte la présence d'une couche de liquide environnant la particule et ρ est la densité du liquide. La valeur de κ est généralement choisie pour être 0.5.

Les forces de traînée sont habituellement décrites par la loi de Newton, c'est-à-dire :

$$D = C_D (\text{Re}_p) A_p \frac{\rho}{2} u^2 \quad (2.4)$$

où A_p est l'aire projetée d'une particule dans la direction du débit et C_D est le coefficient de traînée qui pour différentes formes de particules est une fonction du nombre de Reynolds.

$$\text{Re}_p = \frac{x \cdot u \cdot \rho}{\mu} \quad (2.5)$$

qui caractérise la nature du débit liquide autour de la particule.

C_D est un coefficient caractérisant la résistance qu'oppose un fluide à un corps en mouvement par rapport à ce fluide. Le coefficient de traînée peut aussi être regardé comme le ratio de τ , la force par unité d'aire d'une particule, mesurée perpendiculairement à la direction du mouvement, par rapport à l'énergie cinétique du liquide.

$$C_D = \frac{2 \cdot \tau}{\rho \cdot u^2} \quad (2.6)$$

La valeur du coefficient de traînée diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Des travaux variés ont produit des équations pour décrire la relation entre C_D et Re_p , normalement au-dessus d'une plage limitée de Re_p . Pour les valeurs de Re_p au-dessus de 10^5 , on suggère que :

$$C_D = \left(2.249 \cdot Re_p^{-0.31} + 0.358 \cdot Re_p^{0.06} \right)^{3.45} \quad (2.7)$$

Pour des valeurs de Re_p entre 10^3 et 2×10^5 , la valeur de C_D est constante à 0.44. C_D chute brusquement à une valeur de Re_p d'environ 2×10^5 pour atteindre une valeur constante de 0.1. Cette baisse de la valeur de C_D est due au changement du régime d'écoulement au niveau de la couche limite environnant la sphère (de laminaire à turbulent).

Les forces dominantes dans la sédimentation par gravité sont la force de gravité et la poussée d'Archimède agissant sur la masse de la particule (pour une particule sphérique) tel que:

$$F = \frac{\pi \cdot x^3}{6} (\rho_s - \rho) g \quad (2.8)$$

Ainsi, le bilan des forces de l'équation (2.2) devient (pour une particule sphérique) :

$$u_t = \left[\frac{4(\rho_s - \rho)g \cdot x}{3 \cdot \rho \cdot C_D} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

qui peut être évaluée si une valeur de C_D est connue.

Dans la sédimentation de suspensions diluées, les nombres de Reynolds sont habituellement bas (< 1.0). Dans ce cas, la relation C_D versus Re peut être décrite simplement. L'équation de Navier-Stokes, laquelle décrit le comportement d'un élément infinitésimal d'un fluide incompressible en utilisant seulement la gravité comme une force de corps, assume le terme d'inertie comme étant négligeable.

$$D = 3\pi \cdot \mu \cdot x \cdot u \quad \text{ou} \quad C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (2.10)$$

La taille maximale d'une particule, pour un système donné, peut être obtenue de la relation :

$$x_{\max} = \left[\frac{3.6(\mu^2)}{(\rho_s - \rho)\rho \cdot g} \right]^{1/3} \quad (2.11)$$

Après la période d'accélération initiale qui est normalement courte, la vitesse de sédimentation u_t est obtenue par l'équation de balance de force en prenant le terme d'accélération comme zéro et en posant $u = u_t$, donnant :

$$u_t = \frac{x^2}{18\mu} (\rho_s - \rho)g \quad (2.12)$$

Ceci est la loi de Stokes, définie pour les particules sphériques. Il y a deux restrictions à l'applicabilité de la loi de Stokes [9]. L'une concerne l'effet de concentration qui en termes pratiques est si faible que le comportement de sédimentation des particules n'est pas affecté par la proximité des particules. La seconde restriction à cette loi est que la valeur du nombre de Reynolds devrait être plus petite que 0.2. Si ces deux conditions sont rencontrées, la sédimentation peut aussi être appelée « sédimentation libre », et l'équation (2.12) peut être appliquée. Lors de la sédimentation

libre, il n'y a pas d'interface distincte entre les solides sédimentant dans la suspension et le liquide surnageant (c'est-à-dire une suspension laiteuse qui s'éclaircit lentement avec le temps) et une couche de sédiment est observable à la base du récipient.

La situation où le nombre de Reynolds est plus grand que 0.2 requiert une solution à l'équation de balance de force où la force de traînée est exprimée par la loi de Newton. De plus, la solution est compliquée par l'interrelation entre le coefficient de traînée et la vitesse de sédimentation (par le nombre de Reynolds). Dans le cas où le terme d'accélération n'est pas négligeable et, pour une sphère, cette équation est :

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} [1 + (3/16) \cdot \text{Re}_p] \quad (2.13)$$

2.2.1.2. Sédimentation retardée

Lorsque la concentration des particules est suffisamment élevée, les particules ne sédimentent plus comme des particules individuelles. En général, le comportement de sédimentation change avec une augmentation de la concentration, passant rapidement à une région de transition où des grappes de particules se développent et sédimentent comme des nuages. Ce type de sédimentation, où les particules sédimentent en masse, produit une sédimentation retardée [9]. La proximité des particules conduit à la formation d'une interface qui se développe entre les solides sédimentant en masse et le liquide clair déplacé par la sédimentation. Finalement, l'interface se stabilise lorsque la sédimentation est complétée.

2.2.1.2.1. Sédimentation en fournée : La théorie de Kynch

Une caractéristique importante de la sédimentation retardée [9] est le développement d'une interface distincte entre le liquide claire et les solides sédimentant. Ces caractéristiques sont habituellement plus marquées pour les systèmes floculés ou coagulés.

Il est important de considérer le comportement de sédimentation à la base du récipient. Tout d'abord, dans la première augmentation de temps δt , une concentration $C + \delta C$ est formée à la base du récipient. Subséquemment, des solides supplémentaires s'accumulent pour donner une concentration de $C + 2\delta C$ à la base et de $C + \delta C$ dans la couche supérieure. Similairement, dans la troisième augmentation de temps, la concentration à la base devient $C + 3\delta C$. De la même manière la couche centrale est maintenant $C + 2\delta C$ et celle de la couche supérieure du sédiment est $C + \delta C$. Ainsi, la concentration la plus haute, présente à n'importe quel point dans le temps, doit être à la base du récipient. Les couches de concentration constante apparaissent donc déplacées vers le haut.

Pendant que tout ceci a lieu à la base du contenant, l'interface entre le liquide clair et les solides qui sédimentent est déplacée vers le bas. Le changement dans la hauteur de cette interface avec le temps est connu comme la courbe de sédimentation en fournée, telle que présentée à la Figure 2.6.

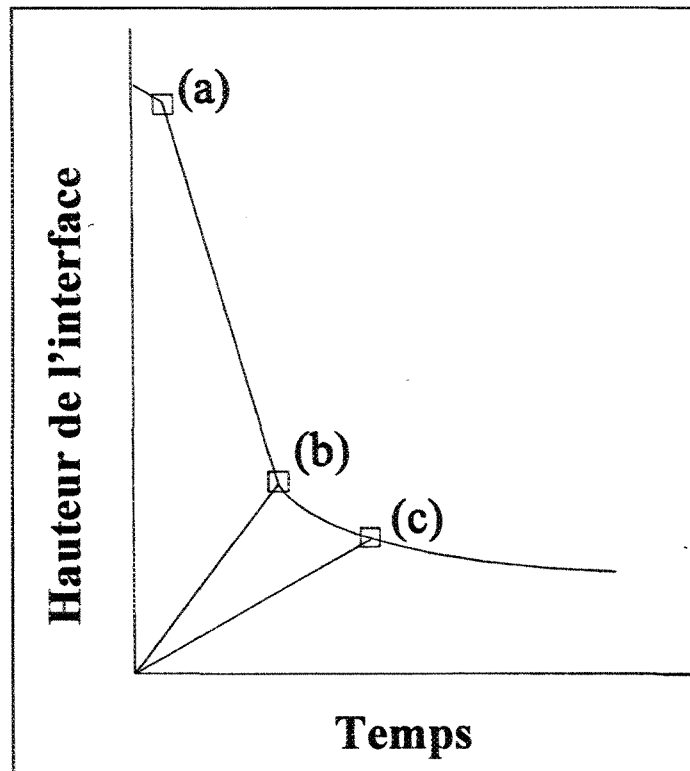


Figure 2.6 Courbe de sédimentation en fournée

La période initiale, jusqu'au point (a), représente une période de formation dans laquelle la suspension se remet des perturbations initiales ou, si la suspension est floculée ou coagulée, dans laquelle les particules agglomérées appelées « floccs » sont formées. Du point (a) à (b), une vitesse de chute constante de l'interface est observée. Du point (b), il y a une transition vers une première section de chute de vitesse qui se termine au point (c), le « point de compression », où apparaît une seconde section de chute de vitesse. À partir de ce point, cette dernière partie marque la fin du régime de sédimentation retardée.

Ce modèle [9] débute avec l'hypothèse que la vitesse de sédimentation U est uniquement une fonction de la concentration des solides C . Le flux de particules G est défini comme :

$$G = U \cdot C \quad (2.14)$$

où la vitesse de sédimentation est en (m/s) et la concentration des solides en fraction de volume. En considérant la différence de hauteur dans un intervalle de temps donné, l'accumulation des particules dans la couche est donnée par :

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{\delta (U \cdot C)}{\delta C} \quad (2.15)$$

L'équation (2.15) peut être convertie en différentielle et peut ainsi être intégrée afin d'obtenir la vitesse de sédimentation entre une hauteur initiale et finale de sédiment (pour une concentration en matières particulaires données).

2.2.1.2.2. L'agitation et les canaux durant la sédimentation

Des canaux sont souvent observés durant la sédimentation batch [9] et sont directement visibles lorsque la sédimentation se produit dans des contenants transparents. L'interface de sédimentation peut révéler des petits monticules de solides éjectés du sommet des canaux qui ressemblent à des volcans. Ce phénomène de canalisation permet au liquide contenu dans le sédiment d'être évacué dans le liquide surnageant. Les canaux se forment initialement dans les régions basses du contenant de sédimentation puis se propagent vers l'interface de sédimentation.

Lorsque le sommet d'un canal arrive près de l'interface, et que le liquide coulant vers le surageant connaît une baisse de résistance à l'écoulement en s'écoulant à travers ce canal, la vitesse de sédimentation des solides près de l'interface peut augmenter parce qu'elle est soumise à une baisse de la force de traînée du liquide. Étant donné que les canaux fournissent un moyen d'augmenter la vitesse de production du liquide surageant et qu'ils amélioreraient la vitesse de sédimentation, ils seraient bénéfiques dans les équipements de sédimentation commerciaux. Les canaux peuvent seulement être formés naturellement avec les matériaux en l'absence d'agitation. La hauteur du sédiment est une variable importante en sédimentation et ce phénomène peut être utilisé pour compresser le réseau de solides à une concentration supérieure de sédiment.

L'agitation empêche la formation de canaux mais aide également à ralentir la formation de gros agrégats, floes et réseaux de solide. Ainsi, l'agitation permet d'obtenir de plus hautes concentrations de sédiment comparées aux concentrations obtenues lorsque formé naturellement. L'agitation permet donc au liquide contenu dans le sédiment de remonter vers le surageant. Par conséquent, la canalisation est souhaitable près de l'interface de sédimentation mais l'agitation est souhaitable à l'intérieur du sédiment.

2.2.2. Les techniques de traitement préliminaire

Certains systèmes solide-liquide sont impossibles à séparer par les méthodes habituelles décrites précédemment. Afin de résoudre ces difficultés, il est nécessaire de modifier le comportement du système pour qu'il devienne plus facile de séparer les deux phases.

Occasionnellement, les propriétés de viscosité du liquide, de densité et de tension de surface peuvent avoir besoin d'être modifiées pour améliorer le procédé de séparation solide-liquide.

2.2.2.1. La coagulation et la floculation

Dans le comportement de plusieurs suspensions, la stabilité des particules en suspension est telle qu'elles manifestent peu ou presque aucune vitesse de sédimentation malgré l'existence d'une différence de densité entre les phases [9]. Il y a deux façons de produire des changements dans l'état d'agglomération d'une suspension de particules et, bien qu'elles aient été utilisées comme synonyme dans le passé, elles se définissent maintenant par les termes « coagulation » et « floculation ». La coagulation est réservée aux phénomènes qui produisent une réduction du potentiel zéta d'une particule en suspension dans un électrolyte en changeant la nature et les concentrations des ions présents. La floculation est un phénomène où certains types de polymère à longue chaîne ou des polyélectrolytes causent l'agrégation des particules en formant des ponts entre elles. Ces deux types de traitement améliorent considérablement la sédimentation des particules suspendues.

2.2.2.1.1. Stabilité des suspensions colloïdales

Les colloïdes sont des substances constituées de particules très fines, qui du fait de leurs faibles dimensions (inférieures à 1 μm), possèdent une activité de surface qui a une influence appréciable sur les propriétés de l'agrégat [10]. L'argile est un matériel fin qui possède des propriétés colloïdales à l'état humide. Les argiles sont des substances naturelles composées essentiellement

de silice plus ou moins hydratée, d'alumine, mais également de magnésium, de fer ou même de nickel.

Le temps de décantation de ces particules est calculé par la loi de Stokes (voir tableau 2.1). Cette loi décrit le mouvement d'une particule dans un fluide par une balance des forces agissant sur la particule sphérique [9]. L'équation qui suit permet d'établir une relation entre la vitesse terminale de descente d'une sphère lisse et rigide dans un fluide visqueux dont la densité et la viscosité sont connues.

$$u_t = \frac{g(\rho_s - \rho)x^2}{18\mu}$$

où u_t est la vitesse terminale de chute, x est le diamètre équivalent de la particule et μ est la viscosité du liquide.

La loi de Stokes est donc la loi décrivant la sédimentation [9]. La vitesse de chute des particules étant proportionnelle au carré de leur diamètre (loi de Stokes), il devient facile, en se référant au tableau 2.1, de concevoir un avantage à réunir deux petites particules pour en former une plus grosse. Ce tableau indique également que plus la particule est petite, plus sa surface spécifique est grande. La surface spécifique (d'une matière fragmentée) est la surface totale des grains de matière contenus dans l'unité de masse ou occupant (volume réel et non foisonné) l'unité de volume. La surface spécifique est souvent exprimée en mètres carrés par gramme (m^2/g) ou en mètres carrés par mètre cube (m^2/m^3).

Tableau 2.1 Temps de décantation de différentes particules

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

Les colloïdes sont donc des particules qui ne décantent pas naturellement, et pour lesquelles les phénomènes de surface sont primordiaux. Ces phénomènes régissent la stabilité des suspensions colloïdales. En effet, les colloïdes sont soumis à deux grands types de force [11] :

- énergie d'attraction de Van der Waals, reliée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu (E_A),
- énergie de répulsion électrostatique, reliée aux charges superficielles des colloïdes (E_B).

La stabilité d'une suspension colloïdale dépend du bilan des énergies d'attraction et de répulsion [11], dont le niveau d'énergie est donné par :

$$E = E_A + E_B \quad (2.16)$$

Cette relation est schématisée à la figure suivante :

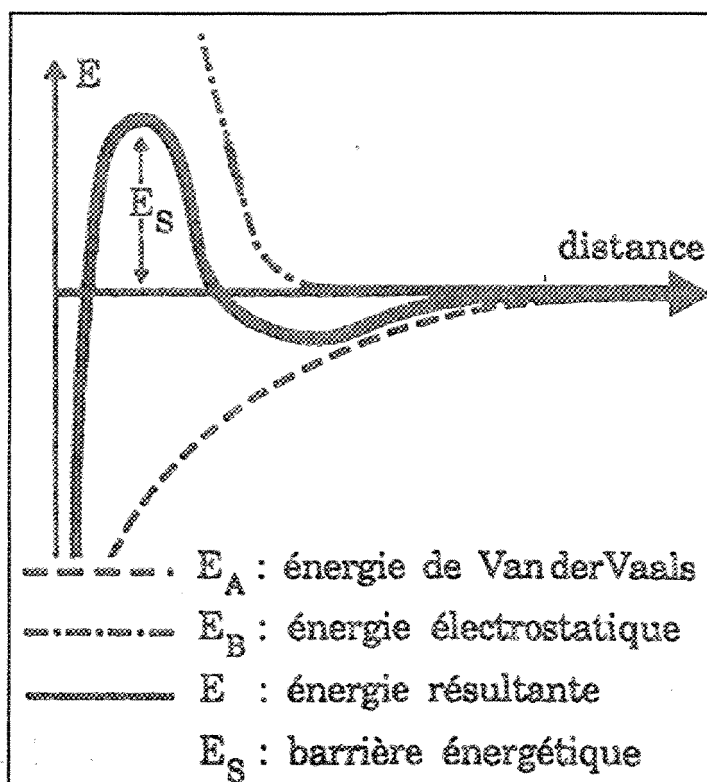


Figure 2.7 Stabilité d'une suspension colloïdale

Pour déstabiliser la suspension, il faut franchir la barrière énergétique E_S . Afin de favoriser l'agglomération des colloïdes, il faut diminuer les forces de répulsion électrostatique. Cette déstabilisation est obtenue par la coagulation.

2.2.2.1.2. Théorie de la double couche

Afin de neutraliser la charge négative (ou positive) de surface, des ions positifs (ou négatifs), présents dans l'eau ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde [11]. Diverses théories ont été avancées (Figure 2.8) :

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

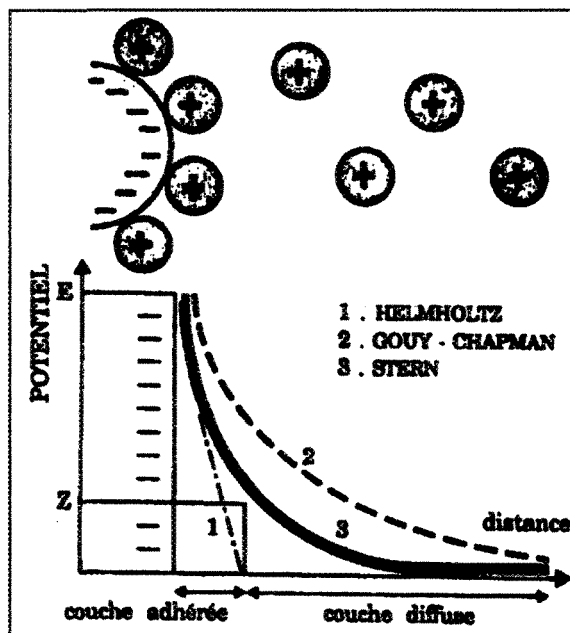


Figure 2.8 Théorie de la double couche

2.2.2.1.3. Le potentiel Zéta

Le colloïde se déplace dans le liquide avec une partie de sa double couche [11]. Cette couche, liée au colloïde, correspond à la couche fixe de la théorie de Stern. Le colloïde se caractérise par deux potentiels de surface (Figure 2.8) :

- E : Potentiel à la surface du colloïde ou potentiel thermodynamique (Nernst).

- Z : Potentiel à la surface du plan de cisaillement ou potentiel électrocinétique.

Le potentiel Z, appelé potentiel Zéta, régit le déplacement des colloïdes et leur interaction mutuelle. L'électrophorèse permet de le définir : lorsqu'une particule est soumise à un champ électrique, elle atteint presque instantanément une vitesse telle qu'un équilibre s'établit entre la force électrique d'attraction et la force de frottement due à la viscosité du milieu [11]. Le calcul conduit à la relation suivante entre la mobilité électrophorétique et le potentiel Zéta :

$$me = \frac{\varepsilon \cdot Z}{\kappa \cdot \eta} \quad (2.17)$$

où me est la mobilité électrophorétique, ε est la constante diélectrique du milieu, η est la viscosité dynamique, κ prend la valeur de 4 ou 6 suivant les hypothèses et Z est le potentiel zéta.

Des particules ayant le même potentiel électrocinétique Zéta possèdent la même mobilité électrophorétique indépendamment de leur diamètre. L'appareil permettant la mesure du potentiel électrocinétique est le Zétamètre.

2.2.2.1.4. Double couche et potentiel Zéta

Près d'une particule chargée, les charges électriques (portées par des ions) se répartissent en deux couches de la façon représentée à la Figure 2.9.

On rencontre donc, dans l'ordre [11] :

- la particule, souvent chargée négativement dans le milieu naturel. L'origine de cette charge peut être diverse :
 - adsorption préférentielle d'ions petits et fortement polarisables (comme OH^- en milieu aqueux).
 - Ionisation de groupes chimiques à la surface de la particule.
 - Ions formés par réaction entre la particule et le liquide.

- une couche fixe d'ions de signe contraire (couche de Stern).

- une couche diffuse (à cause de l'agitation thermique) de contre-ions, devenant plus diffuse avec la distance, déformable et mobile (couche de Gouy).

- la masse du liquide.

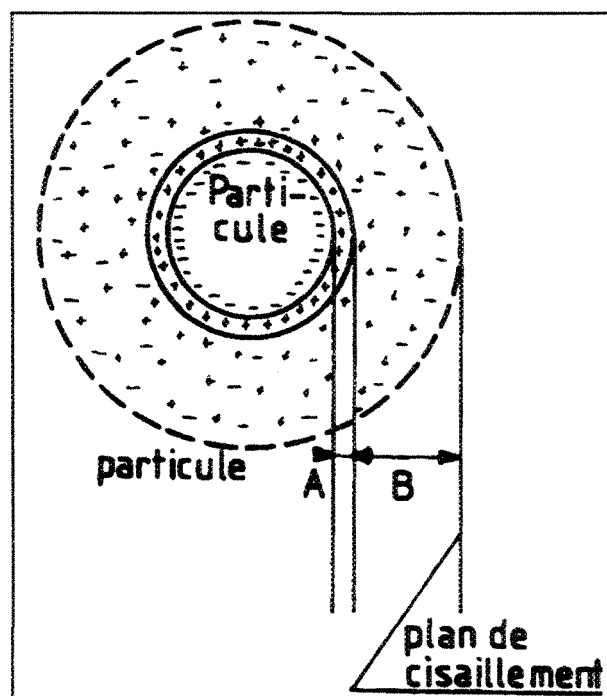


Figure 2.9 Schématisation de la double couche

Dans la couche fixe de Stern (Fig. 2.10), le potentiel décroît linéairement puisque les ions y sont empilés uniformément. Dans la couche diffuse, la décroissance du potentiel suit la loi de Poisson. À la limite entre les deux couches règne le « potentiel de Stern ».

Un peu plus loin dans la couche diffuse un plan de cisaillement existe délimitant la zone de déformabilité, et où règne le « potentiel Zéta » que l'on considère comme caractéristique de la stabilité de la suspension. Ce potentiel peut valoir jusqu'à -30 ou -35 mV dans les milieux naturels, mais il ne peut évidemment être mesuré qu'indirectement, par exemple par migration électrophorétique des particules placées dans un champ électrique (voir section 2.2.2.1.3). Si le potentiel Zéta peut être ramené à 0 ± 5 mV, la stabilité diminue fortement et il y a coagulation totale.

Par contre, lorsque ce potentiel est ramené entre -14 et -22 mV, seule la turbidité grossière est coagulée.

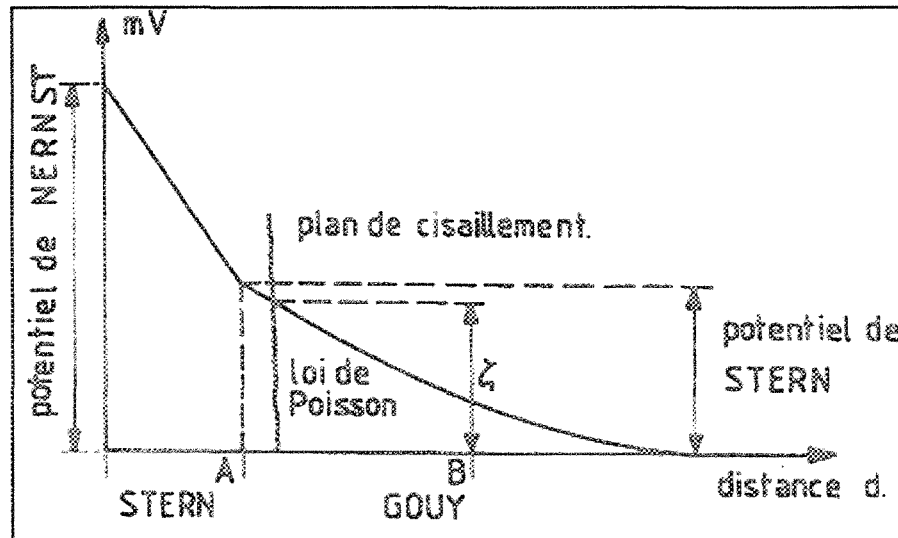


Figure 2.10 Schématisation des différentes énergies de la double couche

2.2.2.1.5. La coagulation

La coagulation est l'adhésion des particules par des forces d'origine moléculaire et atomique. La présence ou l'absence de coagulation dépend de la balance entre les forces attractives de Van der Waals et les forces répulsives de la double couche électrique [9].

Les petites particules en suspension dans un liquide sont sujettes à un bombardement aléatoire par les molécules du liquide qui augmentent le mouvement irrégulier des particules. Ce mouvement est appelé le « mouvement Brownien ». De tels comportements peuvent rapprocher suffisamment certaines particules pour permettre aux forces attractives de surface de lier ensemble ces particules en petits agglomérats. Cependant, si les surfaces des particules sont électriquement

chargées les forces répulsives entre les particules peuvent être suffisantes pour empêcher l'agglomération spontanée produite par le mouvement Brownien. Ce phénomène est illustré sur la figure 2.11 en termes d'énergie potentielle versus la distance interparticulaire. Dans la figure 2.11A, la courbe (a) représente l'énergie de Van der Waals qui est une force attractive ayant une valeur de plus en plus négative à de petites distances interparticulaires. La courbe (b) représente la force électrique répulsive dans le sens opposé et la courbe (c) est la résultante des deux, exposant à un maximum la barrière d'énergie qui résulte de la stabilisation du système.

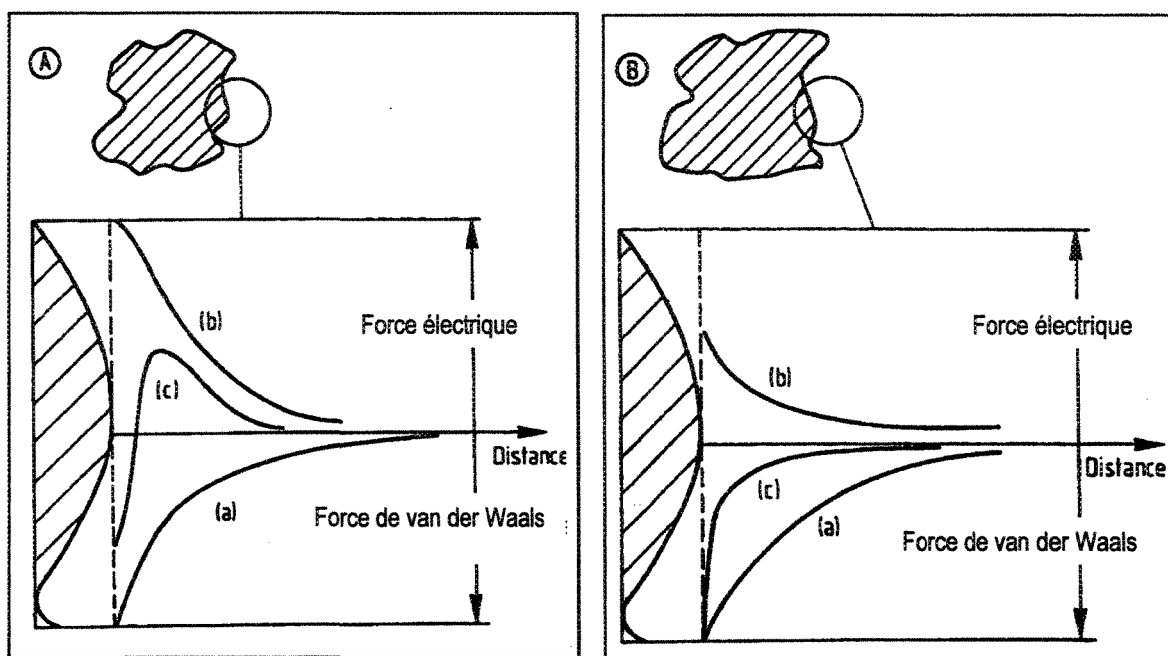


Figure 2.11 Courbes d'énergie potentielle

L'addition de substances chimiques est utilisée pour modifier la densité de charge afin de permettre l'agglomération des particules. L'effet des réactifs coagulants, montré dans la figure 2.11B, est de réduire le niveau de la courbe (b) produisant ainsi la courbe résultante (c) en dessous de la

valeur d'énergie potentielle zéro. Ceci permet aux particules de coaguler si elles deviennent suffisamment proches.

La coagulation lente provenant du mouvement Brownien est appelée « coagulation péricinétique ». Dans ce cas, on assume que les particules vont coaguler si leur énergie potentielle d'interaction est adéquate au moment de la collision et si la vitesse de collision est gouvernée par leur vitesse de diffusion Brownien. Lorsque le nombre de particules a été réduit de moitié, ($N = N_0/2$) le temps correspondant est :

$$t_{0.5} = \frac{3 \cdot \mu}{4 \cdot k_B \cdot T \cdot N_0} \quad (2.18)$$

où T est la température absolue, μ la viscosité du liquide, N_0 le nombre de particules présent initialement et k_B la constante de Boltzmann. L'équation 2.15 permet de déterminer si le processus est rapide ou lent.

2.2.2.1.6. La floculation

Les mécanismes impliqués lors de la floculation sont assez différents de ceux reliées à la coagulation. Le floculant chimique est une molécule polymérique à longue chaîne naturelle ou synthétique.

Le mécanisme global de la floculation implique la formation de pont ou de séries de ponts entre les particules [9]. La chaîne de polymère en solution est adsorbée sur une particule et lorsque d'autres particules se trouvent assez près, la chaîne allongée est adsorbée à sa surface. Les floccs

élémentaires grandissent en se pontant avec d'autres particules jusqu'à ce qu'une taille optimale des floccs soit atteinte. La réaction de floculation est irréversible, comme la réaction de coagulation, et il est important d'éviter des taux de cisaillement élevés puisqu'ils briseront les ponts moléculaires empêchant la formation d'une taille optimale à l'équilibre. La Figure 2.12 montre un schéma du modèle de floculation.

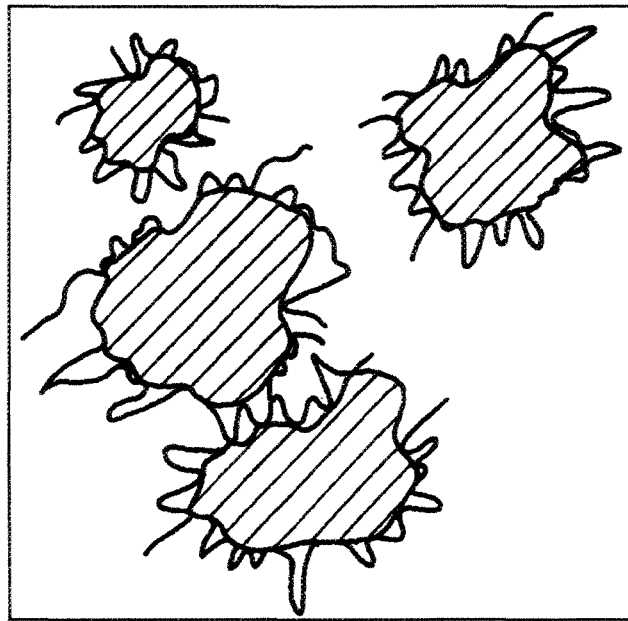


Figure 2.12 Le modèle de floculation

Généralement, la coagulation est produite par la réduction du potentiel zéta mais ce n'est pas le cas dans la floculation au moyen des polyélectrolytes. Ceci est démontré par l'efficacité des flocculants naturels et par l'efficacité démontrée par certains systèmes où le flocculant porte des charges électriques incompatibles avec le solide devant être flocculé [9]. Cependant, les effets de charge peuvent être plus importants pour certains flocculants dont le poids moléculaire est très faible. Dans ce cas, la longueur de chaîne du polymère est insuffisante pour permettre la formation de

pontage à un niveau significatif. Dans ces conditions, les effets de charge jouent une part importante dans le processus d'adsorption des flocculants ioniques.

La floculation peut être considérée comme une séquence d'étapes de réaction [6]. Premièrement, le flocculant est dispersé dans le liquide et diffuse ensuite vers l'interface solide-liquide. À ce moment, le composé chimique devient adsorbé sur les surfaces solides. La particule enrobée se heurte avec d'autres particules et les chaînes de polymère libres s'adsorbent sur une seconde particule formant des ponts et un multi-floc.

Pratiquement tous les polymères sont adsorbés à un dosage optimal qui est proportionnel à la surface du solide. Il a été suggéré que la floculation optimale apparaisse lorsque la moitié de la surface du solide est couverte par le polyélectrolyte [7]. 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. Ce phénomène peut être observé expérimentalement par l'atteinte d'une vitesse de sédimentation maximale.

L'effet du pH est généralement très complexe [12]. Pour certains systèmes, il a été démontré que la dose de polymère optimale diminue comme le pH s'éloigne du point isoélectrique, qui est le pH correspondant à la charge nette nulle. En général, la présence d'une charge de surface élevée entrave l'adsorption d'un polyélectrolyte possédant des charges du même signe (amélioration dans le cas des charges opposées).

Certains ions, spécialement les cations multivalents, produisent généralement une diminution du potentiel à l'interface solide-liquide, qui en retour provoque une diminution de la répulsion mutuelle et ainsi conduit à une amélioration dans l'efficacité de la réaction de floculation [13,14]. 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. Ainsi, dans certaines applications, un double système coagulation-floculation peut être nécessaire pour atteindre la taille et la longueur de floc requise.

Il y a un poids moléculaire ou une longueur de chaîne optimale pour l'efficacité de la floculation [15]. Si le poids moléculaire est trop faible, les chaînes de polymère ne sont pas assez longues pour former des ponts. Si le poids moléculaire est trop élevé, le matériel devient difficile à dissoudre et à disperser. Pour les dérivés de polyacrylamide, le niveau pratique des poids moléculaires est de 10^5 - 10^6 (g/mol). Généralement, l'augmentation du poids moléculaire conduit à une augmentation de l'efficacité de la floculation et de la longueur du floc mais également à une augmentation des coûts de dépense en raison des grandes quantités requises.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Tous les essais de floculation sont effectués dans un cylindre en utilisant la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges [16] (test du cylindre). Comme mentionné à la section 1.1, des essais préliminaires ont démontré que la procédure actuellement utilisée par Alcan International ne permet pas de reproduire adéquatement des essais dans les mêmes conditions expérimentales. En effet, les résultats obtenus manquent de reproductibilité limitant ainsi le niveau de confiance des données obtenues. Afin d'atteindre un niveau de confiance satisfaisant pour cette étude, chaque essai est reproduit dix fois dans le but d'obtenir un groupe statistiquement représentatif des résultats expérimentaux. La méthodologie du test du cylindre doit être révisée afin d'atteindre un niveau de reproductibilité adéquat pour permettre d'évaluer toutes améliorations notables de la clarté d'une surverse. Pour ce faire, les différentes variables affectant la méthodologie actuelle doivent être évaluées. Le présent chapitre porte sur les modifications apportées à la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges afin d'atteindre un niveau de reproductibilité satisfaisant pour une étude sur la clarification d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer par floculation.

3.1. Méthodologie du test de sédimentation des boues rouges

Les différents essais sont effectués dans un cylindre selon la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges [16] (test du cylindre). Une série de dix tests est effectuée simultanément et dans les mêmes conditions expérimentales. Les solutions de floculants et la suspension de boue rouge sont préalablement préparées. Les méthodes de préparation des polymères et de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer sont disponibles à l'annexe A. La suspension est utilisée pour remplir les dix cylindres gradués de 1 L placés dans un bain thermostaté (à température constante). Lorsque l'équilibre thermique est atteint, le contenu des cylindres est homogénéisé à l'aide d'un piston à disque perforé. La quantité de floculant à utiliser est estimée et la moitié est ajoutée à la suspension au moyen d'une seringue graduée. Le floculant est ensuite mélangé à la suspension à l'aide de trois coups de piston. La seconde moitié du floculant est injectée et mélangée à la suspension par trois autres coups du piston. Il se produit alors une interface entre la boue qui s'épaissit et le liquide surnageant relativement limpide. La solution est ensuite mise au repos pour une période d'une heure. Pour un cylindre d'un litre, la surverse représente les trois cent premiers millilitres de surnageant après une heure de décantation.

3.1.1. Optimisation du test de sédimentation des boues rouges

La Figure 3.1 montre les résultats de sédimentation retardée obtenus pour une série de dix essais, effectuée dans les mêmes conditions expérimentales, en utilisant trois polymères différents. Ces résultats ont été obtenus avec les trois polymères qui seront ultérieurement utilisés lors de l'étude sur la clarté d'une surverse. Le volume de floculants requis pour atteindre une vitesse de sédimentation retardée entre 10 et 20 m/h est déterminé et un dosage correspondant est calculé. Pour ces essais, le volume et le dosage correspondant (pour atteindre une vitesse de sédimentation retardée entre 10 et 20 m/h) sont de 32 g/t (16 ml) pour le polymère A, de 24 g/t (12 ml) pour le polymère B et de 16 g/t (8,0 ml) pour le polymère C. La déviation standard calculée avec une limite de confiance de 99% [17], sur les vitesses de sédimentation moyennes, est de l'ordre de 2,94 m/h pour le polymère A, de 7,19 m/h pour le polymère B et de 6,47 m/h pour le polymère C. Ce graphique met en évidence la dispersion des résultats (vitesses de sédimentation) pour une série d'essais effectuée dans les mêmes conditions expérimentales. La dispersion de ces résultats démontre le bas niveau de reproductibilité de la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges. Il devient difficile dans ces conditions de réaliser une étude comparative sur la clarté d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer par floculation. Il est donc pertinent de revoir la méthodologie afin de déterminer la cause de la variabilité et de diminuer celle-ci par des manipulations appropriées.

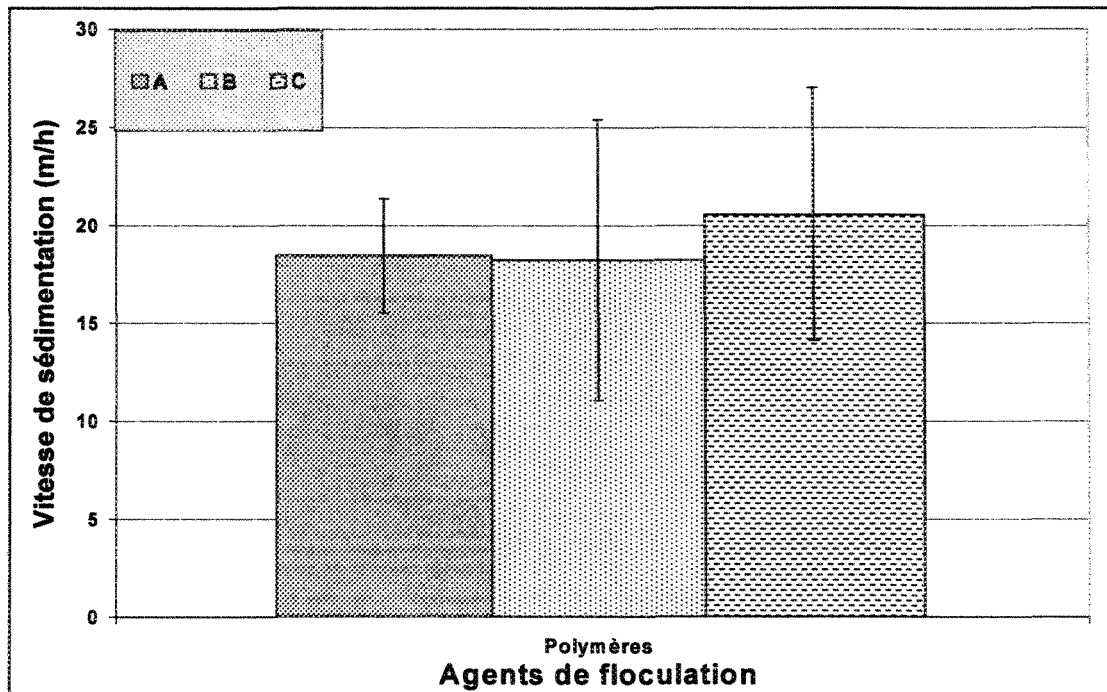


Figure 3.1 Vitesses de sédimentation retardée obtenues pour dix essais répétitifs et trois agents de floculation différents en utilisant la méthodologie initiale du test du cylindre

La méthode de préparation des polymères a été la première étape à être évaluée. Une série d'essais a été effectuée pendant une période d'une semaine, en utilisant la même solution (mère) de floculant, dans les mêmes conditions expérimentales. Dans la Figure 3.2, les résultats démontrent une diminution graduelle du dosage requis pour obtenir une vitesse de sédimentation retardée d'environ 15 m/h. Suite à cette observation, une variation de l'efficacité de l'agent floculant a été suspectée en fonction du temps. Des mesures de viscosité (temps d'écoulement dans un viscosimètre capillaire de type Ubbelohde) de la solution de floculant ont été prises sur une période de cinq jours.

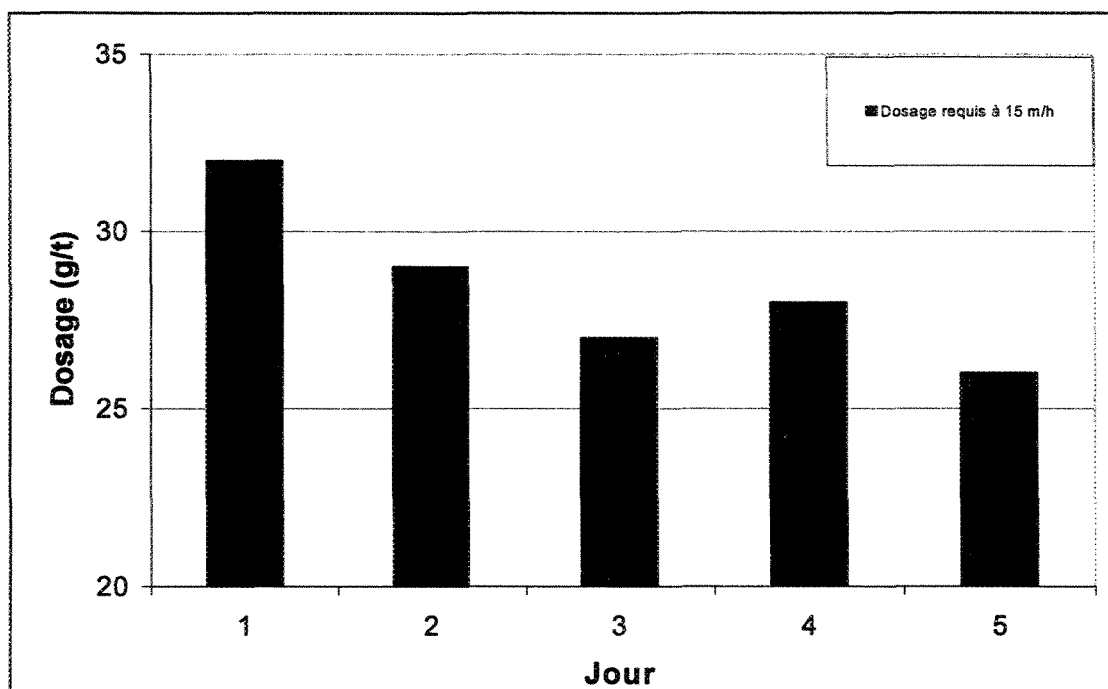


Figure 3.2 Dosage de l'agent flocculant nécessaire pour obtenir une vitesse de sédimentation retardée de ~ 15 m/h pour une période de cinq jours

Les résultats obtenus pour la viscosité, exprimée comme le temps d'écoulement, sont présentés à la Figure 3.3. Une diminution graduelle de la viscosité est notée pour chaque solution de polymère au fil des jours. En 2002, Owen et al. [18] ont rapporté qu'une augmentation de la période de vieillissement d'une solution de polymère au-delà de 24 h améliore considérablement l'activité d'un flocculant tout en réduisant le dosage requis pour atteindre une vitesse de sédimentation acceptable. Après 24 h, l'activité continue d'augmenter lentement atteignant un niveau optimal à ~ 72 h. Finalement, une légère réduction dans l'efficacité de la floculation a été observée pour un vieillissement de plus de 144h. Ce comportement permet de comprendre le processus de solubilisation des polymères et de modifier adéquatement leur méthode de préparation afin d'assurer

la stabilité de la solution. La figure 3.4 montrent les mesures de viscosité obtenues en utilisant la méthode révisée pour la préparation des solutions de polymère. La méthode de préparation révisée est présentée à l'annexe A.

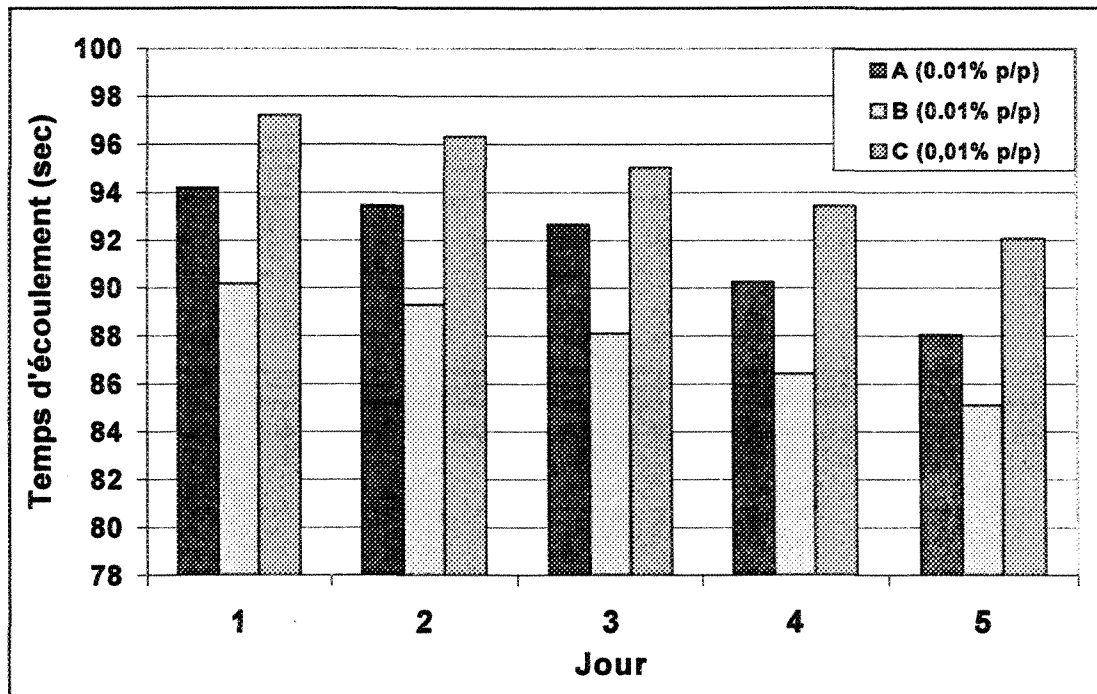


Figure 3.3 Temps d'écoulement (viscosités) pour trois agents de floculation différents à 0.01 % p/p préparés à partir de la méthode initiale de préparation des solutions de polymère, sur une période de cinq jours

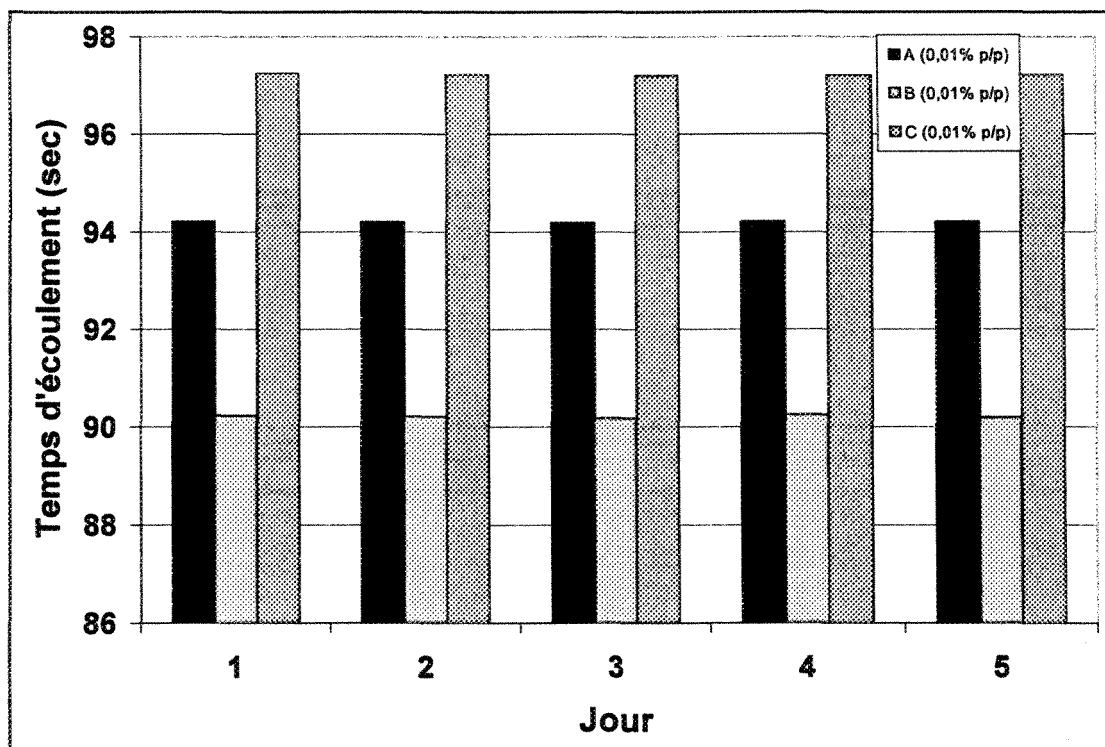


Figure 3.4 Temps d'écoulement (viscosités) pour trois différents agents de floculation à 0.01 % p/p préparés à partir la méthode révisée de préparation des solutions de polymère, sur une période de cinq jours

Kulicke et Kniewske [19] ont démontré que la diminution de la viscosité avec le « vieillissement de la solution » n'est pas le résultat d'une dégradation moléculaire mais plutôt d'un changement dans la configuration des polymères en solution. À partir de résultats expérimentaux, ces chercheurs ont proposé un mécanisme général pour expliquer les changements de l'efficacité d'une solution de floculant en fonction du temps. Ce mécanisme peut être décrit schématiquement par quatre étapes montrées dans la Figure 3.5.



Figure 3.5 Mécanisme général du changement dans la configuration d'une solution de polymère

L'étape (a) représente une courte période de vieillissement. À ce stade, la majorité du floculant se trouve sous la forme de « micro gels gonflés » avec seulement une petite fraction des chaînes de polymères dispersées en solution. Cette forme limite grandement l'efficacité du polymère pour la floculation. À l'étape (b), le processus de vieillissement a progressé pendant plusieurs heures et les chaînes de polymères se sont partiellement dispersées dans la solution. L'étape (c) représente le temps optimal de vieillissement pour une solution de floculants. Après plusieurs jours, la concentration des chaînes de polymère libres a atteint un niveau d'équilibre et les chaînes se sont complètement dispersées dans la solution. L'activité du floculant a atteint un maximum d'efficacité

pour la floculation. L'étape (d) représente une longue période de vieillissement qui conduit à une perte d'activité du flocculant. Cette étape représente un changement de conformation des chaînes étendues et un maximum de stabilité en solution est atteint.

La seconde étape de la méthodologie à être évaluée est la méthode de préparation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. La Figure 3.6 montre la concentration en matières particulaires de la boue retrouvée dans chacun des dix cylindres remplis d'une suspension agitée. À partir de la méthode initiale de préparation de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer, la concentration en matières particulaires moyenne mesurée est de 54.0 ± 2.4 g/L. Avec la méthode révisée, la concentration moyenne mesurée est de 49.7 ± 0.6 g/L. Les méthodes de préparation de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer, initiales et révisées, sont présentées à l'annexe A. Dans la méthode révisée, la valeur obtenue pour la concentration en matières particulaires moyenne est très près de la valeur ciblée de 50.0 g/L. La variation est réduite significativement puisque la déviation standard est seulement de 0.6 g/L comparée à 2.4 g/L avec la méthode de préparation initiale. Puisque la vitesse de sédimentation est très sensible à la concentration en matières particulaires de la boue, la faible variabilité enregistrée pour les concentrations moyennes augmente la reproductibilité des mesures de vitesse de sédimentation. Cette vitesse décroît rapidement avec l'augmentation de la surface totale des particules pour un dosage de flocculant donné (et inversement). Chaque cylindre doit donc contenir la même quantité de matières particulaires afin de réduire la dispersion des résultats au niveau de la vitesse de sédimentation. Puisque la suspension contient deux phases, une phase solide et une phase liquide, il est important d'avoir un dispositif d'agitation permettant d'homogénéiser adéquatement la suspension.

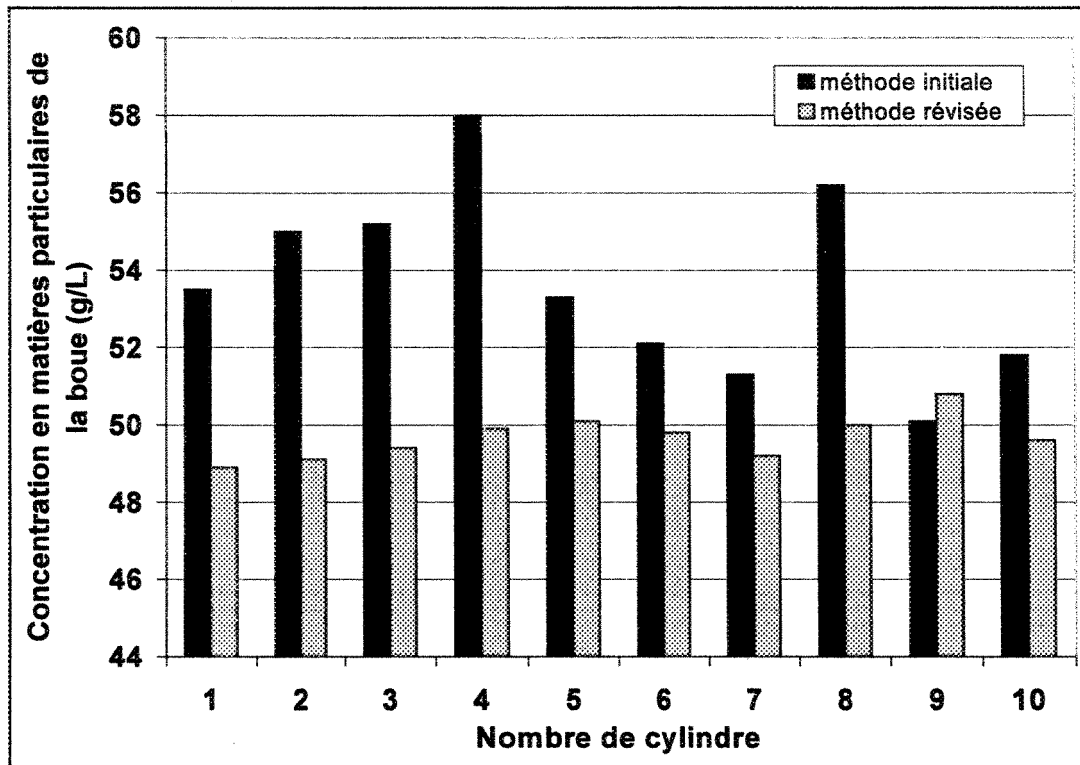


Figure 3.6 Concentration en matières particulières de la boue retrouvée dans chaque cylindre en utilisant la méthode initiale et révisée de préparation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer

Une vitesse d'agitation minimale de la suspension prévient la déposition des solides au niveau de la partie inférieure du réservoir. Cette vitesse est également connue sous le nom de vitesse critique [20]. La vitesse d'agitation est très importante pour assurer l'homogénéité d'une suspension mais il faut également considérer la hauteur de l'agitateur. La vitesse d'agitation et la hauteur de l'agitateur permettent de maximiser la suspension des solides. Les valeurs optimales, de hauteur et de vitesse d'agitation, seraient reliées à la coexistence de deux phénomènes : l'écoulement radial et l'écoulement axial produit par le fonctionnement de l'agitateur. Ces deux phénomènes entraînent la

formation de deux zones distinctes dans le réservoir [21]: la zone de pompage (associée à l'écoulement axial) et la zone de recirculation (associée à l'écoulement radial). Par exemple, si la taille de la zone de recirculation est plus petite que la hauteur totale du réservoir, cette zone isole la partie inférieure et la partie supérieure du réservoir affectant négativement la suspension des solides. Ces zones isolées entraînent la déposition des particules solides dans le réservoir et provoquent la diminution de la concentration particulaire de la suspension.

Le choix de l'agitateur est donc important pour maintenir l'homogénéité d'une suspension aqueuse. Les agitateurs à écoulement axial sont supérieurs aux agitateurs à écoulement radial pour maintenir des solides en suspension [21]. Évidemment, plusieurs autres variables influencent la performance d'une agitation [21]. En particulier, il faut considérer le type et le nombre d'agitateur, la géométrie du réservoir, le diamètre du réservoir et de l'agitateur, la hauteur du liquide et la distance entre les agitateurs. La prise en considération de toutes ces variables permet de déterminer des conditions optimales d'agitation dans un réservoir pour obtenir une suspension homogène.

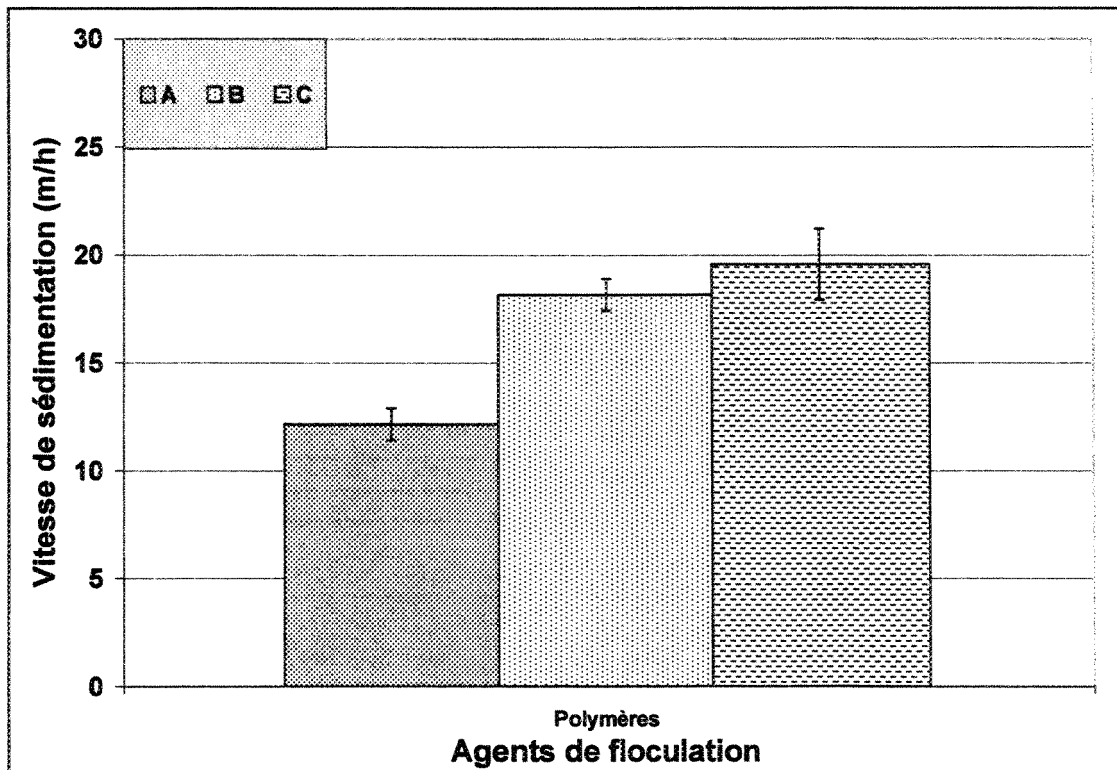


Figure 3.7 Vitesses de sédimentation retardée obtenues pour dix essais répétitifs et trois agents de floculation différents en utilisant la méthodologie révisée du test du cylindre

La Figure 3.7 montre les résultats de sédimentation retardée obtenus pour une série de dix essais, effectués dans les mêmes conditions expérimentales, en utilisant trois polymères différents (A, B, C). Dans chaque cas, l'étalement des résultats est considérablement réduit particulièrement pour le polymère A et B avec des vitesses de sédimentation variant respectivement de 11 à 13 m/h et de 17 à 19 m/h. Pour le polymère C, l'étalement est aussi largement réduit puisque les vitesses varient entre 17 et 22 m/h. La déviation standard calculée avec une limite de confiance de 99% [17], sur les vitesses de sédimentation moyennes, est de l'ordre de 0.74 m/h pour le polymère A, de 0.74 m/h pour le polymère B et de 1.7 m/h pour le polymère C. La méthodologie révisée a permis de

réduire de 47% la variabilité des résultats pour le polymère A, de 75% pour le polymère B et de 78% pour le polymère C en comparant les résultats obtenus avec la méthodologie initiale. Tous ces résultats démontrent une amélioration importante du niveau de reproductibilité de la méthodologie révisée. La méthode révisée permet maintenant de reproduire des essais dans les mêmes conditions expérimentales. Des écarts de 5% et moins sont obtenus pour des vitesses de sédimentation entre un polymère d'essai et un polymère témoin. Il devient alors possible de réaliser une étude comparative sur la clarté d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer par floculation.

3.1.2. Mesures et paramètres

La vitesse de sédimentation est la première mesure déterminée par la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges. Le temps de passage de la ligne de boue, entre deux graduations du cylindre, est enregistré à l'aide d'un chronomètre. Les lectures sont prises entre 950 et 500 mL, à tous les 50 mL, dans la portion du cylindre où se retrouve la zone de sédimentation constante. La hauteur de l'interface est ensuite portée sur un graphique en fonction du temps. La pente de la courbe expérimentale obtenue est associée à la vitesse de sédimentation exprimée en mètre par heure (m/h). Les vitesses ciblées sont de l'ordre de 10 à 20 m/h pour le procédé actuel. Cette mesure est fixée par Alcan International afin de contrôler la quantité de matière à la sortie des décanteurs.

Un paramètre important est le dosage des agents de floculation. Ce paramètre permet de fixer la vitesse de sédimentation retardée. Un volume de floculants requis pour atteindre une vitesse de sédimentation retardée entre 10 et 20 m/h est déterminé et un dosage correspondant est calculé. Le

dosage est exprimé en gramme par tonne. Il est défini comme étant la quantité de floculant (g) actif nécessaire pour flocculer une tonne de boue sèche. Ce paramètre est important pour l'industrie puisqu'il permet d'évaluer les coûts de production associés au type de floculants utilisés pour la séparation par floculation.

Plusieurs autres mesures sont également importantes pour l'évaluation de l'efficacité de la floculation. Comme mentionné à la section 1.3, un dosage optimal est observé lorsqu'une turbidité minimale est obtenue lors d'une séparation solide-liquide par floculation [7]. La turbidité est mesurée en introduisant un échantillon de surverse dans un turbidimètre. Elle se mesure en faisant passer un faisceau lumineux à travers l'échantillon à tester. La turbidité est déterminée en mesurant la lumière qui est déviée par les particules en suspension. La lecture obtenue correspond à la réduction de la transparence optique d'une solution due à la présence de particules en suspension dans l'échantillon. La calibration de cet appareil est effectuée à l'aide d'un polymère nommé formazine. Cette calibration permet d'obtenir des résultats en unités internationales (NTU) requises pour standardiser les résultats obtenus en usine. En effet, afin de pouvoir comparer les résultats de cette étude avec les résultats obtenus actuellement en usine, l'utilisation des mêmes unités est indispensable.

La quantité de matières en suspension filtrable est également une mesure utile lors de l'évaluation de l'efficacité de la floculation. Elle permet d'exprimer la clarté de l'échantillon de surverse. Un volume mesuré de surageant est prélevé et filtré sur une membrane filtrante de 0,45 μm (dispositif millipore). Le filtre est ensuite lavé et finalement séché dans une étuve (à 40 °C) pour

éliminer toutes traces d'eau de l'échantillon. Le filtre est ensuite pesé afin d'obtenir la quantité de particules non dissoutes dans la surverse. La concentration en matières particulaires de la surverse est exprimée en milligramme par litre (mg/L). Cette mesure permet d'évaluer quantitativement les matières particulaires en suspension dans la surverse. Elle revêt un caractère important pour l'étape de filtration subséquente dans le procédé.

La filtrabilité se définit comme étant la facilité à éliminer efficacement les particules en suspension d'une solution. La filtration est effectuée au moyen d'une pompe dont le niveau de vide est maintenu constant. Pour les échantillons de surverse, la filtration relative est utilisée. La filtration relative est définie comme étant le rapport du temps de filtration d'un échantillon de surverse divisé par le temps de filtration de la phase liquide provenant de la filtration de l'échantillon. La filtrabilité est donc une indication de la facilité avec laquelle la liqueur peut être séparée des particules solides par filtration. Cette mesure revêt un caractère important dans l'étape de filtration du procédé Bayer. En effet, la filtration étant une étape critique du procédé, tous les problèmes reliés à cette étape doivent être mis en évidence.

La concentration en matières particulaires du sédiment obtenue après décantation de la suspension est également une mesure importante pour l'industrie. Cette mesure permet d'évaluer le niveau d'efficacité de la compaction. Une compaction efficace limite les pertes de caustique et d'hydrate aux lacs de boue. Toute augmentation de la concentration de matières solides à la sortie des décanteurs est aussi garant d'une saine disposition des résidus de boue rouge, aussi bien en terme de gestion routinière des sites d'empilement que de longévité accrue de ces sites (un

empilement plus compact nécessite donc un volume de disposition plus restreint). Il est par conséquent très important d'évaluer la concentration particulaire du sédiment pour tous les différents essais de floculation effectués pendant cette étude.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les objectifs de ce projet de recherche sont d'effectuer des essais de floculation dans un cylindre, en changeant différentes variables afin d'établir des conditions optimales de séparation solide-liquide et de réduire la quantité de matières particulaires en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à celui retrouvé actuellement en usine. Les travaux de certains chercheurs [3] ont démontré que la turbidité résiduelle obtenue lors de la floculation n'est pas uniquement fonction de l'efficacité de l'agent flocculant mais dépend également de l'interaction possible entre plusieurs agents de floculation. Par contre, d'autres variables sont aussi à considérer. Dans la première partie du chapitre 4, les résultats obtenus aux conditions des décanteurs secondaires (les laveurs) seront présentés. Dans la seconde partie de ce chapitre, les résultats obtenus en usine aux conditions du décanteur à haut rendement (DHR) seront présentés et discutés.

4.1. Décanteurs secondaires (laveurs)

Tous les essais présentés dans cette section du chapitre 4 ont été effectués aux conditions d'opération retrouvées en usine, au niveau des décanteurs secondaires ou laveurs. La concentration de la liqueur Bayer est fixée à 10 g/L de caustique et la température du mélange est maintenue à la température ambiante soit environ 21 °C. La pulpe utilisée pour ces essais a été antérieurement floculée et décantée. Puisque la pulpe a déjà subi une ou plusieurs floculation, 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 floculer les matières particulaires en suspension lorsque l'on compare au dosage nécessaire pour floculer une pulpe d'extraction n'ayant jamais été floculée. Les polymères (A, B et C) utilisés pour cette partie des expérimentations sont modérément anioniques (voir section 1.3).

Tous les échantillons de surverse obtenus durant cette étude ont été filtrés et pesés pour obtenir la concentration en matières particulaires de la surverse (mg/L). La valeur obtenue permet d'exprimer la clarté de l'échantillon. Les résultats sont portés sur un graphique en fonction de la turbidité correspondante. La Figure 4.1 présente la turbidité moyenne en fonction de la concentration moyenne en matières particulaires de la surverse. Cette figure met en évidence une relation linéaire entre la concentration en matières particulaires de la surverse et la turbidité.

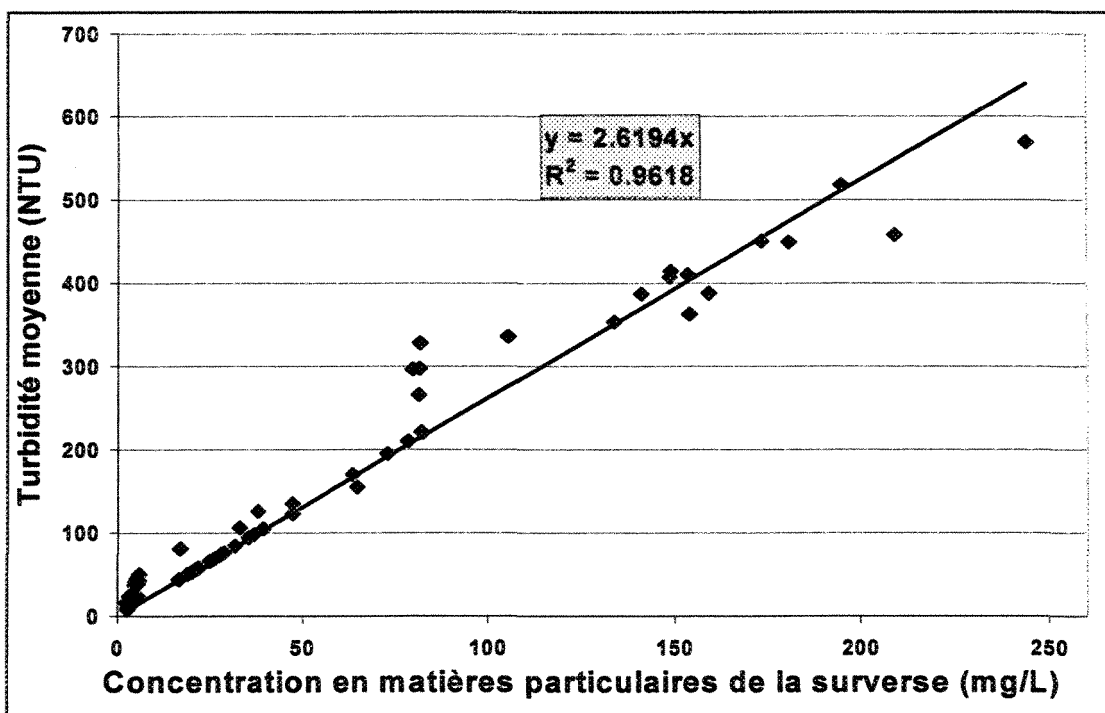


Figure 4.1 Turbidité moyenne en fonction de la concentration moyenne en matières particulaires de la surverse

4.1.1. Concentration de l'agent de floculation

Tous les essais présentés dans cette section du chapitre 4 ont été réalisés avec un dosage fixé de polymère mais le volume varie en fonction de la concentration du polymère. Les différentes concentrations des polymères (A, B et C) sont 0,50 % p/p, 0,25 % p/p, 0,025 % p/p, 0,010 % p/p et 0,0050 % p/p.

La Figure 4.2 présente les déviations standards calculées des vitesses de sédimentation retardée obtenues pour une série de dix essais, effectuée sous les mêmes conditions expérimentales, avec trois polymères (A, B, C) à cinq concentrations différentes (en % p/p). La

déviations standard calculées sur les vitesses de sédimentation est de l'ordre de $\pm 2,0$ m/h à 0,50 % p/p, de $\pm 1,8$ m/h à 0,25 % p/p, de $\pm 0,90$ m/h à 0,025 % p/p, de $\pm 0,90$ m/h à 0,010 % p/p et de $\pm 1,1$ m/h à 0,0050 % p/p pour le polymère A, de $\pm 6,6$ m/h à 0,50 % p/p, de $\pm 3,0$ m/h à 0,25 % p/p, de $\pm 1,5$ m/h à 0,025 % p/p, de $\pm 1,3$ m/h à 0,010 % p/p et de $\pm 1,9$ m/h à 0,0050 % p/p pour le polymère B et de $\pm 4,2$ m/h à 0,25 % p/p, de $\pm 2,9$ m/h à 0,025 % p/p, de $\pm 2,2$ m/h à 0,010 % p/p et de $\pm 1,2$ m/h à 0,0050 % p/p pour le polymère C. La Figure 4.2 met en évidence la diminution de la déviation standard en fonction de la diminution de la concentration du polymère. Les résultats démontrent qu'une meilleure dispersion du polymère dans la suspension de boue rouge est obtenue par dilution de la solution de polymère. L'amélioration de la dispersion provient d'une diminution de la viscosité de la solution de polymère [18]. Pour ces raisons, la série d'essais à 0,50 % p/p n'a pu être réalisée avec le polymère C. Aucune vitesse de sédimentation n'est obtenue à cette concentration du polymère C en raison de la viscosité très élevée de la solution. Une légère augmentation de la déviation standard est observée à une concentration de 0,0050 % p/p (pour les trois polymères) due à la dilution de la suspension de boue rouge et de liqueur Bayer. Le volume injecté en solution est important (~ 25 ml) ce qui produit une dilution la suspension de boue rouge entraînant une augmentation de la quantité de flocculant nécessaire pour flocculer les matières particulaires en suspension (dosage surévalué). Par conséquent, ceci entraîne une perte de reproductibilité entre les différents essais. La concentration de polymère retenue pour l'ensemble de cette étude est de 0,010 % p/p en raison de la diminution de la variabilité des résultats de sédimentation retardée pour les trois polymères utilisés.

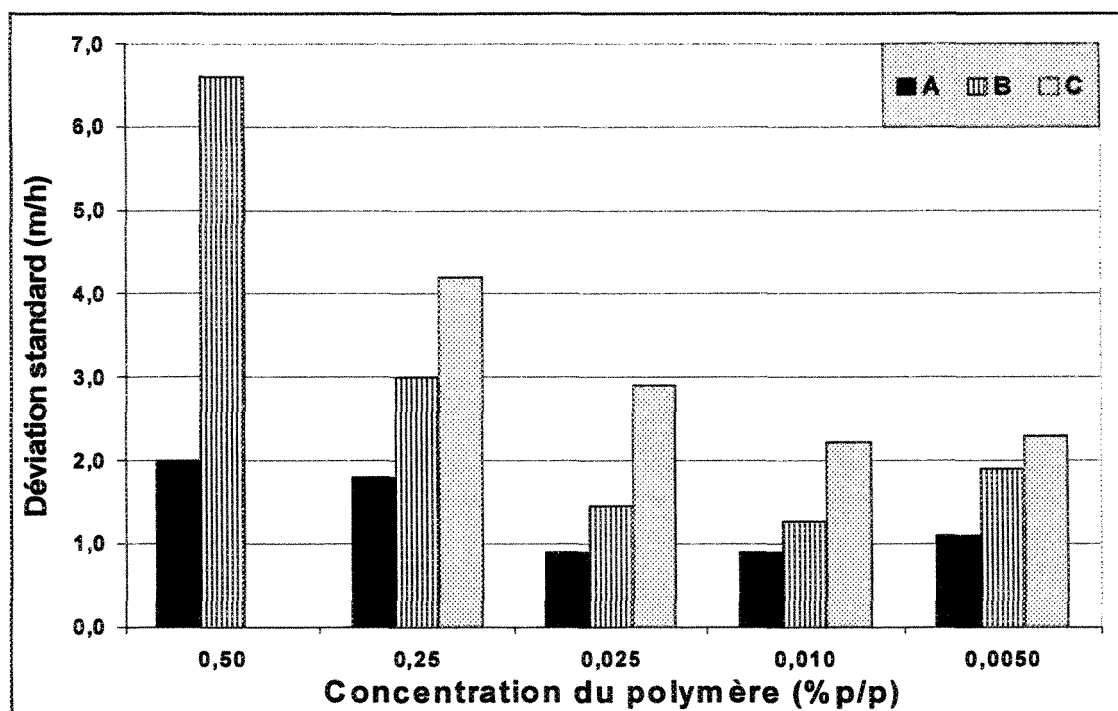


Figure 4.2 Déviations standards calculées des vitesses de sédimentation retardée obtenues pour une série de dix essais (avec trois polymères) en fonction de la concentration du polymère

La Figure 4.3 présente la turbidité de la surverse en fonction de la concentration du polymère. Ce graphique met en évidence une augmentation de la turbidité de la surverse en fonction de l'augmentation de la concentration du polymère. Ce phénomène [18] s'explique facilement par l'amélioration de la dispersion du polymère à travers la suspension causée par une diminution de la viscosité (dilution de la solution) de la solution de polymère. 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 [18]. Une légère augmentation de la turbidité est observée à une concentration de 0,0050 % p/p (pour les trois polymères) probablement due à la dilution de la suspension de boue

rouge et de liqueur Bayer. Dans une suspension très diluée, le polymère est moins efficace pour agglomérer les particules en suspension [9]. Comme mentionné précédemment, la Figure 4.1 met en évidence une relation linéaire entre la concentration en matières particulaires de la surverse et la turbidité. En portant sur un graphique la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration du polymère, la même tendance peut être observée (même tendance que sur la Figure 4.3).

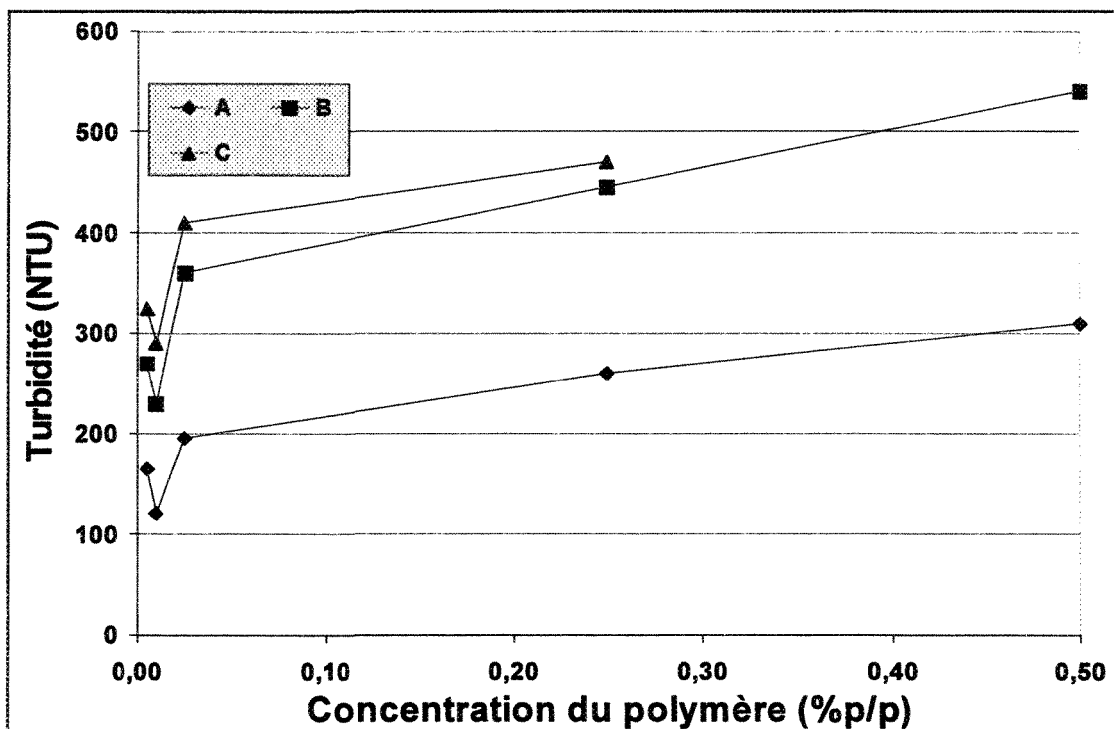


Figure 4.3 Turbidité de la surverse en fonction de la concentration du polymère

La Figure 4.4 présente la filtration relative en fonction de la concentration du polymère. Ce graphique met en évidence une diminution de la filtration relative en fonction de l'augmentation de la concentration du polymère. Comme mentionné précédemment, une amélioration de la dispersion du polymère à travers la suspension est observée avec la diminution de la concentration du polymère

(diminution de la viscosité). Par conséquent, les polymères sont dispersés plus également dans la suspension. Cette observation permet d'émettre l'hypothèse selon laquelle une quantité inconnue de polymères n'interagit pas avec les particules en suspension et demeurent en solution. Lors de la filtration, ces particules de polymère s'attachent à la membrane filtrante et entraînent un « colmatage » du filtre.

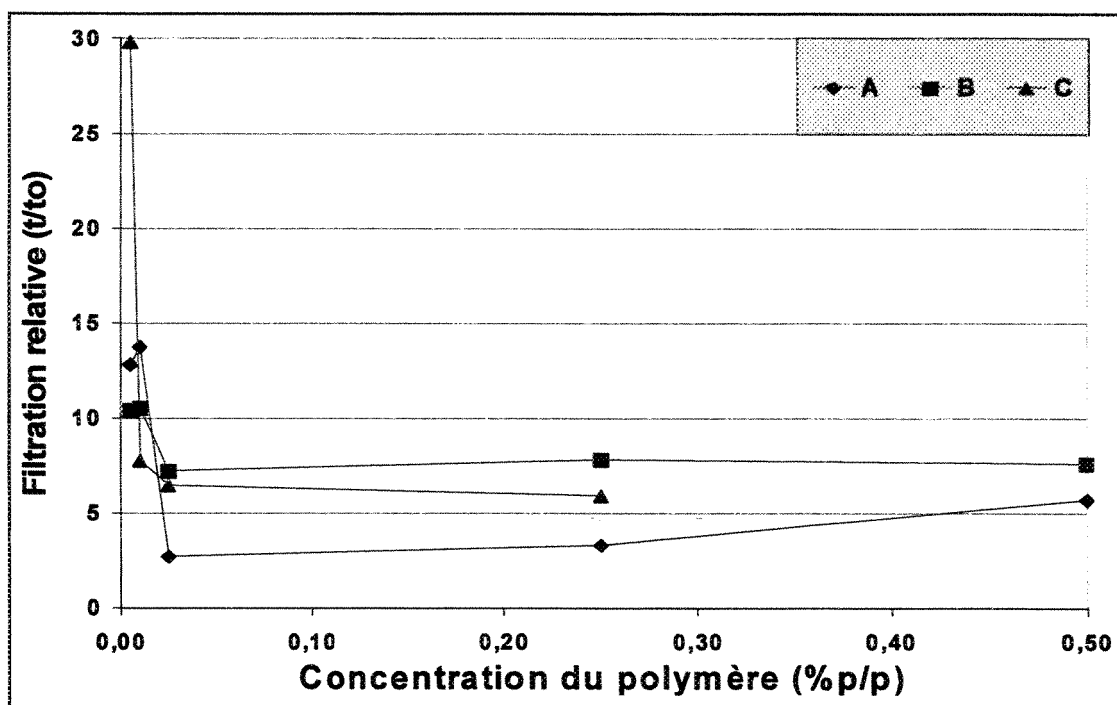


Figure 4.4 Filtration relative de la surverse en fonction de la concentration du polymère

La Figure 4.5 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction de la concentration du polymère. Les résultats moyens de compaction obtenus pour le polymère A sont de 212 ± 4 g/L à 0,50 %p/p, de 206 ± 3 g/L à 0,25 %p/p, de 215 ± 4 g/L à 0,025 %p/p, de 206 ± 3 g/L à 0,010 %p/p et de 209 ± 4 g/L à 0,0050 %p/p. Pour le polymère B, les résultats moyens sont de 305 ± 11 g/L à 0,50 %p/p, de 290 ± 9 g/L à 0,25 %p/p, de 300 ± 10 g/L à

0,025 %p/p, de 305 ± 12 g/L à 0,010 %p/p et de 298 ± 10 g/L à 0,0050 %p/p. Les résultats moyens obtenus pour le polymère C sont de 280 ± 6 g/L à 0,25 %p/p, de 292 ± 9 g/L à 0,025 %p/p, de 283 ± 7 g/L à 0,010 %p/p et de 290 ± 10 g/L à 0,0050 %p/p. Ce graphique ne démontre aucune tendance entre la concentration en matières particulaires du sédiment et la concentration de chaque solution de polymère. Évidemment, tous les polymères n'ont pas la même efficacité pour compacter le sédiment. Les polymères B et C sont plus efficaces que le polymère A.

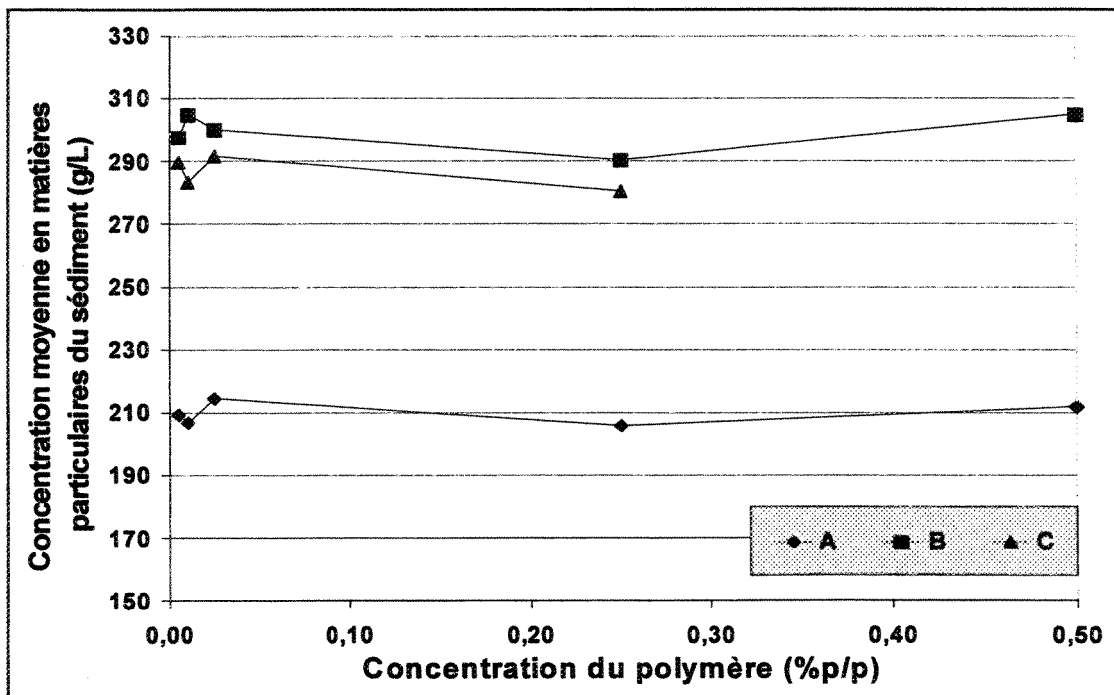


Figure 4.5 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction de la concentration du polymère

4.1.2. Double addition d'un mélange de polymère

Dans le cas de la double addition d'un mélange de polymère, l'ajout des polymères s'effectue en deux séquences d'injection (AB, BA, BC, CB, AC, CA) avec trois différents polymères (A, B et C) utilisés par Alcan International. Les pourcentages (%) des différents polymères dans le mélange sont 50-50, 25-75 et 75-25. Afin d'évaluer la quantité de polymère nécessaire pour le mélange, le volume de polymères requis pour atteindre une vitesse de sédimentation retardée se situant entre 10 et 20 m/h doit être déterminé. Lorsque ce volume est connu, le dosage correspondant peut être calculé. Pour tous les essais en double addition d'un mélange de polymère, le dosage et le volume correspondant (vitesse de sédimentation retardée entre 10 et 20 m/h) sont de 32 g/t (16 mL) pour le polymère A, de 24 g/t (12 mL) pour le polymère B et de 16 g/t (8,0 mL) pour le polymère C.

La Figure 4.6 présente la turbidité moyenne de la surverse obtenue en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange. Le mélange AB (75-25) a permis d'obtenir le plus bas résultat de turbidité. Le dosage des agents de floculation est de 26 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La turbidité moyenne mesurée pour ce mélange est de 123 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 47,3 mg/L. Les résultats moyens de turbidité obtenus avec les polymères individuels (pourcentage de 100%) sont de $\sim 210 \pm 3$ NTU pour le polymère A et de $\sim 300 \pm 4$ NTU pour le polymère B. Le mélange AB (75-25) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. De plus, ce graphique met en évidence l'efficacité des séquences AB et BA pour réduire la turbidité d'une suspension. Ces agents de floculation (A et B) semblent avoir des interactions (polymère-polymère) qui permettent d'augmenter l'efficacité des polymères individuels. Toutes les autres séquences

d'injection semblent peu efficaces puisqu'elles ne permettent pas de réduire la turbidité de la surverse à un niveau inférieur à celui obtenu avec chaque polymère individuellement.

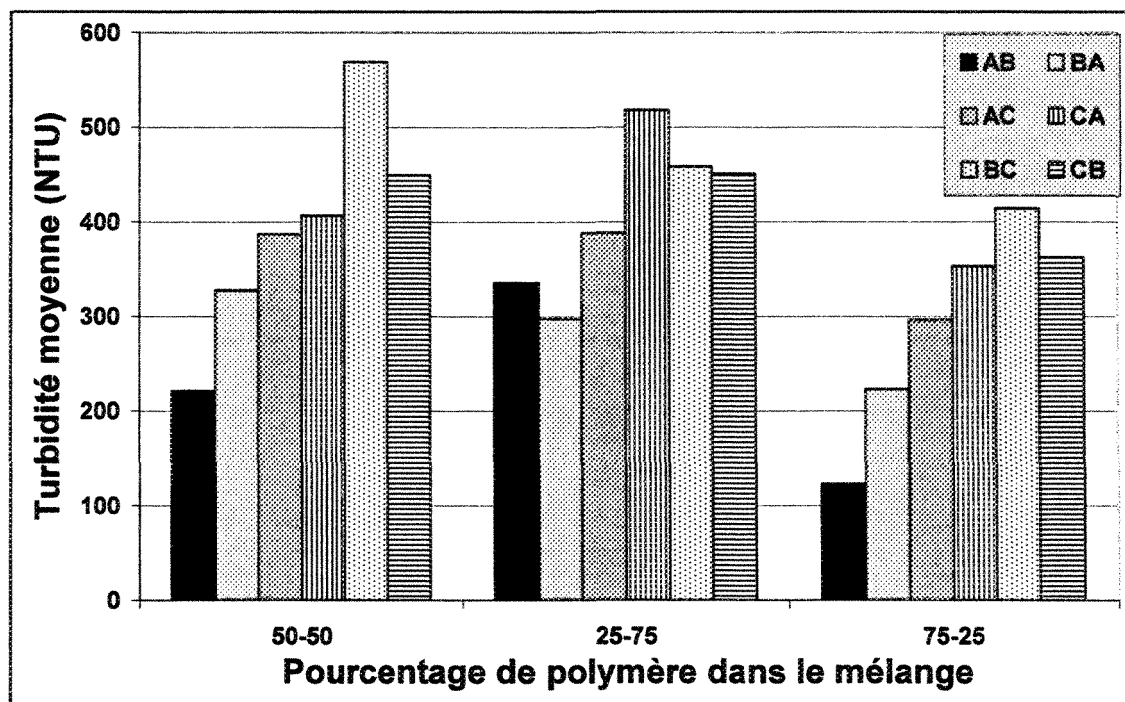


Figure 4.6 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange

La Figure 4.7 présente la filtration relative de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange. Ce graphique met en évidence une augmentation de la filtration relative pour les séquences d'injection dont les pourcentages de polymères dans le mélange sont de 25-75%. Tous les essais contenant du polymère A sont plus difficiles à filtrer et plus particulièrement les essais où le polymère A est ajouté en seconde injection (BA et CA). Les moyennes calculées pour la filtration relative sont de 7,9 pour le mélange BA (25-75) et de 6,6 pour le mélange CA (25-75). La

filtration des échantillons de surverse, ayant été floculée avec le polymère A (100%), est généralement plus difficile à effectuer. Les résultats de filtration obtenus sont de l'ordre de $\sim 6,0$.

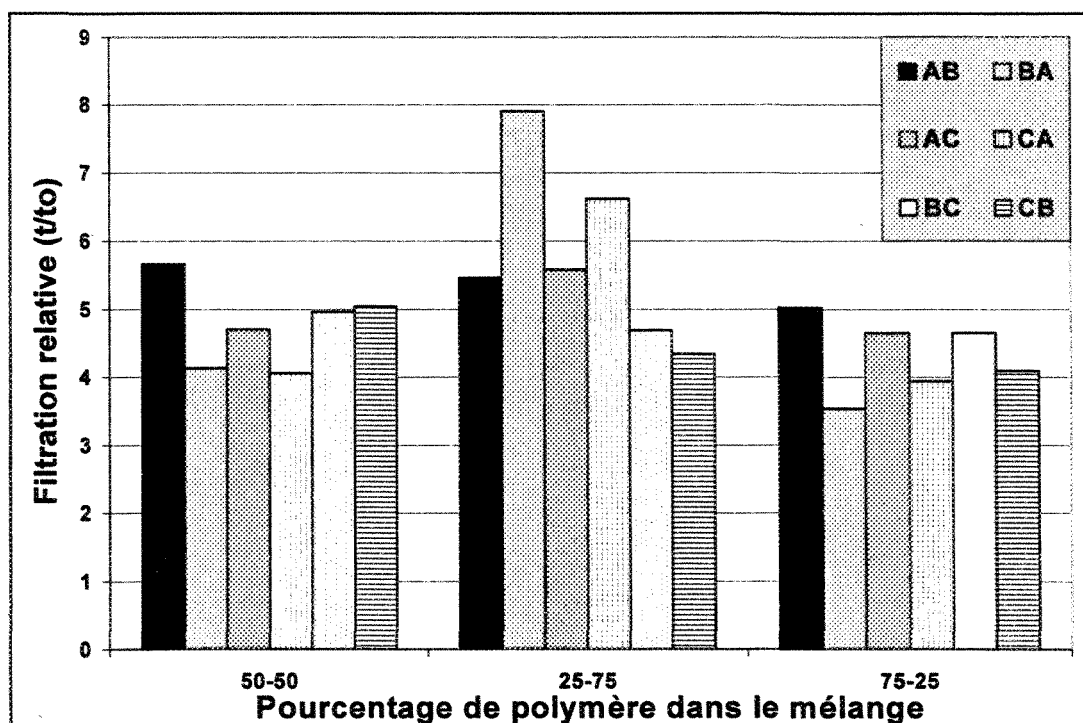


Figure 4.7 Filtration relative de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange

La Figure 4.8 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange. Les résultats de compaction obtenus en utilisant le polymère A (100%) sont toujours moins élevés. Les concentrations moyennes en matières particulaires sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%), de 312 ± 10 g/L pour le polymère B (100%) et de 278 ± 8 g/L pour le polymère C (100%). Le résultat le moins élevé, obtenu pour cette série d'essais, est de 265 ± 7 g/L. Ce résultat a été obtenu avec le mélange AC (75-25) dont le

pourcentage de polymère A est plus important. L'ajout de polymère B ou C, même en pourcentage plus faible, semble améliorer de façon considérable les résultats de compaction. Tous les résultats obtenus de cette série d'essais démontrent une amélioration de la compaction pour tous les mélanges contenant le polymère A.

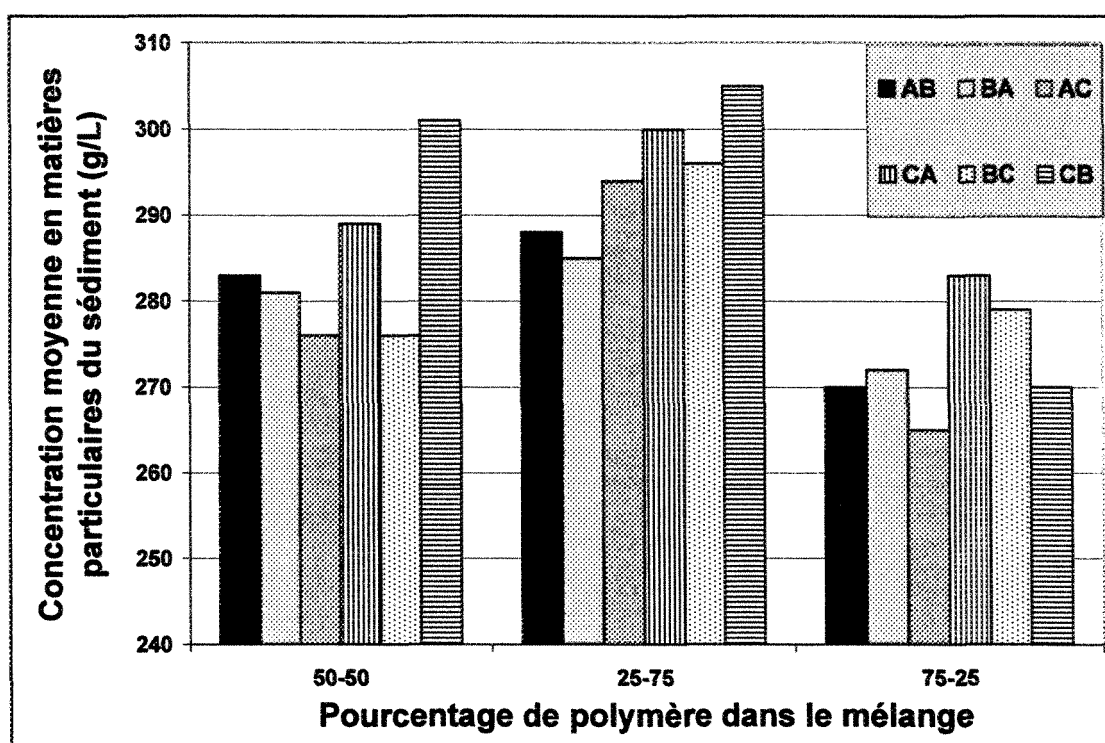


Figure 4.8 Concentration moyenne de matières particulaires du sédiment en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essais sont de $11,2 \pm 1,1$ m/h pour la séquence d'injection AB (50-50), de $18,1 \pm 2,9$ m/h pour AB (25-75), de $8,0 \pm 1,4$ m/h pour AB (75-25), de $10,5 \pm 1,3$ m/h pour BA (50-50), de $16,0 \pm 2,0$ m/h pour BA (25-75), de $8,1 \pm 1,2$ m/h pour BA (75-25), de $16,4 \pm 1,5$ m/h pour AC (50-50), de $21,5 \pm 2,2$ m/h pour AC (25-75), de $9,1$

$\pm 0,82$ m/h pour AC (75-25), de $9,1 \pm 0,82$ m/h pour CA (50-50), de $24,4 \pm 3,1$ m/h pour CA (25-75), de $9,2 \pm 0,98$ m/h pour CA (75-25), de $11,4 \pm 1,5$ m/h pour BC (50-50), de $21,0 \pm 2,5$ m/h pour BC (25-75), de $8,2 \pm 1,2$ m/h pour BC (75-25), de $12,0 \pm 2,4$ m/h pour CB (50-50), de $19,6 \pm 5,0$ m/h pour BC (25-75) et de $6,3 \pm 1,1$ m/h pour BC (75-25). Les vitesses de sédimentation observées varient de 6,3 à 24,4 m/h. Généralement, les mélanges contenant un pourcentage plus important des polymères B et C ont des résultats de sédimentation (vitesses) plus élevés qu'avec l'utilisation du polymère A. Les polymères B et C produisent des flocons plus volumineux qui sédimentent plus rapidement.

En résumé, le meilleur résultat obtenu pour les essais en double addition d'un mélange de polymère est AB (75-25). Le dosage des polymères est de 26 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La vitesse de sédimentation retardée moyenne est de $8,0 \pm 1,4$ m/h et la turbidité moyenne est de 123 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 47,3 mg/L. La turbidité moyenne obtenue pour une série d'essais utilisant le polymère A (100%) est de ~ 210 NTU. Ce polymère est le plus efficace des trois polymères utilisés pour réaliser cette étude. En se basant sur les résultats mentionnés précédemment, le mélange AB (75-25) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge. La filtration relative moyenne, pour cet essai, est de 5.02. Ce résultat est efficace par rapport aux résultats de filtration obtenus en utilisant les polymères A (6,8) et B (5,0) individuels (100%). La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, obtenue pour le mélange AB (75-25), est de 270 ± 7 g/L. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment est de 208 ± 5 g/L pour le

polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B (100%). Le polymère A est le moins efficace des trois polymères pour compacter le sédiment tandis que le polymère B est le plus efficace. Le résultat de compaction obtenu du mélange AB (75-25) est donc moyennement efficace.

Pour tous les essais en double addition d'un mélange de polymère, les pourcentages (%) des différents polymères dans le mélange sont 50-50, 25-75 et 75-25. La série d'essais suivante a été effectuée afin de déterminer si le mélange AB (75-25) est réellement le mélange le plus efficace. Pour ce faire, la séquence d'injection AB est testée avec les pourcentages de polymère intermédiaires suivants : 50-50, 65-35, 75-25, 80-20 et 90-10.

La Figure 4.9 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange. Les résultats de turbidité ont démontré que le mélange le plus efficace est AB (75-25). Le dosage des polymères est de 23 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La turbidité moyenne obtenue pour ce mélange est de 106 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 32,8 mg/L. Par conséquent, les pourcentages de polymères 75-25, de la séquence d'injection AB, sont les plus efficaces pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus lors de la première série d'essais en double addition d'un mélange de polymère. Ceci permet de croire que la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges est reproductible.

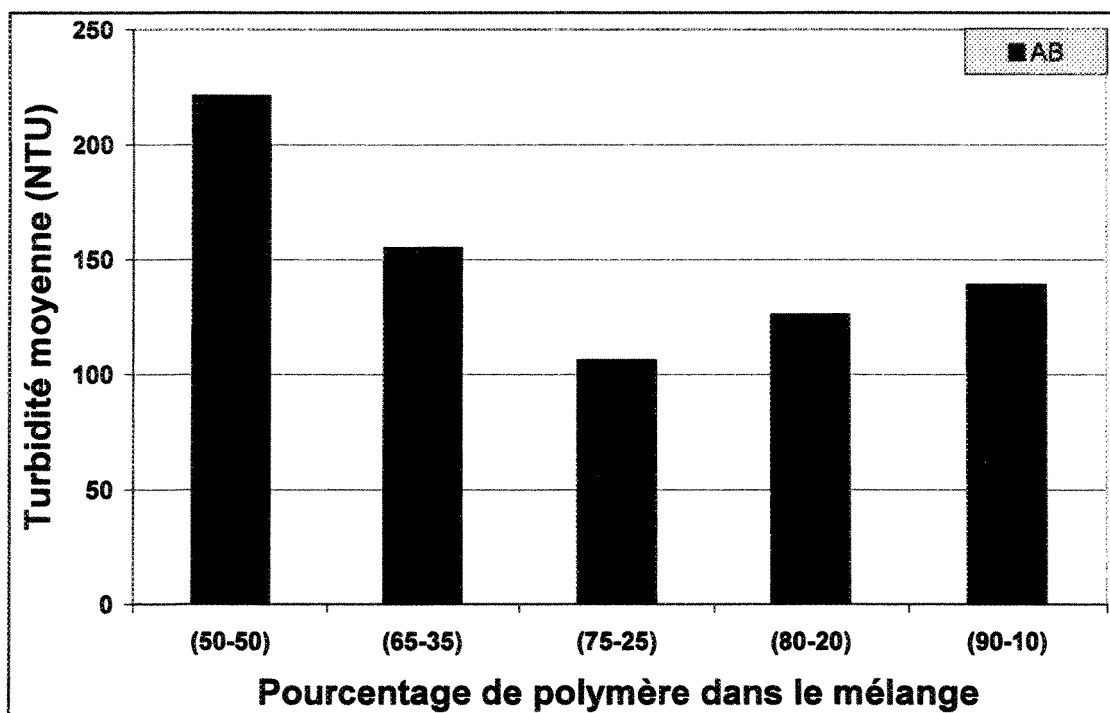


Figure 4.9 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange

La Figure 4.10 présente la filtration relative de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange. Ce graphique met en évidence une augmentation de la filtration relative pour les mélanges dont le pourcentage de polymère A est plus élevé. La filtration relative moyenne, pour le mélange AB (75-25), est de 5.12. Ce résultat de filtration concorde avec le résultat obtenu lors de la première série d'essais en double addition d'un mélange de polymère.

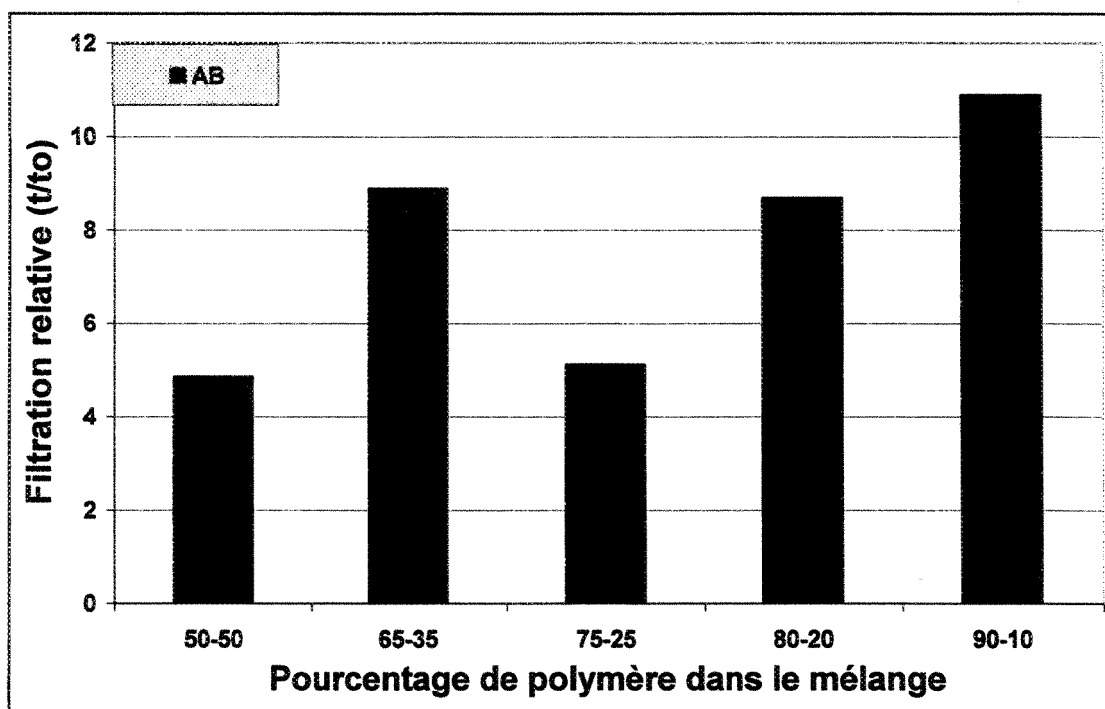


Figure 4.10 Filtration relative de la surverse en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange

La Figure 4.11 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, pour le mélange AB (75-25), est de 274 ± 7 g/L. Ce résultat de compaction concorde avec le résultat obtenu de la première série d'essais en double addition d'un mélange de polymère. Ce résultat permet de croire en la reproductibilité de la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges.

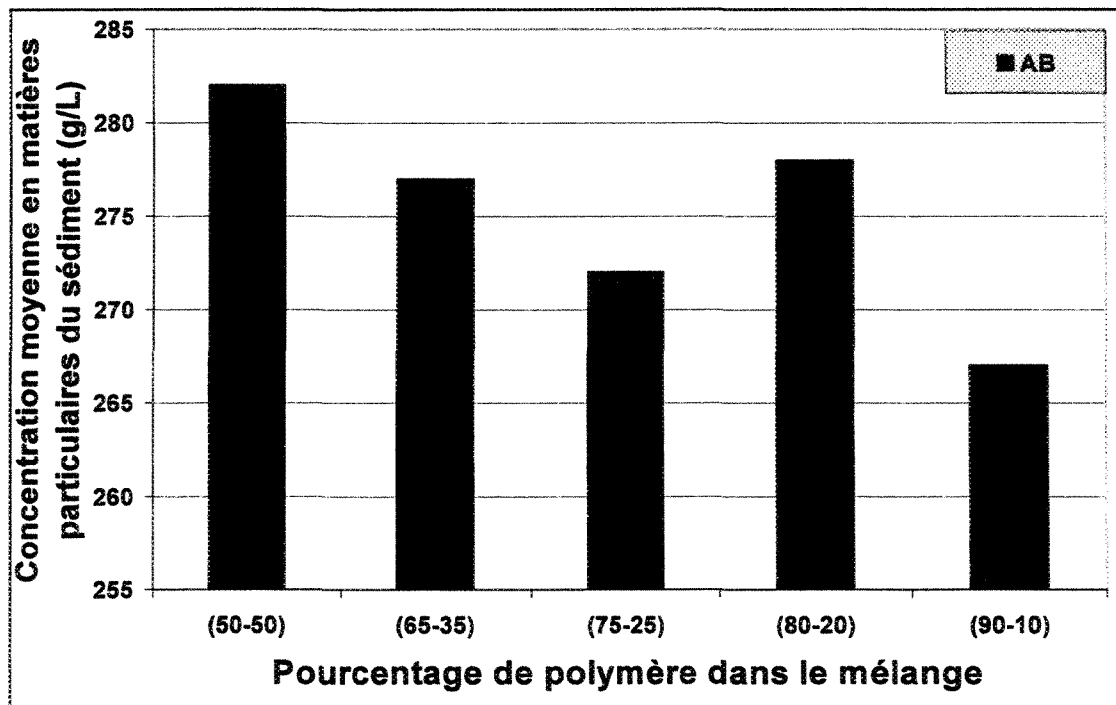


Figure 4.11 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du pourcentage de polymère dans le mélange

Les vitesses de sédimentation retardée moyennes obtenues pour cette série d'essai sont de $5,7 \pm 0,47$ m/h pour le mélange AB (75-25), de $11,2 \pm 1,1$ m/h pour AB (50-50), de $11,8 \pm 1,1$ m/h pour AB (65-35), de $8,5 \pm 0,87$ m/h pour AB (80-20) et de $8,2 \pm 1,4$ m/h pour AB (90-10). La vitesse obtenue pour le mélange AB (75-25) est légèrement plus lente que celle obtenue lors de la première série d'essais en double addition d'un mélange de polymère.

4.1.3. Triple addition d'un mélange d'agents de floculation

Des essais préliminaires ont été réalisés pour chaque nouvel agent de floculation. Ces essais permettent d'évaluer la séquence d'injection la plus efficace ainsi que le volume d'agents de floculation nécessaire pour réduire la turbidité d'une surverse de façon significative. Chaque essai préliminaire est reproduit une seule fois afin de réduire la quantité d'essais réalisée durant cette étude. Si les résultats de turbidité sont supérieurs à ceux obtenus en double addition d'un mélange de polymère ($>106 \pm 2$ NTU), aucune série d'essais n'est réalisée avec cet agent de floculation.

Les essais préliminaires sont présentés dans un tableau contenant toutes les informations utiles pour évaluer l'efficacité de la floculation. Dans le Tableau 4.1, la colonne « Type de floculant » indique le type d'agents de floculation ainsi que la séquence d'injection utilisée pour réaliser chaque essai. La colonne « Agitation » informe sur le nombre de coups de piston ainsi que sur la vitesse du piston pour chaque injection. Par exemple, « 3R » signifie trois coups de piston rapide (L signifie lent). Le volume (mL) de chaque agent de floculation ajouté à la suspension est indiqué à la colonne suivante. Les trois dernières colonnes contiennent les résultats obtenus pour chaque essai soit : la vitesse de sédimentation retardée (m/h), la turbidité de la surverse (NTU) et la concentration en matières particulaires du sédiment (g/L).

Le Tableau 4.1 montre une série d'essais préliminaires effectuée en utilisant l'agent de floculation D. Dix essais ont été réalisés à différents volumes d'agents de floculation (dosage variable) et différentes séquences d'injection. Les meilleurs résultats de turbidité sont obtenus avec

la séquence d'injection DAB. Ces essais préliminaires mettent en évidence l'efficacité de cet agent de floculation puisque la turbidité obtenue, pour plusieurs essais, est inférieure à 80 NTU.

Tableau 4.1 Essais préliminaires utilisant l'agent de floculation D

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volume (mL) | Vitesse (mfh) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|-----------|-------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | D+A+B | 3R+3R+3L | 1,0+6,0+1,5 | 9,3 | 88 | 292 |
| 2 | A+D+B | 3R+3R+3L | 3,0+1,0+1,5 | — | 180 | 301 |
| 3 | D+B+A | 3R+3R+3L | 1,0+1,5+3,0 | 10,3 | 98 | 292 |
| 4 | D+A+B | 3R+3R+3L | 1,0+3,0+1,5 | 8,1 | 74 | 284 |
| 5 | D+A+B | 3R+3R+3L | 2,0+3,0+1,5 | 10,1 | 61 | 277 |
| 6 | D+A+B | 3R+3R+3L | 0,5+3,0+1,5 | 5,8 | 110 | 292 |
| 7 | D+A+B | 3R+3R+3L | 1,0+1,5+3,0 | 9,8 | 76 | 292 |
| 8 | D+A+B | 3R+3R+3L | 2,0+1,5+3,0 | 16,1 | 62 | 277 |
| 9 | D+A+B | 3R+3L+3L | 2,0+1,0+1,0 | 9,5 | 80 | 277 |
| 10 | D+A+B | 3R+3R+3L | 2,0+1,0+1,0 | 7,5 | 46 | 277 |

La Figure 4.12 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation D est de 1,0 % p/p. Les résultats de turbidité démontrent que le mélange le plus efficace est DAB (2+8+1 mL). Le dosage des agents de floculation est de 402 g/t pour l'agent D, de 15 g/t pour le polymère A et de 2 g/t pour le polymère B. La turbidité moyenne mesurée pour ce mélange est de 24 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 3,3 mg/L. Pour les essais en double addition d'un mélange de polymère, le résultat le plus concluant est AB (75-25). La turbidité moyenne obtenue pour ce mélange est de 106 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 47,3 mg/L. Le mélange DAB (2+8+1 mL) est par conséquent très efficace pour agglomérer et sédimenter les particules en suspension.

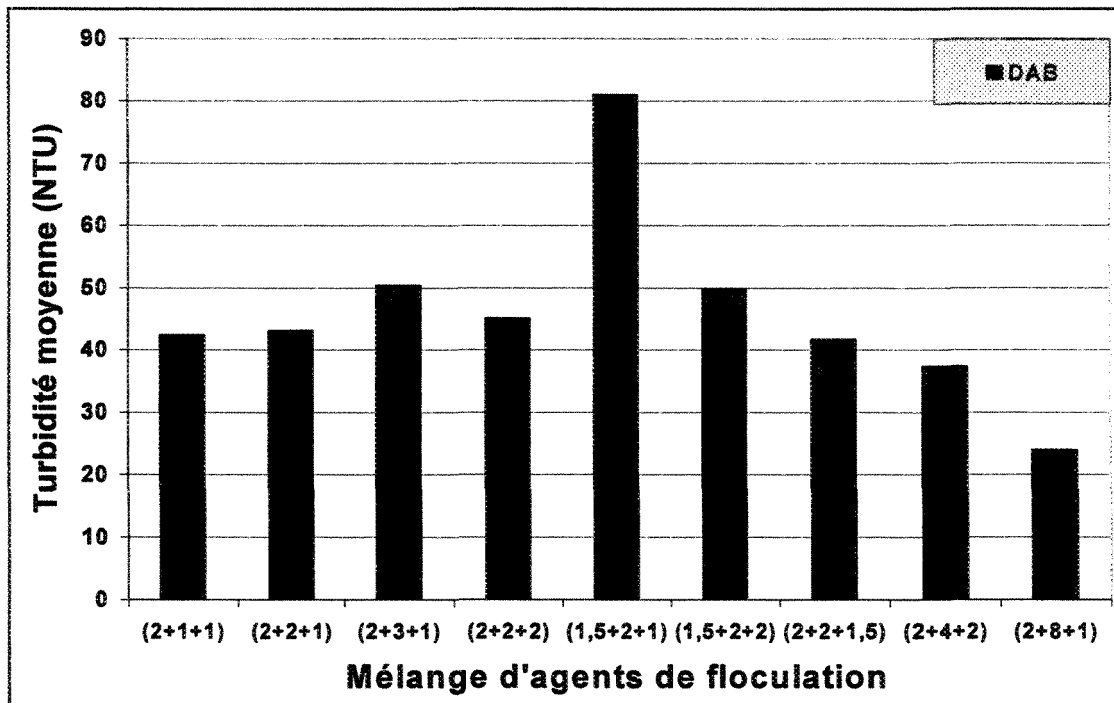


Figure 4.12 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.13 présente la filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. Ce graphique met en évidence l'augmentation de la filtration relative pour les mélanges dont le volume ajouté de polymère A est plus élevé. Tous les essais utilisant ce polymère obtiennent des résultats de filtration élevés et plus particulièrement les essais où le polymère A est ajouté à la suspension en volume plus important (8 mL). La filtration relative obtenue pour l'essai DAB (2+8+1 mL) est de 17,17. Ce résultat de filtration est particulièrement élevé. Cette observation contribue à soutenir l'hypothèse selon laquelle une quantité inconnue de polymère ou d'agents de floculation n'interagit pas avec les particules en suspension et demeurent en solution. Lors de la filtration, ces particules de polymères s'attachent à la membrane filtrante et entraînent un « colmatage » du filtre.

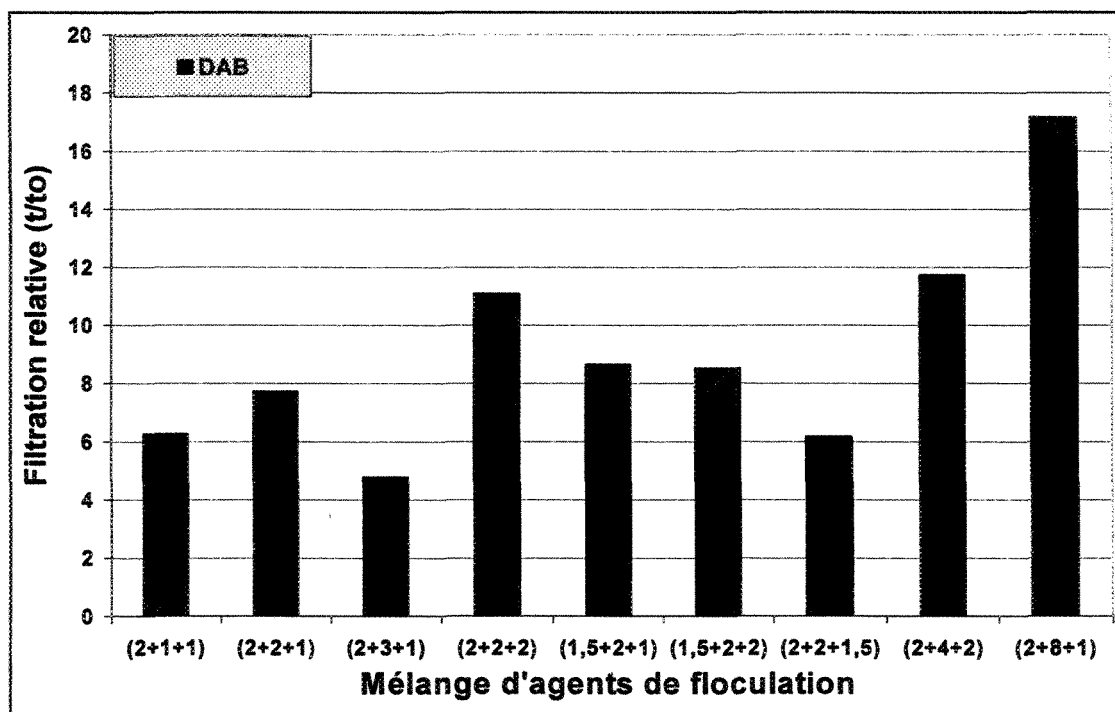


Figure 4.13 Filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.14 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne, pour l'essai DAB (2+8+1 mL), est de 252 ± 8 g/L. Les concentrations moyennes en matières particulaires du sédiment sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B (100%). Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Considérant le volume élevé (8 mL) de polymère A ajouté à la suspension, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est moyennement efficace.

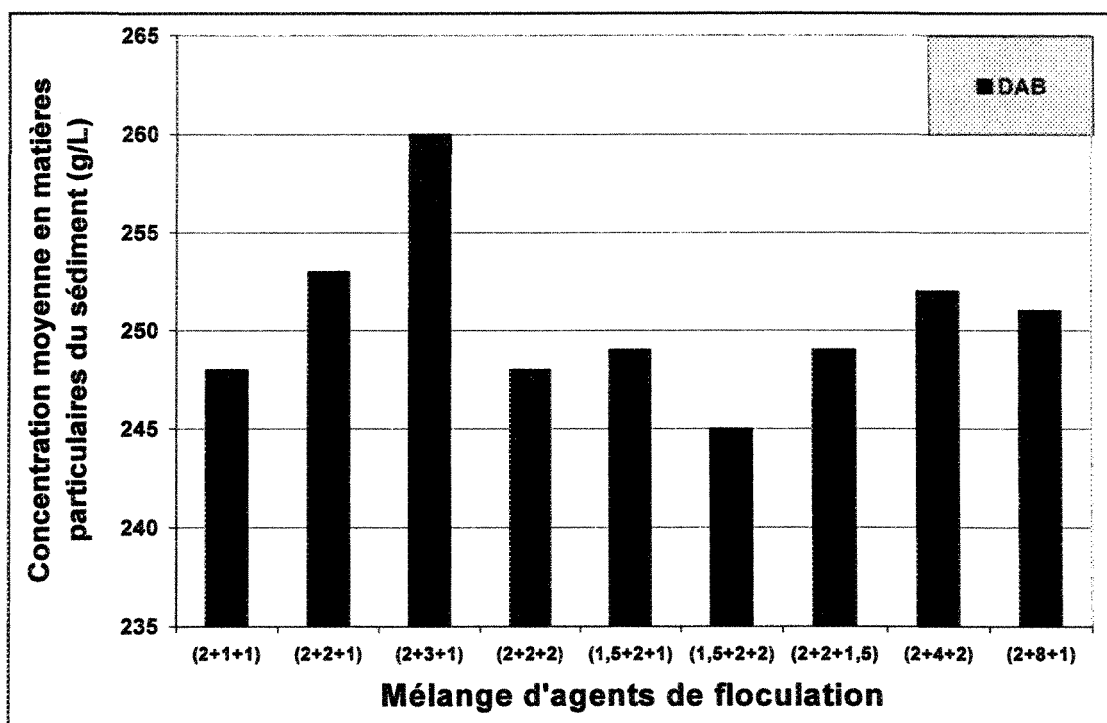


Figure 4.14 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essai sont de $5,5 \pm 0,25$ m/h pour la séquence d'injection DAB (2+1+1 mL), de $6,4 \pm 0,53$ m/h pour DAB (2+2+1 mL), de $4,8 \pm 0,28$ m/h pour DAB (2+3+1 mL), de $6,9 \pm 0,49$ m/h pour DAB (2+2+2 mL), de $5,3 \pm 0,38$ m/h pour DAB (1,5+2+1 mL), de $5,4 \pm 0,29$ m/h pour DAB (1,5+2+2 mL), de $5,7 \pm 0,38$ m/h pour DAB (2+2+1,5 mL), de $7,2 \pm 0,21$ m/h pour DAB (2+4+2 mL), et de $6,1 \pm 0,25$ m/h pour DAB (2+8+1 mL). Les vitesses de sédimentation retardée moyennes sont toutes inférieures à 10 m/h. Ce phénomène peut être expliqué par l'utilisation des différents agents de floculation. Des observations en laboratoire ont permis de constater que certains agents de floculation forment des ponts plus compacts, des « réseaux », qui permettent d'agglomérer plus efficacement les particules en

suspension. Cependant, ces réseaux semblent entraîner une réduction de la vitesse de sédimentation retardée.

Les Tableaux 4.2 et 4.3 présentent les essais préliminaires réalisés en utilisant l'agent de floculation E. Vingt essais ont été effectués à différents volumes d'agents de floculation (dosage variable) et différentes séquences d'injection. Les résultats de turbidité les plus faibles sont obtenus avec la séquence d'injection EAB. Ces essais préliminaires mettent en évidence l'efficacité de cet agent de floculation puisque la turbidité obtenue, pour plusieurs essais, est inférieure à 10 NTU. Cet agent de floculation est actuellement le plus efficace pour réduire considérablement la turbidité d'une surverse.

Tableau 4.2 Essais préliminaires 1 utilisant l'agent de floculation E

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volume (mL) | Vitesse (m/h) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|-----------|--------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | A+E+B | 3R+3R+3L | 8,0+3,0+2,0 | 8,9 | 230 | 275 |
| 2 | A+E+B | 3R+3R+3L | 5,0+5,0+2,0 | 9,3 | 250 | 268 |
| 3 | A+E+B | 3R+3R+3L | 8,0+5,0+3,0 | 11,5 | 215 | 268 |
| 4 | A+B+E | 3R+3R+3L | 8,0+2,0+3,0 | 4,8 | 600 | 275 |
| 5 | A+B+E | 3R+3R+3L | 5,0+2,0+5,0 | 5,6 | 840 | 268 |
| 6 | A+B+E | 3R+3R+3L | 8,0+3,0+5,0 | 5,1 | 600 | 275 |
| 7 | E+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+8,0+3,0 | 13,6 | 26 | 254 |
| 8 | E+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+10,0+2,0 | 17,3 | 25 | 254 |
| 9 | E+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+10,0+3,0 | 12,9 | 21,5 | 254 |
| 10 | E+A | 3R+3R | 5,0+10,0 | 11,5 | 33 | 261 |

Tableau 4.3 Essais préliminaires 2 utilisant l'agent de floculation E

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volumes (mL) | Vitesse (m/h) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | Adjuvant E | 3R + 3L | 2,0 | ————— | 76 | 263 |
| 2 | Adjuvant E | 3R + 3L | 5,0 | ————— | 56 | 263 |
| 3 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 2,0 + 1,0 + 1,0 | ————— | 71 | 250 |
| 4 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 5,0 + 1,0 + 1,0 | ————— | 24 | 257 |
| 5 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 5,0 + 3,0 + 3,0 | 5,6 | 19 | 270 |
| 6 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 5,0 + 5,0 + 2,0 | 4,4 | 12,5 | 277 |
| 7 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 2,0 + 5,0 + 2,0 | 3,8 | 55 | 277 |
| 8 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 5,0 + 5,0 + 3,0 | 7,4 | 16,5 | 263 |
| 9 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 5,0 + 8,0 + 2,0 | 5,5 | 9,5 | 263 |
| 10 | E + A + B | 3R + 3R + 3L | 5,0 + 8,0 + 3,0 | 8,6 | 9,2 | 263 |

La Figure 4.15 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation E est de 1,0 % p/p. Le résultat de turbidité le moins élevé est obtenu avec le mélange EAB (4+8+3 mL). Le dosage des agents de floculation est de 803 g/t pour l'agent E, de 15 g/t pour le polymère A et de 5 g/t pour le polymère B. La turbidité moyenne obtenue pour ce mélange est de 16 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 2,5 mg/L. Pour les essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation, une turbidité de 24 ± 1 NTU a été obtenue avec le mélange DAB (2+8+1 mL) pour des dosages correspondant à 402 g/t pour l'agent D, à 15 g/t pour le polymère A et à 2 g/t pour le polymère B. Pour une différence de turbidité de 8,1 NTU entre ces deux essais, le dosage des agents de floculation a doublé passant de 402 à 803 g/t. Le mélange EAB (4+8+3 mL) est tout de même très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge.

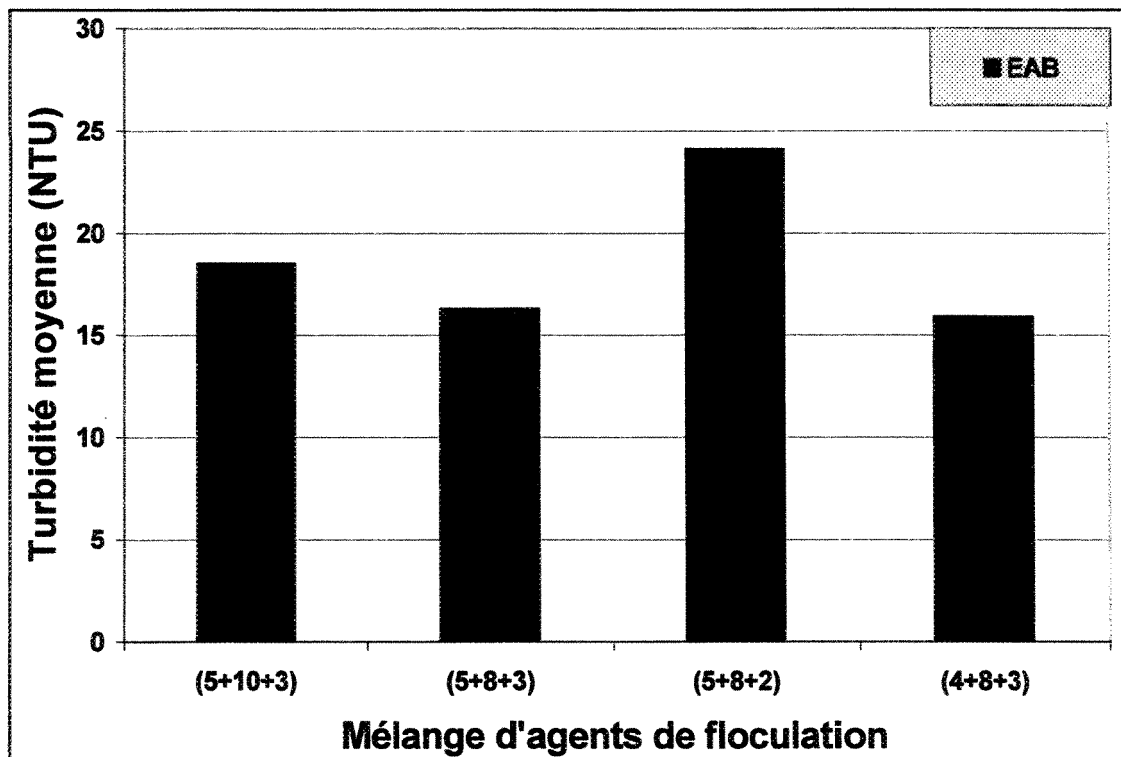


Figure 4.15 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.16 présente la filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La filtration relative, pour l'essai EAB (4+8+3 mL), est de 8,69. Le résultat de filtration obtenu pour l'essai précédent DAB (2+8+1 mL) est de 17,17. Tous les essais utilisant du polymère A sont plus difficiles à filtrer et plus particulièrement les essais où le polymère A est ajouté à la suspension en volume plus important (8 mL). Cependant, le volume de polymère ajouté à la suspension est le même pour les deux séries d'essais. Il est donc raisonnable de croire que l'agent de floculation D soit responsable, en partie, de l'augmentation du temps de filtration. La filtration relative s'avère beaucoup plus efficace en utilisant l'agent de floculation E plutôt que l'agent D.

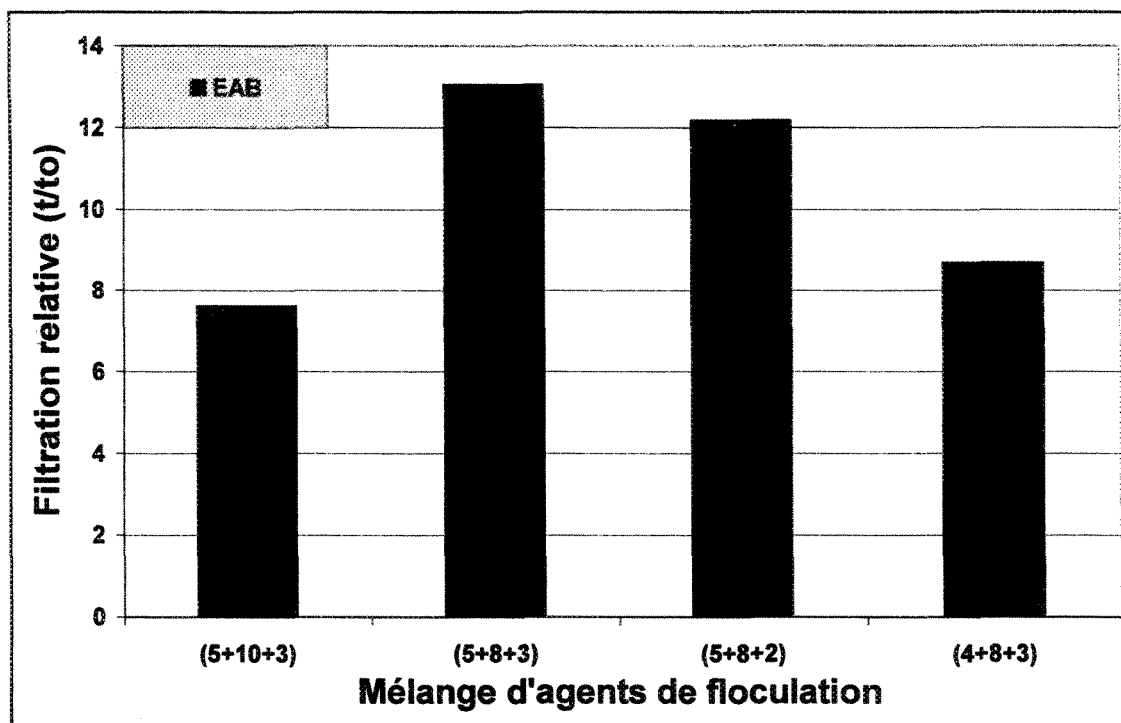


Figure 4.16 Filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.17 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne obtenue pour l'essai EAB (4+8+3 mL) est de 265 ± 3 g/L. Les concentrations moyennes en matières particulaires du sédiment sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B (100%). Considérant ceci, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est moyennement efficace. La concentration moyenne pour l'essai précédent DAB (2+8+1 mL) est de 252 ± 8 g/L. Donc, les résultats de compaction obtenus de l'utilisation de l'agent E sont plus élevés. Le mélange EAB (4+8+3 mL) s'avère plus efficace pour compacter le sédiment.

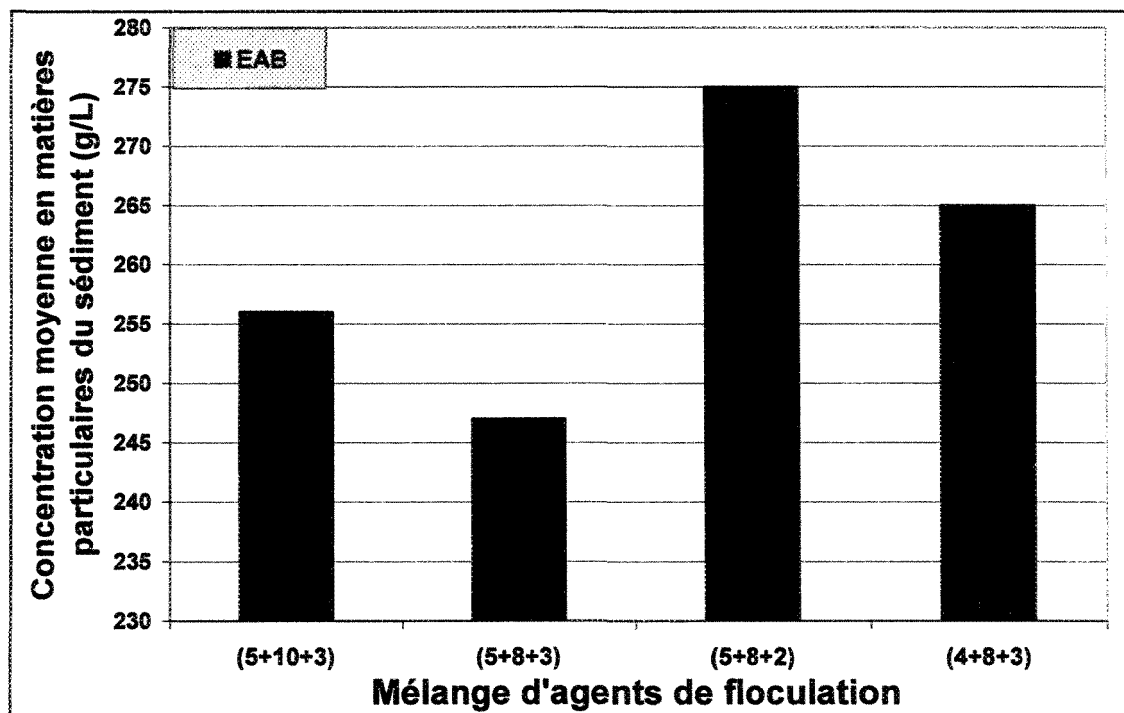


Figure 4.17 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essais sont de $7,1 \pm 0,33$ m/h pour la séquence d'injection EAB (5+10+3 mL), de $7,6 \pm 0,53$ m/h pour EAB (5+8+3 mL), de $7,0 \pm 0,74$ m/h pour EAB (5+8+2 mL), et de $7,3 \pm 0,80$ m/h pour EAB (4+8+3 mL). Les vitesses de sédimentation retardée moyennes sont toutes inférieures à 10 m/h. La vitesse de sédimentation retardée peut être améliorée en augmentant le volume de polymère B ajouté à la suspension (augmentation du dosage du polymère B). Cependant, l'augmentation du dosage de ce polymère entraîne une augmentation significative des résultats de turbidité. Pour une augmentation du dosage de 2 g/t, la turbidité passe de 16,3 à 24,1 NTU.

Le Tableau 4.4 présente les essais préliminaires réalisés en utilisant l'agent de floculation F. Dix essais ont été effectués à différents volumes d'agents de floculation (dosage variable) et différentes séquences d'injection. Les résultats de turbidité démontrent que la séquence d'injection FAB est la plus efficace. Le meilleur résultat de turbidité est légèrement inférieur à 30 NTU. Cependant, cet agent de floculation est difficile à solubiliser et le résultat de la solubilisation est un gel contenant des particules en suspension (solubilisation incomplète). Des tests de solubilisation plus poussés doivent être réalisés avec cet agent avant son utilisation. Pour ces raisons, aucun essai n'est effectué avec cet agent de floculation.

Tableau 4.4 Essais préliminaires utilisant l'agent de floculation F

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volume (mL) | Vitesse (m/h) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|-----------|--------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | Adjuvant F | 3R+3L | 10,0 | — | 91 | 220 |
| 2 | F+A+B | 3R+3R+3L | 10,0+8,0+2,0 | 8,6 | 33 | 248 |
| 3 | F+A+B | 3R+3R+3L | 8,0+8,0+2,0 | 5,9 | 28,5 | 248 |
| 4 | F+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+8,0+2,0 | 5,9 | 41 | 248 |
| 5 | F+A+B | 3R+3R+3L | 10,0+5,0+2,0 | 6,1 | 40 | 248 |
| 6 | F+A+B | 3R+3R+3L | 8,0+5,0+2,0 | 5,4 | 40 | 248 |
| 7 | F+A+B | 3R+3R+3L | 10,0+5,0+3,0 | 9,2 | 40 | 261 |
| 8 | F+A+B | 3R+3R+3L | 8,0+5,0+3,0 | 8,3 | 44 | 261 |
| 9 | F+A+B | 3R+3R+3L | 6,4+8,0+3,0 | 11,2 | 48 | 261 |
| 10 | F+A+B | 3R+3R+3L | 6,4+5,0+3,0 | 9,4 | 46 | 261 |

Le Tableau 4.5 présente les essais préliminaires réalisés en utilisant l'agent de floculation G. Dix essais ont été effectués à différents volumes d'agents de floculation (dosage variable) et différentes séquences d'injection. Les résultats les plus concluants sont obtenus avec la séquence d'injection GAB. Ces essais préliminaires mettent en évidence l'efficacité de cet agent puisque la

turbidité obtenue, pour plusieurs essais, est inférieure à 40 NTU. Cependant, aucun essai n'est réalisé avec cet agent puisque des résultats de turbidité inférieurs sont obtenus avec d'autres agents de floculation.

Tableau 4.5 Essais préliminaires utilisant l'agent de floculation G

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volume (mL) | Vitesse (m/h) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|-----------|--------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | Adjuvant G | 3R+3L | 10,0 | 27,8 | 690 | 249 |
| 2 | G+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+8,0+1,0 | 8,6 | 38 | 249 |
| 3 | G+A+B | 3R+3R+3L | 4,0+8,0+1,0 | 8,8 | 46 | 255 |
| 4 | G+A+B | 3R+3R+3L | 4,0+10,0+1,0 | 12,3 | 32 | 255 |
| 5 | G+A+B | 3R+3R+3L | 3,0+10,0+1,0 | 9,2 | 36 | 262 |
| 6 | G+A+B | 3R+3R+3L | 3,0+8,0+1,0 | 8,1 | 40 | 255 |
| 7 | G+A+B | 3R+3R+3L | 2,0+10,0+1,0 | 7,6 | 49 | 262 |
| 8 | G+A | 3R+3R | 4,0+8,0 | 6,7 | 56 | 255 |
| 9 | G+A | 3R+3R | 3,0+10,0 | 6,3 | 34 | 255 |

Le Tableau 4.6 présente les essais préliminaires effectués avec l'agent de floculation H. Dix essais ont été réalisés à différents volumes d'agents de floculation (dosage variable) et différentes séquences d'injection. Les résultats de turbidité obtenus démontrent que la séquence d'injection HAB est la plus efficace. La turbidité obtenue, pour plusieurs essais, est inférieure à 100 NTU. Cet agent de floculation est difficile à solubiliser et des amas (grumeaux) de particules sont présents dans la solution. Les résultats de turbidité élevés ainsi que les problèmes liés à la solubilisation de cet agent conduisent à l'interruption des essais avec cet agent de floculation.

Tableau 4.6 Essais préliminaires utilisant l'agent de floculation H

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volume (mL) | Vitesse (m/h) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|-----------|---------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | Adjuvant H | 3R+3L | 10,0 | — | 760 | 260 |
| 2 | H+A+B | 3R+3R+3L | 10,0+8,0+1,0 | 3,3 | 330 | 289 |
| 3 | H+A+B | 3R+3R+3L | 15,0+10,0+2,0 | 5,7 | 490 | 289 |
| 4 | H+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+10,0+1,0 | 4,2 | 160 | 281 |
| 5 | H+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+15,0+2,0 | 5,3 | 88 | 281 |
| 6 | A+H+B | 3R+3R+3L | 15,0+5,0+2,0 | 7,0 | 250 | 281 |
| 7 | H+A+B | 3R+3R+3L | 3,0+15,0+2,0 | 9,6 | 94 | 289 |
| 8 | H+A+B | 3R+3R+3L | 3,0+15,0+1,0 | 5,6 | 110 | 281 |
| 9 | H+A+B | 3R+3R+3L | 5,0+15,0+3,0 | 11,7 | 93 | 281 |

Le Tableau 4.7 présente les essais préliminaires réalisés en utilisant l'agent de floculation I. Dix essais ont été effectués à différents volumes d'agents de floculation (dosage variable) et différentes séquences d'injection. Les résultats les plus concluants sont obtenus avec la séquence d'injection IAB. Ces essais mettent en évidence l'efficacité de cet agent puisque la turbidité obtenue, pour plusieurs essais, est inférieure à 40 NTU.

Tableau 4.7 Essais préliminaires utilisant l'agent de floculation I

| Essai # | Type de floculant | Agitation | Volume (mL) | Vitesse (m/h) | Turbidité (NTU) | Compaction (g/L) |
|---------|-------------------|-----------|-------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | Adjuvant I | 3R+3L | 10,0 | — | 53 | 227 |
| 2 | I+A+B | 3R+3R+3L | 10+8+2 | 4,4 | 9,4 | 238 |
| 3 | I+A+B | 3R+3R+3L | 5+8+3 | 6,5 | 9,6 | 250 |
| 4 | I+A+B | 3R+3R+3L | 4+8+3 | 7,2 | 13 | 250 |
| 5 | I+A+B | 3R+3R+3L | 3+8+3 | 7,7 | 13,5 | 250 |
| 6 | I+A+B | 3R+3R+3L | 5+6+3 | 6,0 | 12,5 | 250 |
| 7 | I+A+B | 3R+3R+3L | 5+8+2 | 6,4 | 10,5 | 244 |
| 8 | I+A+B | 3R+3R+3L | 5+4+3 | 5,5 | 13,5 | 250 |
| 9 | I+A+B | 3R+3R+3L | 5+2+2 | 3,6 | 22 | 227 |
| 10 | I+A+B | 3R+3R+3L | 4+4+3 | 6,0 | 14,5 | 244 |

La Figure 4.18 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation I est de 0,50 % p/p. Les résultats de turbidité les plus bas sont obtenus en utilisant le mélange IAB (3+5+3 mL). Le dosage des agents de floculation est de 302 g/t pour l'agent I, de 10 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La turbidité moyenne obtenue est de $8,0 \pm 0,8$ NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 2,2 mg/L. Pour les essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation, une turbidité moyenne de 16 ± 1 NTU a été obtenue en utilisant le mélange EAB (4+8+3 mL). Le dosage des agents de floculation est de 803 g/t pour l'agent E, de 15 g/t pour le polymère A et de 5 g/t pour le polymère B. Le mélange IAB (3+5+3 mL) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges.

Une diminution importante du dosage du polymère A (passant de 15 à 10 g/t) et de l'agent I (passant de 803 à 302 g/t) est observée. Malgré la diminution du dosage, la turbidité moyenne a été réduite de moitié (passant de 16 à 8,0 NTU). La quantité de floculant (g) actif nécessaire pour floculer une tonne de boue sèche a été considérablement réduite et les résultats de turbidité se sont tout de même améliorés. Cette observation est une bonne indication de l'efficacité de l'agent de floculation I. Le mélange IAB (3+5+3 mL) est par conséquent très efficace et économique pour l'industrie.

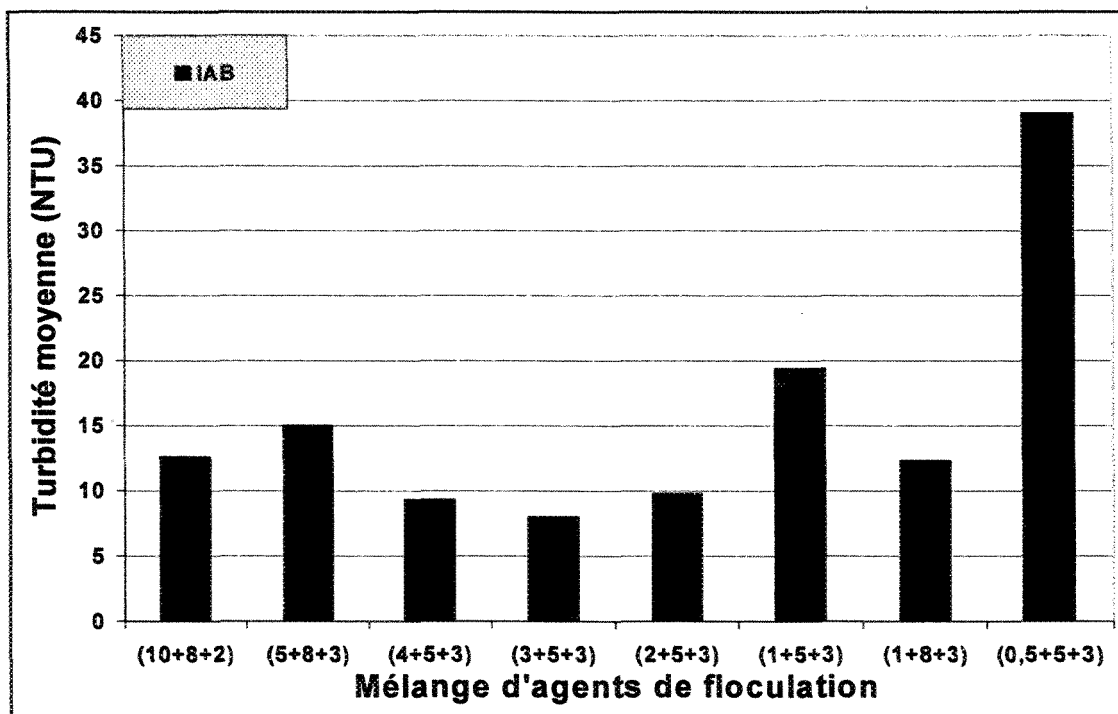


Figure 4.18 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.19 présente la filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La filtration relative moyenne, pour l'essai IAB (3+5+3 mL), est de 4,39. La filtration relative moyenne obtenue pour l'essai EAB (2+8+1 mL), est de 8,69. Comme mentionné précédemment, tous les essais utilisant le polymère A ont des résultats de filtration plus élevés et plus particulièrement les essais où le polymère A est ajouté à la suspension en volume plus important (dosage plus élevé). Une diminution du dosage du polymère A (passant de 15 à 10 g/t) est observée pour l'essai IAB (3+5+3 mL). Cette diminution du dosage semble être à l'origine de l'amélioration de la filtration relative moyenne.

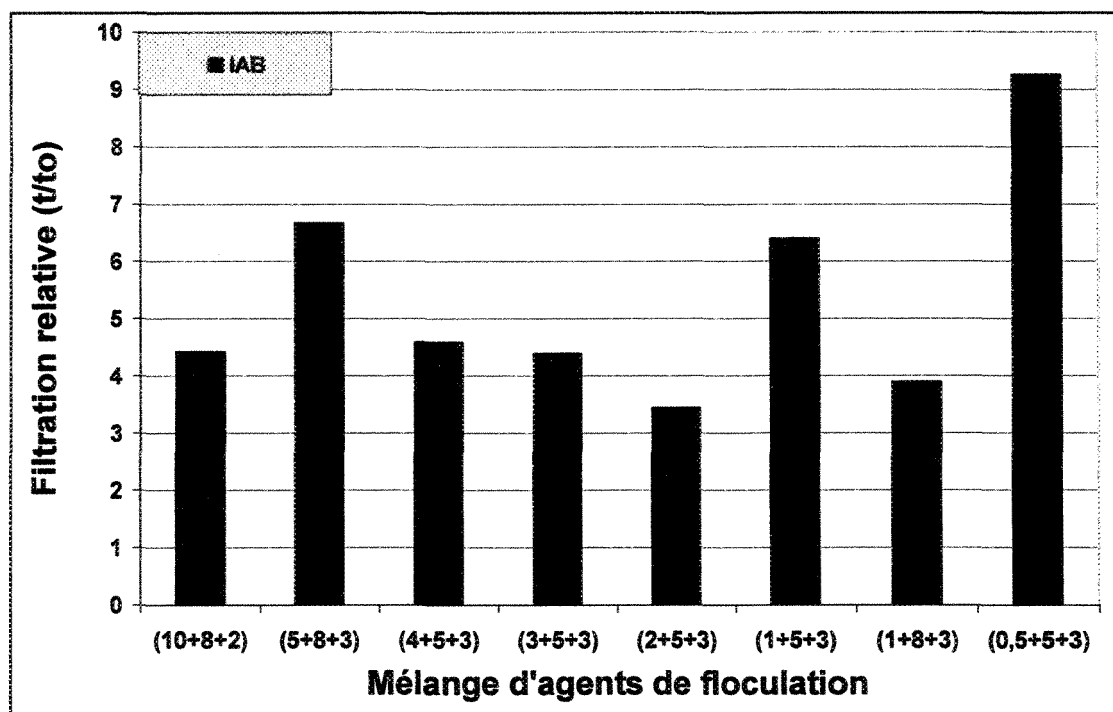


Figure 4.19 Filtration relative de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.20 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne obtenue pour l'essai IAB (3+5+3 mL) est de 262 ± 2 g/L. Les concentrations moyennes en matières particulaires du sédiment sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B (100%). Considérant ceci, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est moyennement efficace. La concentration moyenne pour l'essai précédent EAB (4+8+3 mL) est de 252 ± 8 g/L. Donc, les résultats de compaction obtenus de l'utilisation de l'agent I sont légèrement plus élevés. Le mélange IAB (3+5+3 mL) s'avère donc plus efficace pour compacter le sédiment.

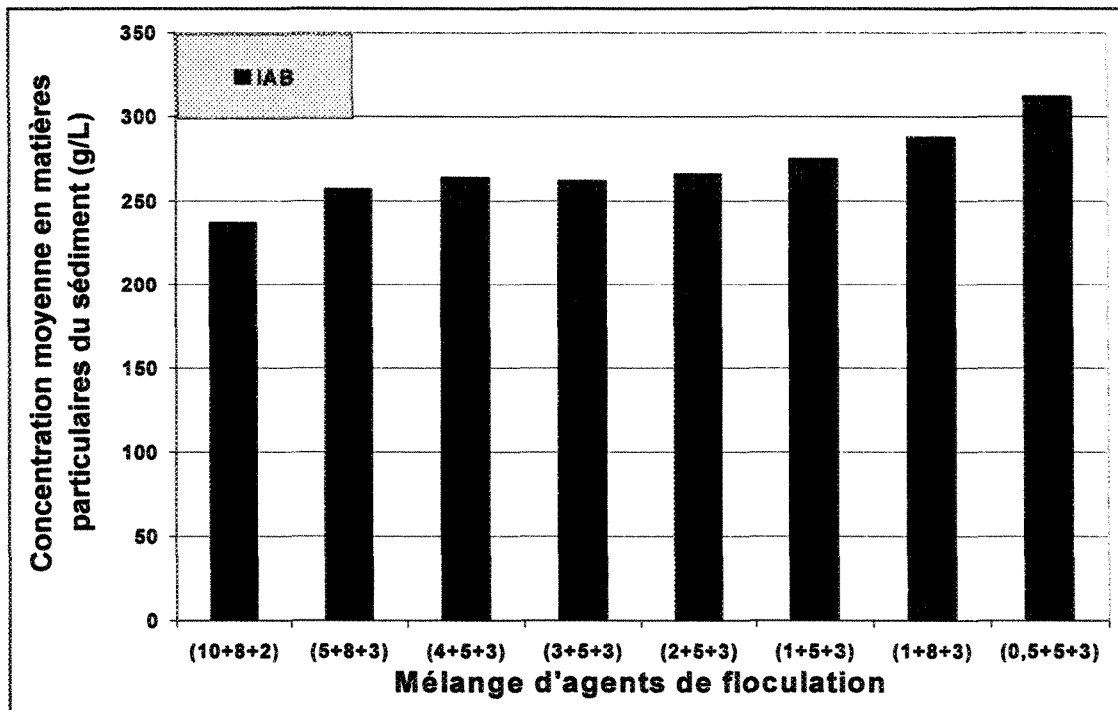


Figure 4.20 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues de cette série d'essais sont de $5,3 \pm 0,58$ m/h pour le mélange IAB (10+8+2 mL), de $6,4 \pm 0,47$ m/h pour IAB (5+8+3 mL), de $6,9 \pm 0,54$ m/h pour IAB (4+5+3 mL), de $6,9 \pm 0,59$ m/h pour IAB (3+5+3 mL), de $7,0 \pm 0,45$ m/h pour IAB (2+5+3 mL), de $8,1 \pm 0,78$ m/h pour IAB (1+5+3 mL), de $9,4 \pm 0,64$ m/h pour IAB (1+8+3 mL), et de $10,8 \pm 1,0$ m/h pour IAB (0,5+5+3 mL). Les vitesses de sédimentation retardée moyennes sont toutes inférieures à 10 m/h. Ce phénomène a été observé pour tous les essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation. Comme mentionné précédemment, des observations en laboratoire ont permis de constater que certains agents de floculation forment des ponts très compacts ou des

« réseaux ». Ces réseaux semblent à l'origine de la diminution de la vitesse de sédimentation retardée.

Tous les essais portant sur une triple addition d'un mélange d'agents de floculation sont très efficaces. Cette efficacité semble reliée à l'utilisation des différents agents de floculation. Ces agents permettent de former des ponts plus compacts, des réseaux, qui permettent d'agglomérer plus efficacement les particules en suspension. Lors de la sédimentation, ces réseaux agissent comme un filtre en clarifiant la suspension lors de la descente de la ligne de boue. Ce phénomène est inexistant dans la littérature mais il a été observé expérimentalement pour tous les essais effectués durant cette étude.

En résumé, le résultat le plus concluant, pour les essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation, est IAB (3+5+3 mL). Le dosage des agents de floculation est de 302 g/t pour l'agent I, de 10 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La vitesse de sédimentation retardée moyenne pour ce mélange est de $6,9 \pm 0,6$ m/h et la turbidité moyenne est de $8,0 \pm 0,8$ NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 2,2 mg/L. La turbidité moyenne obtenue pour une série d'essais utilisant le polymère A (100%) est d'environ 210 NTU. Ce polymère est le plus efficace des trois polymères utilisés pour réaliser cette étude. En se basant sur les résultats mentionnés précédemment, le mélange IAB (3+5+3 mL) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge. La filtration relative moyenne, pour cet essai, est de 4,39. Les résultats de filtration sont de 6,8 pour le polymère A (100%) et de 5,0 pour le polymère B (100%). Le résultat de filtration obtenu du mélange IAB (3+5+3 mL) est donc

efficace par rapport aux résultats de filtration obtenus en utilisant les polymères A et B (100%) individuellement. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, après une heure de décantation, est de 262 ± 2 g/L. Les concentrations moyennes (du sédiment) sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B (100%). Le polymère A est le moins efficace des trois polymères pour compacter le sédiment tandis que l'agent B est le plus efficace. La compaction du mélange IAB (3+5+3 mL) est donc moyennement efficace pour compacter le sédiment.

4.1.4. Concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge

Une série d'essais a été effectuée avec la séquence d'injection IAB pour un dosage correspondant à 800 g/t pour l'agent de floculation I, à 10 g/t pour le polymère A et à 5 g/t pour le polymère B. Le dosage est le même pour chaque essai mais le volume varie en fonction de la concentration en matières particulaires de la suspension de boues rouges. Les différentes concentrations de la boue sont 9,5 g/L, 24,3 g/L, 48,3 g/L et 75,0 g/L. La Figure 4.21 présente la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Les résultats obtenus montrent une diminution de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la boue. À concentration élevée, des observations en laboratoire ont permis de constater la formation de ponts très compacts, des « réseaux », qui semblent agglomérer plus efficacement les particules en suspension. Ces

réseaux compacts entraînent une réduction considérable de la vitesse de sédimentation retardée.

Les résultats présentés à la Figure 4.21 sont liés par une relation de type puissance.

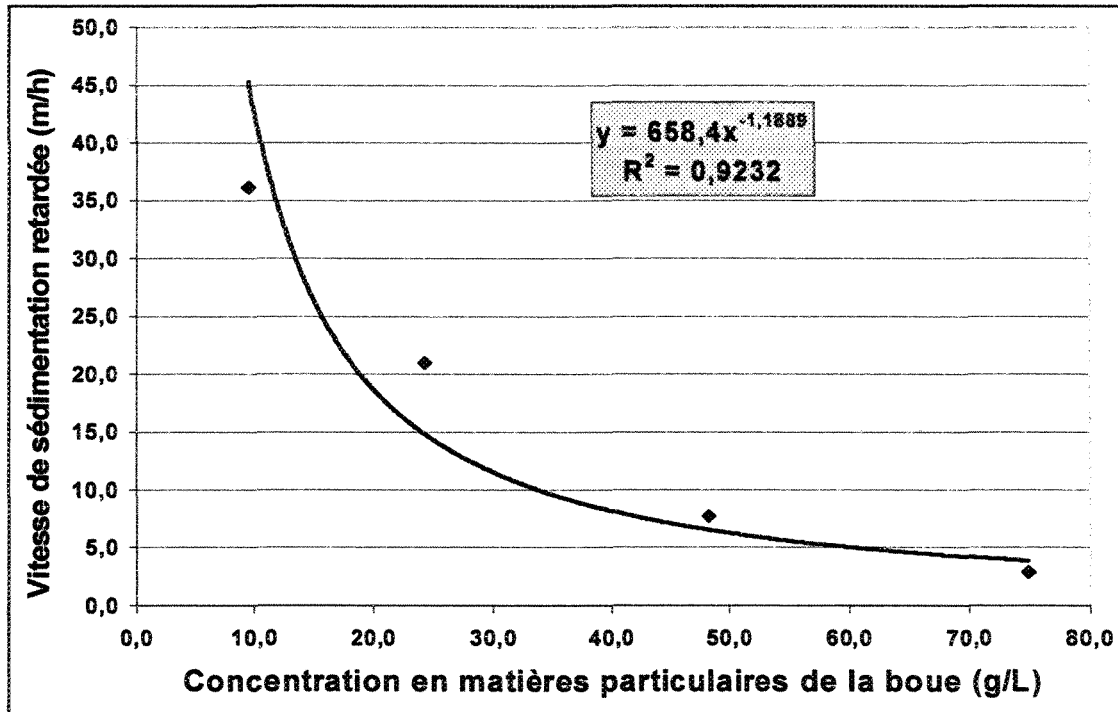


Figure 4.21 Vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue

La Figure 4.22 montre la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Ce graphique met en évidence une diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge. Ce phénomène est probablement dû à une plus grande proximité entre les particules en suspension qui permet d'obtenir une plus grande surface de contact entre les particules de boue et de polymère. 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 en suspension et ainsi, d'améliorer la clarté de la suspension. Les résultats présentés à la Figure 4.22 sont liés par une relation de type puissance.

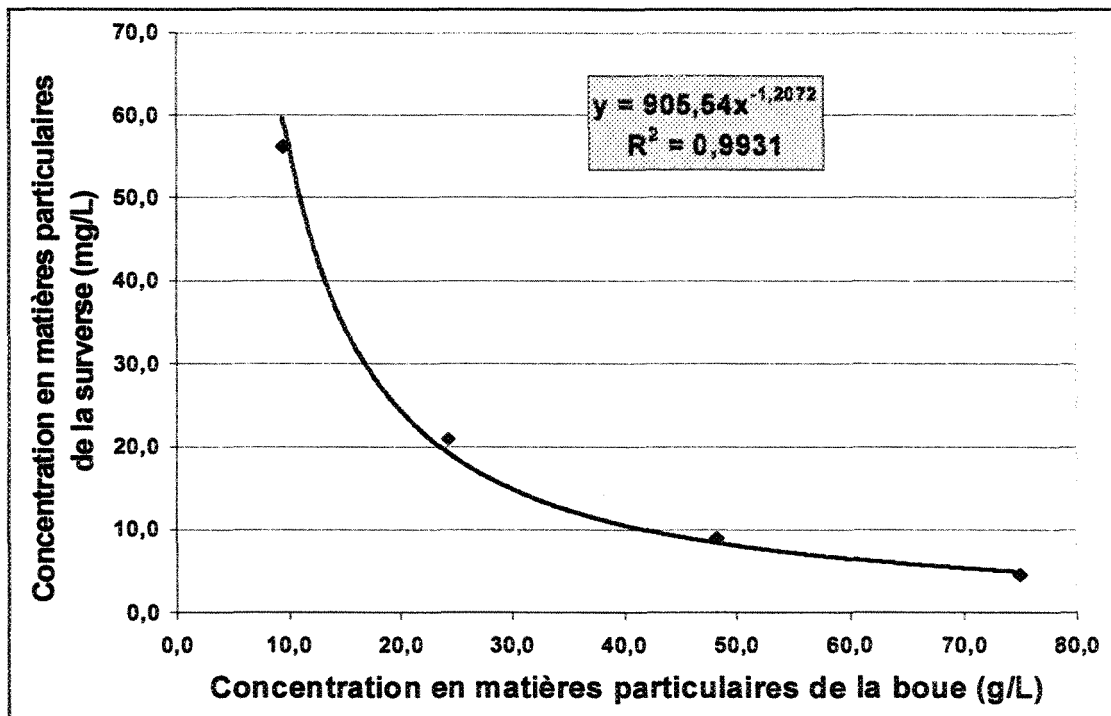


Figure 4.22 Concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue

4.2. Décanteurs à haut rendement (DHR)

Tous les essais présentés dans cette section du chapitre 4 ont été effectués aux conditions d'opération retrouvées en usine dans les décanteurs à haut rendement (DHR). La concentration de la liqueur Bayer est de ~220 g/L de caustique, ~35 g/L de carbonate et la température du mélange est d'environ 110 °C. Étant donné l'augmentation considérable de la causticité de la liqueur Bayer, le polymère B utilisé pour cette partie des expérimentations est hautement (100%) anionique (voir section 1.3) et sera donc identifié comme étant le polymère B'. La boue utilisée pour ces essais est de la pulpe d'extraction. Cette pulpe n'a jamais été floculée et n'a donc pas de « mémoire » (quantité résiduelle de polymère). Puisqu'il n'y a pas de quantités résiduelles d'agents de floculation dans la pulpe, le dosage nécessaire pour floculer les matières particulaires en suspension sera plus élevé. La concentration en matières particulaires de la pulpe varie entre 30 et 37 g/L pour l'ensemble des essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation. Comme mentionné précédemment, les essais suivants ont été effectués en usine et aucune filtration n'a pu être effectuée. En effet, la viscosité élevée de la liqueur entrave la filtration et aucun aide filtrant n'était disponible en laboratoire. La concentration en matières particulaires de la surverse a été obtenue à l'aide de l'équation de la droite obtenue d'un graphique de la turbidité moyenne en fonction de la concentration en matières particulaires de la surverse. Les données contenues dans ce graphique proviennent des résultats obtenus durant cette étude. La figure 4.23 présente ce graphique.

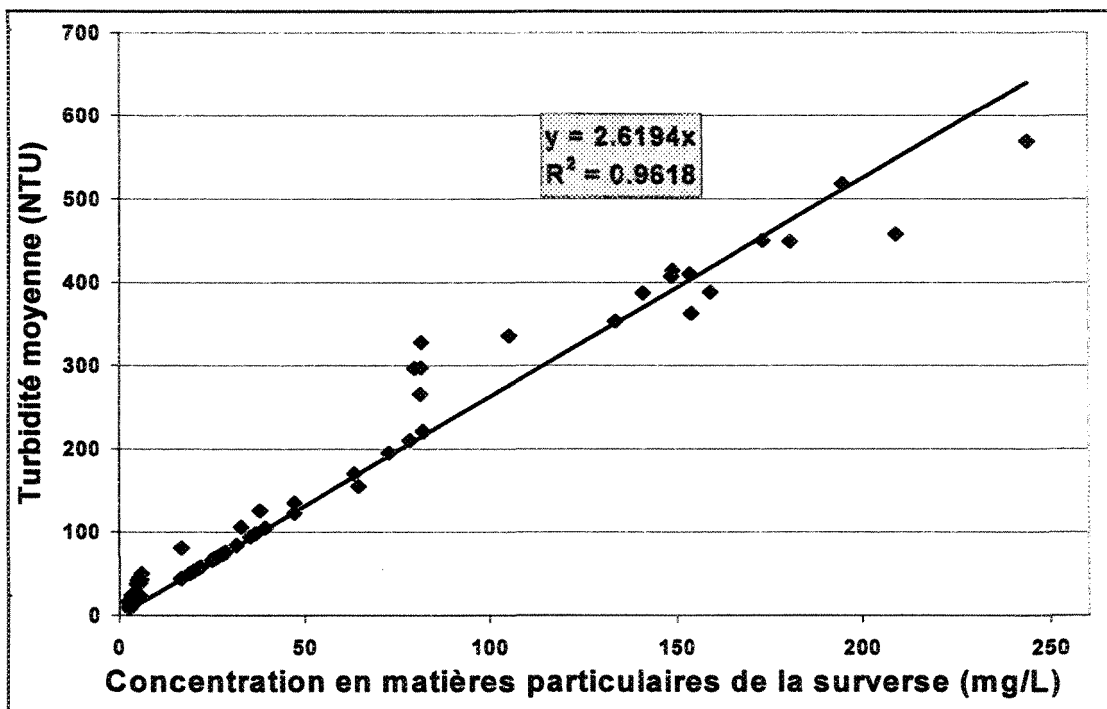


Figure 4.23 Turbidité moyenne en fonction de la concentration moyenne de matières particulaires de la surverse

4.2.1. Triple addition d'un mélange d'agents de floculation

La Figure 4.24 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation D est de 1,0 % p/p. Les résultats de turbidité les plus bas sont obtenus avec les mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL). Le dosage des agents de floculation est respectivement de 803 et 1004 g/t pour l'agent D, de 113 g/t pour le polymère A et de 14 g/t pour le polymère B'. Le résultat de turbidité obtenu pour ces mélanges est de 44 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 16,5 mg/L. Pour les essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation aux conditions d'opération des laveurs, une turbidité moyenne de $8,0 \pm 0,8$ NTU a été obtenue en

utilisant le mélange IAB (3+5+3 mL). Les mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL) sont par conséquent moyennement efficaces pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge.

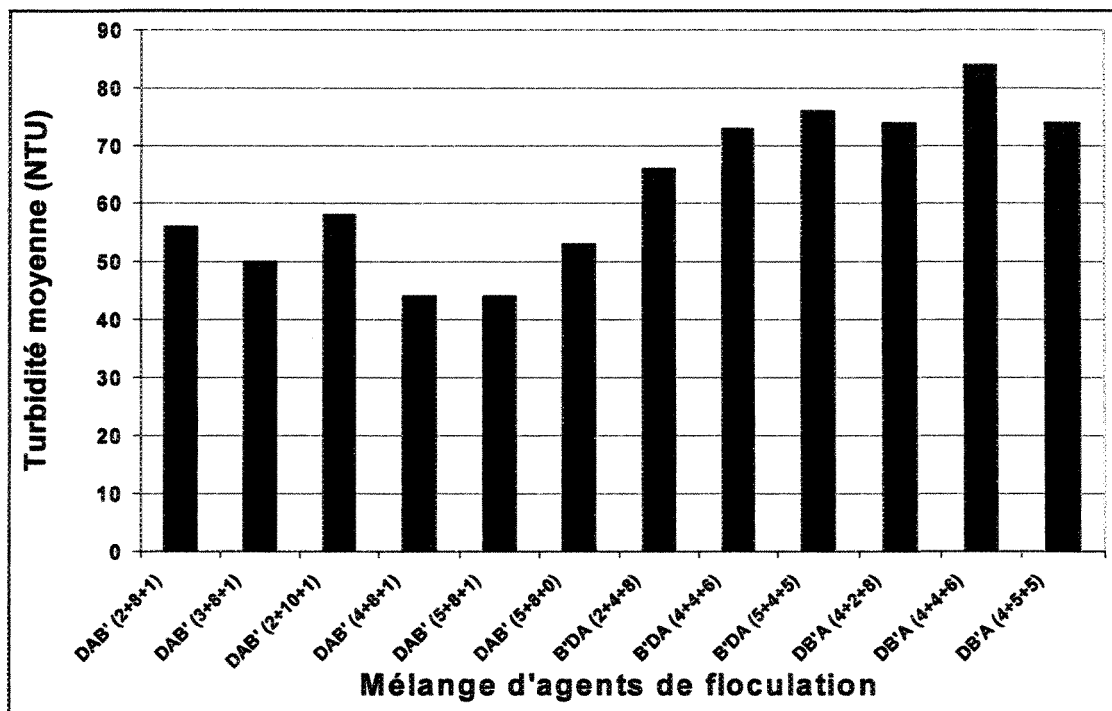


Figure 4.24 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.25 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. Les résultats de compaction obtenus en utilisant le polymère A (100%) sont toujours moins élevés. Les concentrations moyennes en matières particulaires du sédiment sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B' (100%). Le résultat le moins élevé, obtenu pour cette série d'essais, est de 295 ± 9 g/L. Ce résultat a été obtenu avec le mélange DAB' (2+8+1 mL) dont le volume ajouté (\uparrow dosage) de polymère A est plus important (8 mL). Ces résultats démontrent un niveau de compaction efficace pour tous les mélanges de la séquence d'injection DB'A.

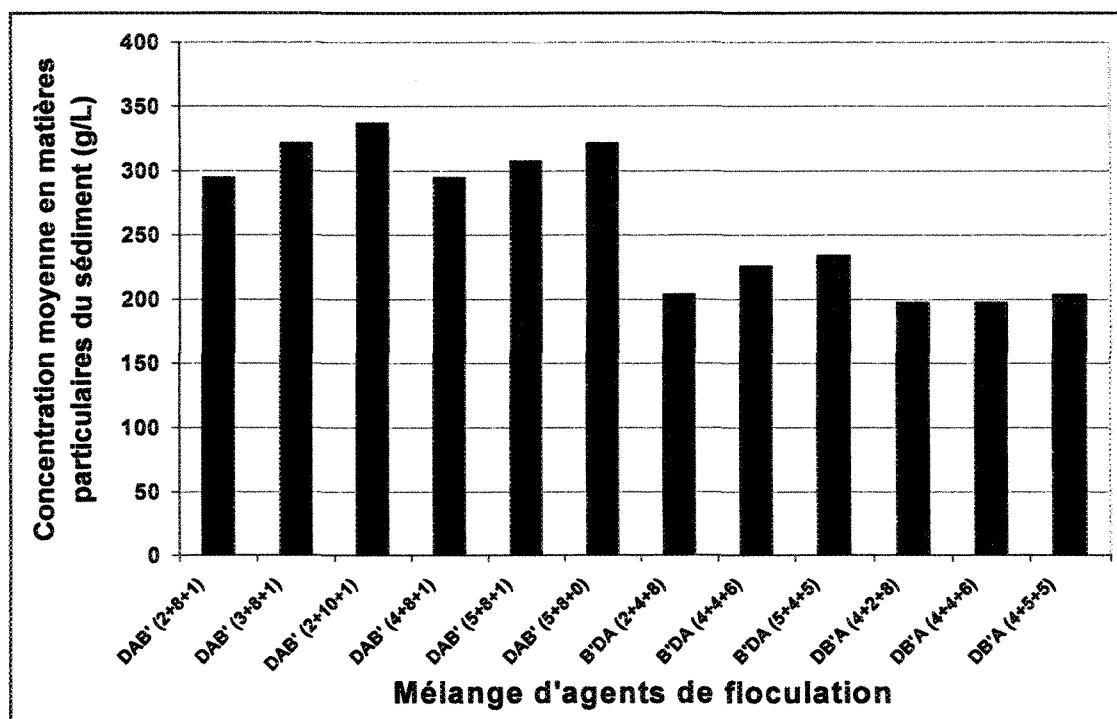


Figure 4.25 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essai sont de $22,5 \pm 1,1$ m/h pour la séquence d'injection DAB' (2+8+1 mL), de $34,9 \pm 1,9$ m/h pour DAB' (3+8+1 mL), de $49,5 \pm 2,4$ m/h pour DAB' (2+10+1 mL), de $23,2 \pm 1,3$ m/h pour DAB' (4+8+1 mL), de $38,0 \pm 2,0$ m/h pour DAB' (5+8+1 mL), de $28,0 \pm 1,2$ m/h pour DA (5+8 mL), de $55,4 \pm 2,5$ m/h pour B'DA (2+4+8 mL), de $61,3 \pm 3,2$ m/h pour B'DA (4+4+6 mL), de $60,3 \pm 2,8$ m/h pour B'DA (5+4+5 mL), de $44,2 \pm 1,8$ m/h pour DB'A (4+2+8 mL), de $44,3 \pm 2,1$ m/h pour DB'A (4+4+6 mL) et de $51,8 \pm 1,9$ m/h pour DB'A (4+5+5 mL). Les vitesses de sédimentation retardée observées varient de 22,5 à 61,3 m/h. Les vitesses obtenues de cette série d'essais sont très rapides. À la section 4.1.4, une augmentation de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la diminution de la concentration en matières

particulaires de la boue a été mise en évidence. La concentration en matières particulaires de la suspension est de 35,4 g/L. La diminution de la concentration en matières particulaires de la boue semble être à l'origine de l'augmentation de la vitesse de sédimentation retardée.

La Figure 4.26 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation E est de 0,10 % p/p. Le meilleur résultat de turbidité est obtenu en utilisant le mélange EAB' (40+3+1 mL). Le dosage des agents de floculation est respectivement de 1293 g/t pour l'agent E, de 48 g/t pour le polymère A et de 16 g/t pour le polymère B'. La turbidité obtenue pour ce mélange est de 170 ± 3 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 63,7 mg/L. Une turbidité de 44 ± 1 NTU a été obtenue antérieurement avec les mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL). Le mélange EAB' (40+3+1 mL) est par conséquent peu efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. Malheureusement, l'efficacité de ce mélange est réduite parce que l'agent de floculation E se détériore en partie dans la solution de caustique concentrée. La concentration de l'agent E doit être réduite à 0,10 % p/p afin de réduire la détérioration (contrairement à sa concentration habituelle de 1 % p/p). Conséquemment, le volume de l'agent E ajouté à la suspension (40 mL) est très important et contribue à la dilution de la suspension. La concentration en matières particulaires de la suspension est de 30,93 g/L. Il a été démontré à la section 4.1.4 qu'une diminution de la concentration en matières particulaires de la suspension entraîne une augmentation de la concentration en matières particulaires de la surverse (ou \uparrow turbidité). De plus, le temps d'amorçage de cet agent, dans ces conditions d'opération, est long (environ $\frac{1}{2}$ heure). Le temps d'amorçage est l'équivalent de la période de formation décrite à la

section 2.2.1.2.1 (voir Figure 2.6). Puisque ce temps d'amorçage n'est pas respecté lors de l'addition de cet agent à la suspension, l'efficacité du mélange est donc réduite. Tout ceci contribue à réduire l'efficacité de ce mélange d'agents de floculation.

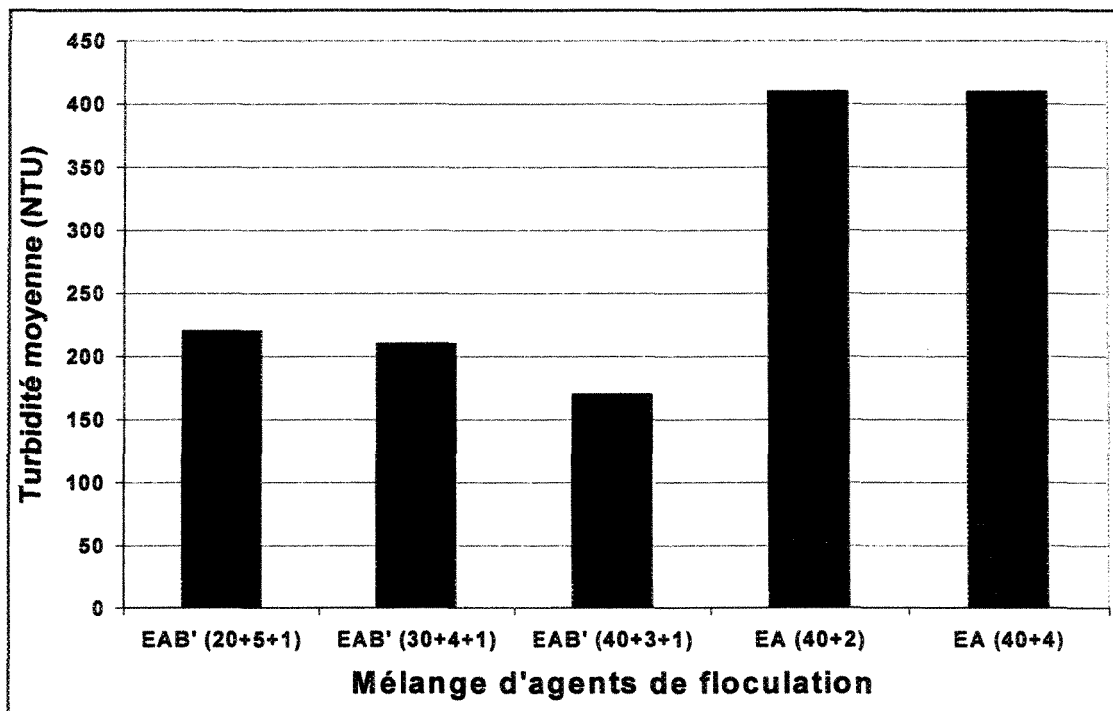


Figure 4.26 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.27 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne, pour l'essai EAB' (40+3+1 mL), est de 193 ± 5 g/L. Les concentrations moyennes en matières particulaires du sédiment sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B' (100%). Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Les concentrations moyennes obtenues des mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL) sont respectivement de 295 ± 9 g/L et de 308 ± 10 g/L. Considérant le faible volume (3 mL) de polymère

A ajouté à la suspension et les résultats obtenus des essais précédents, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est très peu efficace.

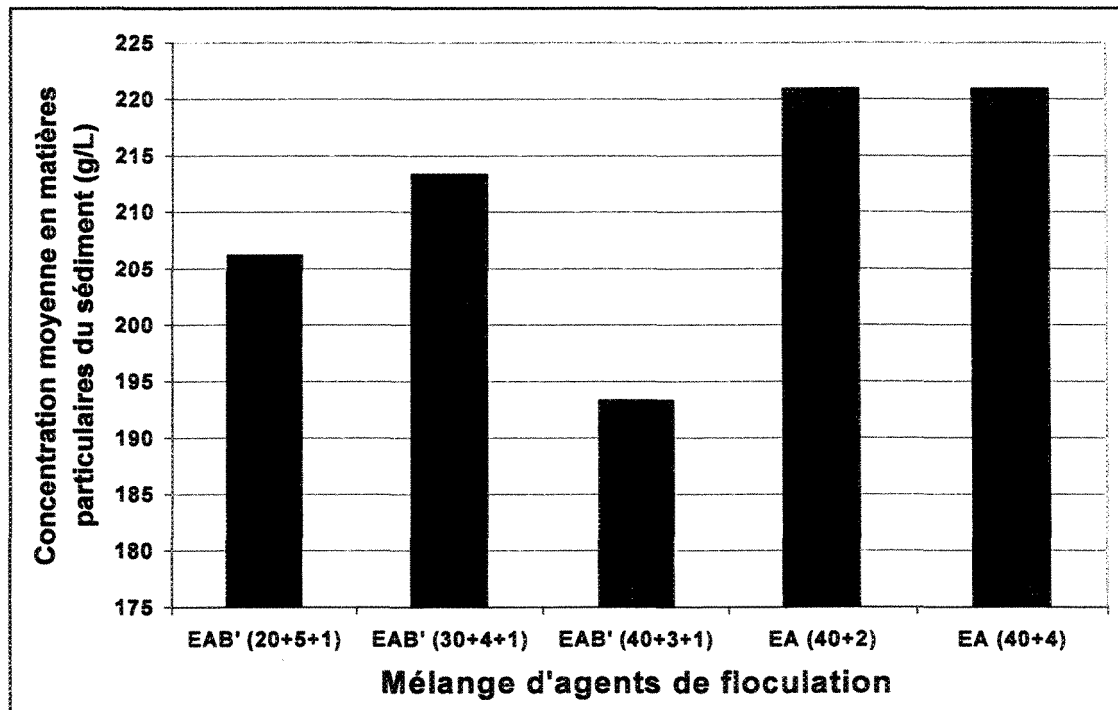


Figure 4.27 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essais sont de $25,8 \pm 1,1$ m/h pour la séquence d'injection EAB' (20+5+1 mL), de $32,9 \pm 1,4$ m/h pour EAB' (30+4+1 mL), de $27,0 \pm 1,1$ m/h pour EAB' (40+3+1 mL), de $7,8 \pm 0,7$ m/h pour EA (40+2 mL) et de $19,3 \pm 1,0$ m/h pour EA (40+4 mL). Les vitesses de sédimentation retardée observées varient de 7,8 à 32,9 m/h. Ces vitesses sont très rapides puisque la concentration en matières particulaires de la boue est de 30,93 g/L. Comme mentionné précédemment, le temps d'amorçage de cet agent (dans ces conditions opératoires) est très long. Afin d'augmenter l'efficacité de cet agent de floculation, un

temps d'amorçage de cinq minutes a été alloué pour le mélange EA (40+2 mL) après l'addition de l'agent E à la suspension. Une diminution considérable de la vitesse de sédimentation retardée est observée. Une vitesse de sédimentation retardée de 7,8 m/h est obtenue avec le mélange EA (40+2 mL). Des observations en laboratoire ont permis de constater la formation de ponts plus compacts, des « réseaux ». Comme discuté à la section 4.1.3, ces réseaux semblent entraîner une réduction de la vitesse de sédimentation retardée. Cependant, les résultats de turbidité obtenus de l'utilisation de ce mélange ont augmenté. La turbidité obtenue pour le mélange EA (40+2 mL) est de 410 ± 6 NTU.

La Figure 4.28 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation D est de 1,0 % p/p. Le résultat de turbidité le moins élevé a été obtenu avec la séquence d'injection ADA (5+2+2 mL). Le dosage des agents de floculation est respectivement de 89 g/t pour le polymère A, de 597 g/t pour l'agent D et de 30 g/t pour le polymère A. La turbidité obtenue en utilisant le mélange ADA (5+2+2 mL) est de 68 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 25,5 mg/L. Une turbidité de 44 ± 1 NTU a été obtenue antérieurement avec les mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL). Le mélange ADA (5+2+2 mL) est par conséquent moyennement efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges.

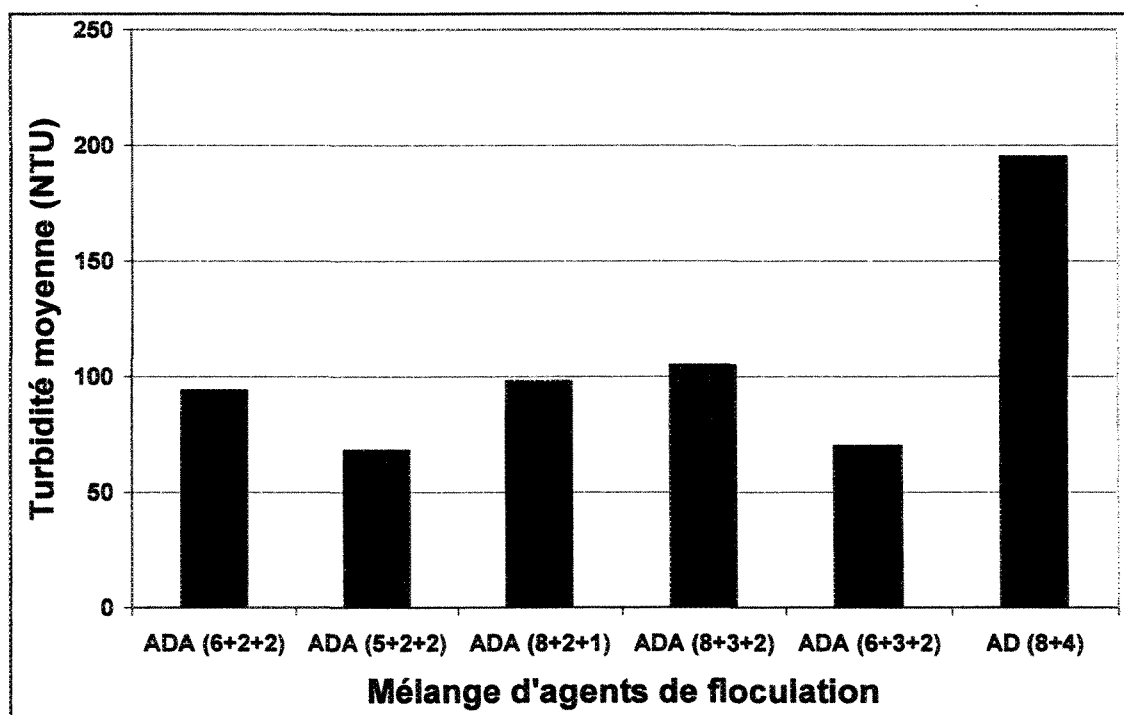


Figure 4.28 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.29 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne, pour l'essai ADA (5+2+2 mL), est de 231 ± 6 g/L. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment est de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%). Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Considérant le volume élevé (7 mL) de polymère A ajouté à la suspension, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est efficace.

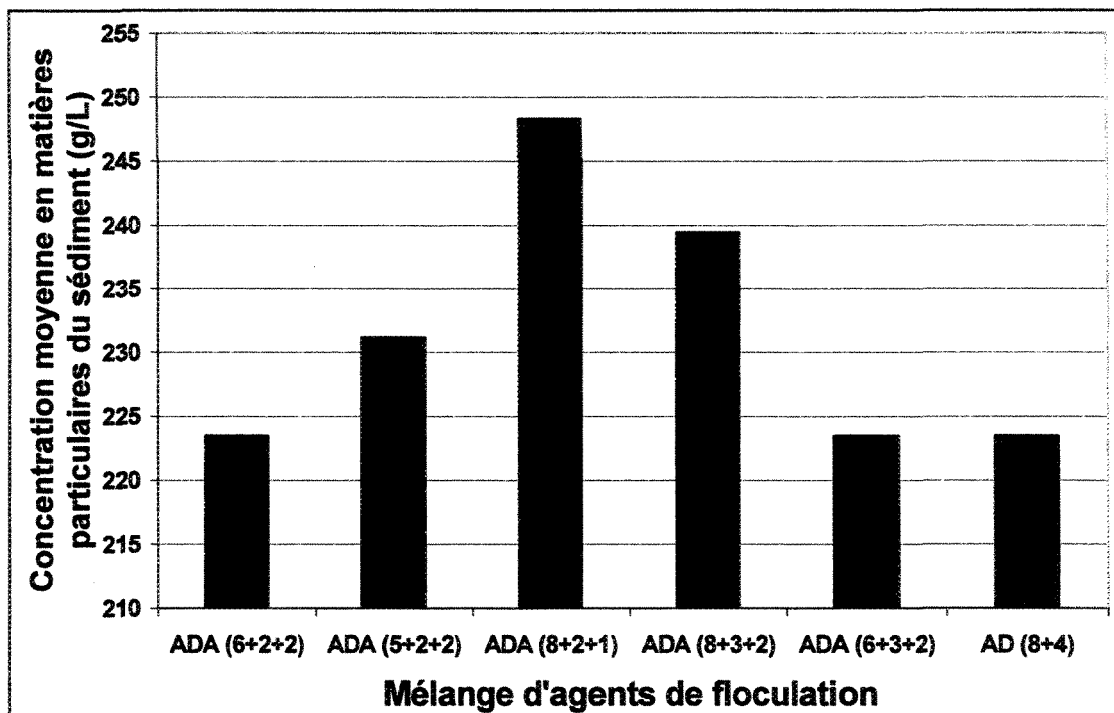


Figure 4.29 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essai sont de $28,4 \pm 1,0$ m/h pour la séquence d'injection ADA (6+2+2 mL), de $25,7 \pm 1,1$ m/h pour ADA (5+2+2 mL), de $28,4 \pm 1,1$ m/h pour ADA (8+2+1 mL), de $37,0 \pm 1,7$ m/h pour ADA (8+3+2 mL), de $29,6 \pm 1,0$ m/h pour ADA (6+3+2 mL) et de $16,2 \pm 0,9$ m/h pour AD (8+4 mL). Les vitesses de sédimentation retardée observées varient de 16,2 à 37,0 m/h. Ces vitesses sont très rapides puisque la concentration en matières particulaires de la suspension est de 33,52 g/L. À la section 4.1.4, une augmentation de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la diminution de la concentration en matières particulaires de la boue a été mise en évidence.

La Figure 4.30 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration des solutions d'agents de floculation est de 0,25 % p/p (AIA) et de 0,10 % p/p (B'IA). La concentration de la solution a été réduite de 0,10 à 0,25 % p/p pour tenter de restreindre la détérioration de cet agent dans la suspension. Cependant, la dilution à 0,25 % p/p n'est pas suffisante pour réduire significativement la détérioration de l'agent de floculation I. Une quantité inconnue d'agent I remonte et flotte à la surface du cylindre. L'efficacité de ce mélange est par conséquent réduite puisqu'une quantité inconnue d'agent de floculation I n'a pas réagi en agglomérant les matières particulaires en suspension. Un temps d'amorçage de cinq minutes a été alloué à l'adjuvant I, après son addition à la suspension, pour permettre d'augmenter son efficacité. Le meilleur résultat de turbidité est obtenu avec le mélange AIA (4+12+2 mL). Le dosage des agents de floculation est respectivement de 63 g/t pour le polymère A, de 914 g/t pour l'agent I et de 31 g/t pour le polymère A. La turbidité obtenue de ce mélange est de 52 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 19,5 mg/L. Une turbidité de 44 ± 1 NTU a été obtenue antérieurement avec les mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL). Le mélange AIA (4+12+2 mL) est par conséquent efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges.

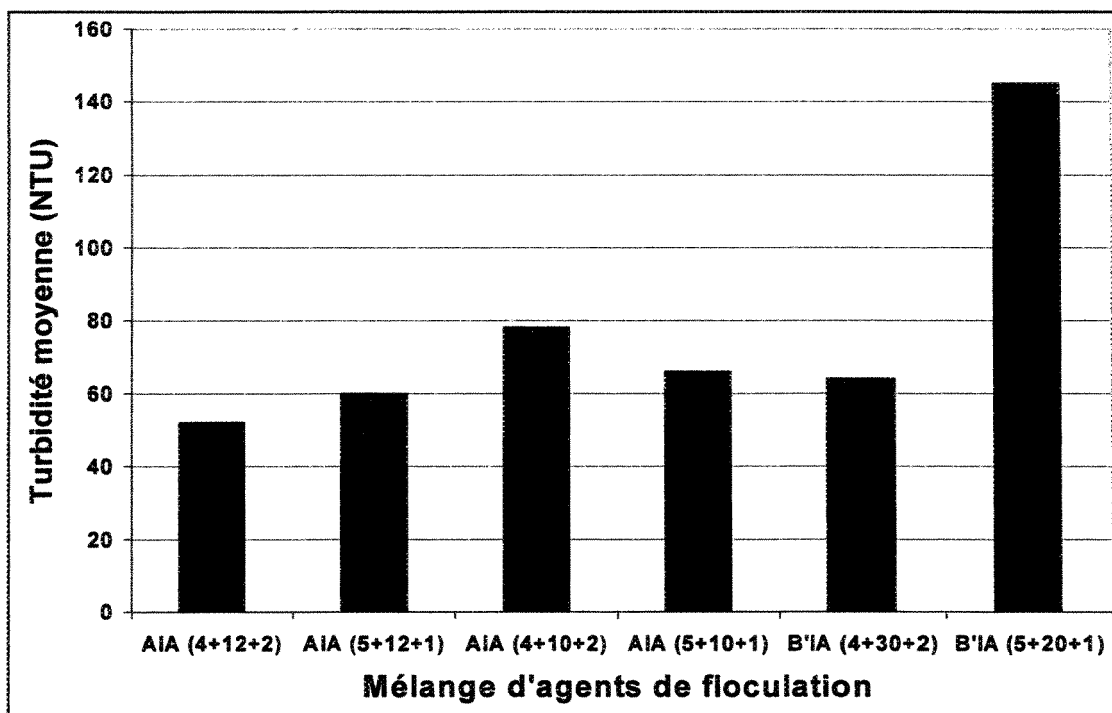


Figure 4.30 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.31 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne, pour l'essai AIA (4+12+2 mL), est de 243 ± 7 g/L. Les concentrations moyennes en matières particulaires du sédiment sont de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%) et de 312 ± 10 g/L pour le polymère B' (100%). Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Les concentrations moyennes obtenues des essais précédents DAB' (4+8+1 mL) et DAB, (5+8+1 mL) sont respectivement de 295 ± 9 g/L et de 308 ± 10 g/L. Le résultat de compaction obtenu de l'utilisation de l'agent I est moins élevé. Le mélange AIA (4+12+2 mL) s'avère donc moins efficace pour compacter le sédiment. De plus, considérant le volume (6 mL) de polymère A ajouté à la suspension, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est moyennement efficace.

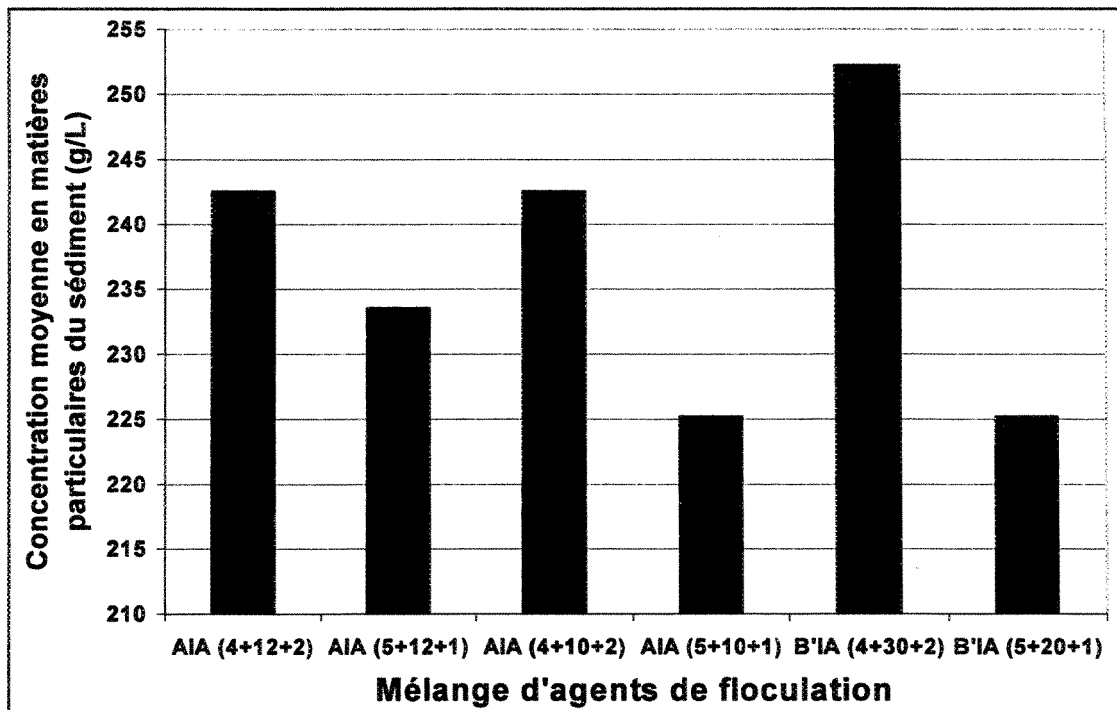


Figure 4.31 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essai sont de $54,3 \pm 2,2$ m/h pour la séquence d'injection AIA (4+12+2 mL), de $47,5 \pm 1,3$ m/h pour AIA (5+12+1 mL), de $51,4 \pm 1,7$ m/h pour AIA (4+10+2 mL), de $56,7 \pm 1,9$ m/h pour AIA (5+10+1 mL), de $66,0 \pm 2,7$ m/h pour B'IA (4+30+2 mL) et de $38,9 \pm 1,9$ m/h pour B'IA (5+20+1 mL). Les vitesses de sédimentation retardée observées varient de 47,5 à 66,0 m/h. Ces vitesses sont très rapides puisque la concentration en matières particulaires de la boue est de 31,53 g/L.

La Figure 4.32 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation D est de 1,0 % p/p et de 0,10

% p/p pour l'agent E. Le meilleur résultat de turbidité a été obtenu avec le mélange DAE (4+8+30 mL). Le dosage des agents de floculation est respectivement de 1055 g/t pour l'agent de floculation D, de 106 g/t pour le polymère A et de 792 g/t pour l'agent E. La turbidité obtenue de l'utilisation de ce mélange est de 35 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 13,1 mg/L. Une turbidité de 44 ± 1 NTU a été obtenue antérieurement avec les mélanges DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL). Le mélange DAE (4+8+30 mL) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boues rouges. Malheureusement, l'agent de floculation E se détériore en partie lorsque injecté dans la solution de caustique concentrée. Une quantité inconnue d'agent E remonte et flotte à la surface du cylindre. L'efficacité de ce mélange est par conséquent réduite puisqu'une quantité inconnue d'agent de floculation E n'a pas réagi en agglomérant les matières particulaires en suspension. La concentration de cet agent doit être de 0,10 % p/p pour restreindre la détérioration contrairement à sa concentration habituelle de 1,0 % p/p. Conséquemment, le volume d'agent E (30 mL) ajouté à la suspension est donc plus important et contribue à la dilution de la suspension. La concentration en matières particulaires de la suspension est de 37,9 g/L. La dilution de la suspension (volume d'agent E ajouté) réduit davantage la concentration en matières particulaires de la suspension. Il a été démontré à la section 4.1.4 qu'une diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse (\downarrow turbidité) est observée en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension. Cette observation permet de croire que ce mélange pourrait être plus efficace dans des conditions optimales. Ce mélange a tout de même permis de réduire considérablement la concentration en matières particulaires d'une suspension de boue rouge.

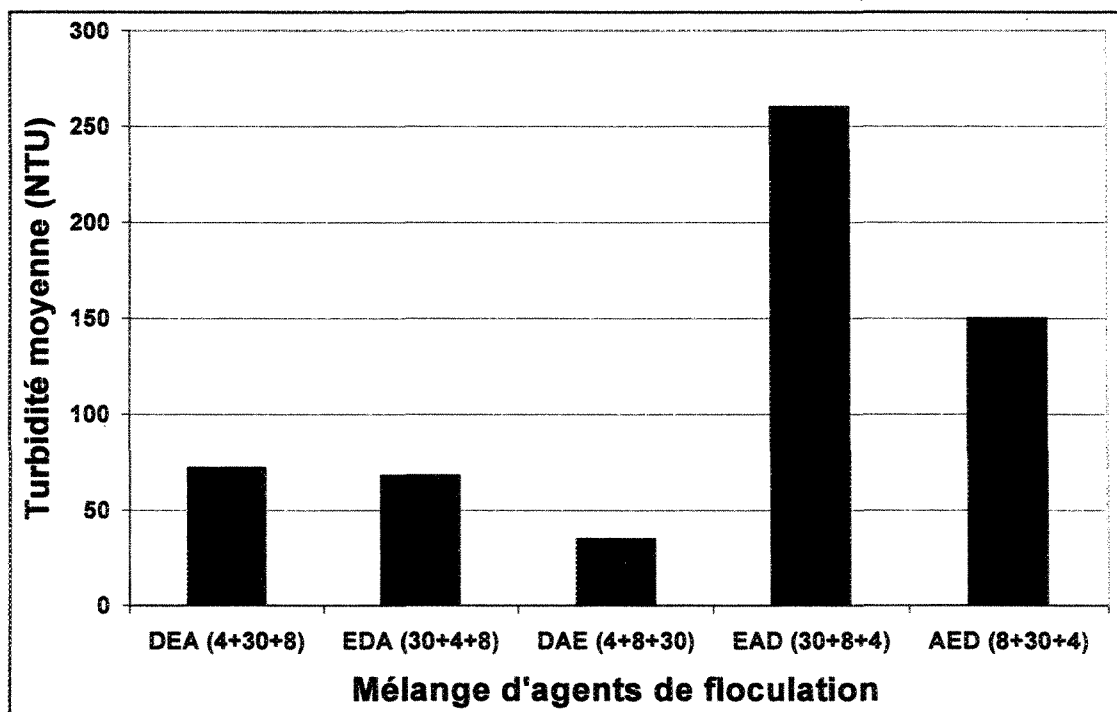


Figure 4.32 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.33 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne, pour l'essai DAE (4+8+30 mL), est de 245 ± 7 g/L. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment est de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%). Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Considérant le volume élevé (8 mL) de polymère A ajouté à la suspension, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est efficace. Les concentrations moyennes obtenues des essais précédents DAB' (4+8+1 mL) et DAB' (5+8+1 mL) sont respectivement de 295 ± 9 g/L et de 308 ± 10 g/L. Le mélange DAE (4+8+30 mL) s'avère donc moins efficace pour compacter le sédiment.

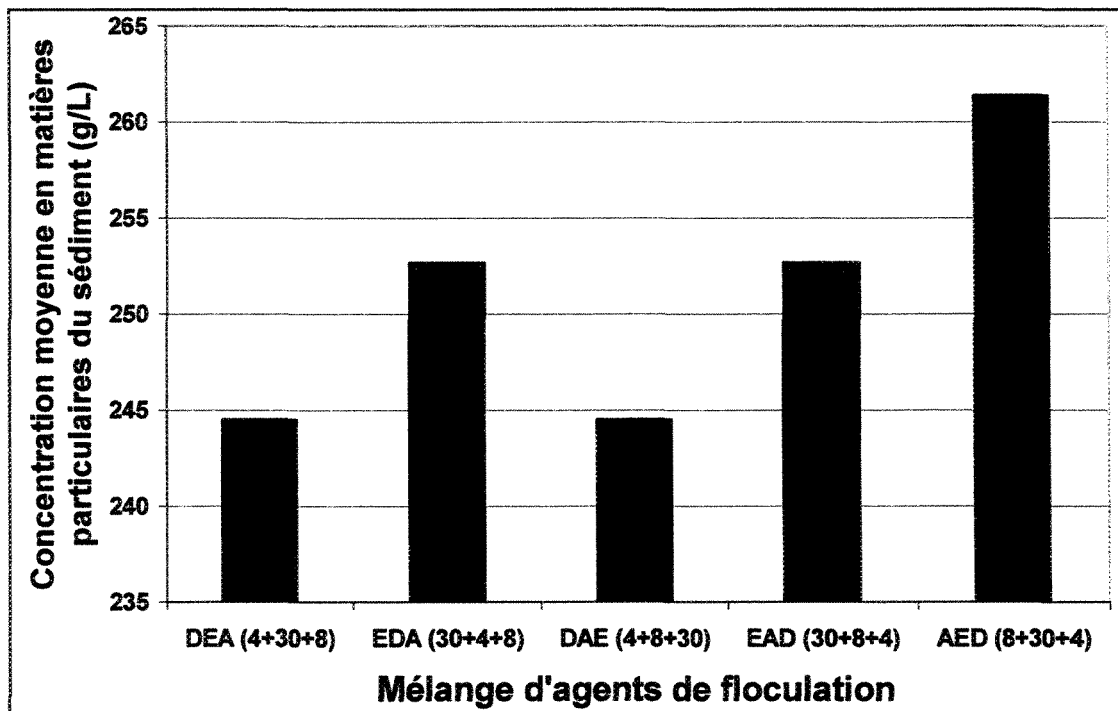


Figure 4.33 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essai sont de $31,3 \pm 1,2$ m/h pour la séquence d'injection DEA (4+30+8 mL), de $37,5 \pm 1,3$ m/h pour EDA (30+4+8 mL), de $13,9 \pm 0,7$ m/h pour DAE (4+8+30 mL), de $24,6 \pm 0,9$ m/h pour EAD (30+8+4 mL) et de $26,4 \pm 0,9$ m/h pour AED (8+30+4 mL). Les vitesses de sédimentation retardée observées varient de 13,9 à 37,7 m/h. La concentration en matières particulaires de la pulpe est légèrement plus élevée que pour les autres séries d'essais soit de 37,9 g/L. Comme mentionné précédemment, une augmentation de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la diminution de la concentration en matières particulaires de la boue a été mise en évidence. La formation de « réseaux » semble être à l'origine de la réduction considérable de la vitesse de sédimentation retardée. Un « réseau » plus compact a

été obtenu en utilisant le mélange DAE (4+8+30 mL). Cependant un dosage cumulatif de 1953 g/t, obtenu de l'utilisation de deux différents agents de floculation, a été nécessaire pour obtenir une réduction considérable de la vitesse de sédimentation retardée.

La Figure 4.34 présente la turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration de la solution de l'agent de floculation D est de 1,0 % p/p et est de 0,20 % p/p pour l'agent I. Le meilleur résultat de turbidité est obtenu avec le mélange DAI (4+8+12 mL). Le dosage des agents de floculation est respectivement de 1138 g/t pour l'agent D, de 114 g/t pour le polymère A et de 683 g/t pour l'agent I. La turbidité obtenue de l'utilisation de ce mélange est de 31 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 11,6 mg/L. Une turbidité de 35 ± 1 NTU a été obtenue antérieurement avec le mélange DAE (4+8+30 mL). Le mélange DAI (4+8+12 mL) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge. Malheureusement, une quantité inconnue d'agent I remonte et flotte à la surface du cylindre. L'efficacité de ce mélange est par conséquent réduite puisqu'une quantité inconnue d'agent de floculation I n'a pas réagi en agglomérant les matières particulaires en suspension. Toutefois, ce mélange a permis d'atteindre le plus bas niveau de turbidité dans ces conditions d'opérations.

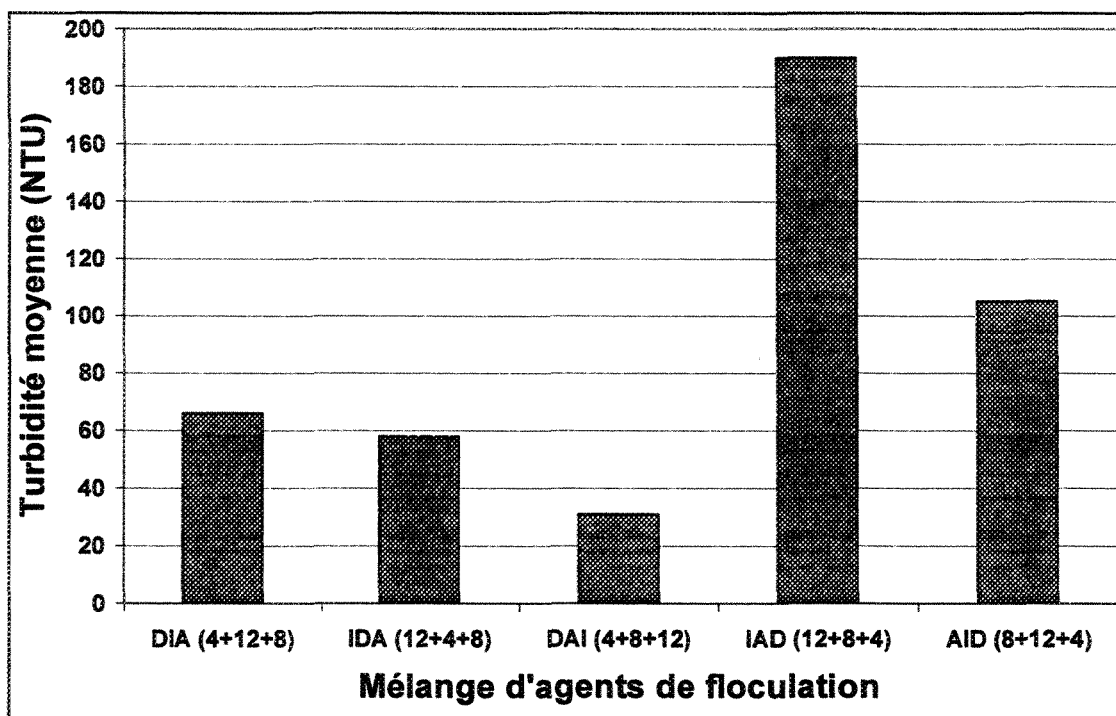


Figure 4.34 Turbidité moyenne de la surverse en fonction du mélange d'agents de floculation

La Figure 4.35 présente la concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation. La concentration moyenne, pour l'essai DAI (4+8+12 mL), est de 220 ± 5 g/L. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment est de 208 ± 5 g/L pour le polymère A (100%). Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Considérant le volume élevé (8 mL) de polymère A ajouté à la suspension, le niveau de compaction obtenu de ce mélange est efficace. La concentration moyenne pour l'essai précédent DAE (4+8+30 mL) est de 245 ± 7 g/L. Le mélange d'agents de floculation DAI (4+8+12 mL) s'avère donc moins efficace pour compacter le sédiment.

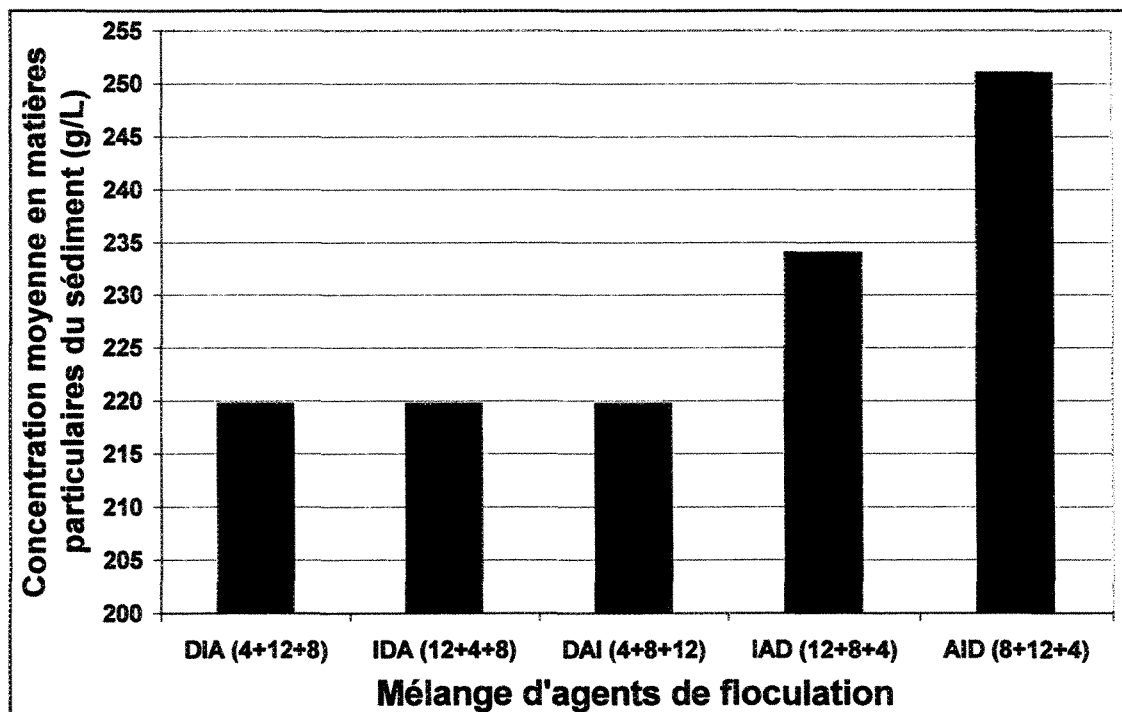


Figure 4.35 Concentration moyenne en matières particulaires du sédiment en fonction du mélange d'agents de floculation

Les vitesses de sédimentation moyennes obtenues pour cette série d'essais sont de $31,6 \pm 1,1$ m/h pour la séquence d'injection DIA (4+12+8 mL), de $35,8 \pm 1,2$ m/h pour IDA (12+4+8 mL), de $15,1 \pm 0,6$ m/h pour DAI (4+8+12 mL), de $23,1 \pm 1,0$ m/h pour IAD (12+8+4 mL) et de $22,4 \pm 0,9$ m/h pour AID (8+12+4 mL). Les vitesses de sédimentation retardée observées varient de 15,1 à 36,5 m/h. Ces vitesses sont très rapides puisque la concentration en matières particulaires de la boue est de 35,15 g/L.

En résumé, le mélange le plus efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge, pour les essais en triple addition d'un mélange d'agents de floculation, est DAI (4+8+12 mL). Le dosage des agents de floculation est de 1138 g/t pour l'agent D, de 114 g/t pour le polymère A et de 683 g/t pour l'agent I. La vitesse de sédimentation retardée moyenne obtenue de l'utilisation de ce mélange est de $15,1 \pm 0,6$ m/h et la turbidité moyenne est de 31 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 11,6 mg/L. Des échantillons de surverse ont été recueillis en usine après l'étape de filtration. Des mesures de turbidité ont été réalisées sur ces échantillons afin de vérifier la quantité de matières particulaires encore présente dans la liqueur avant l'étape de précipitation. La turbidité moyenne obtenue est de 25 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 9,4 mg/L. En se basant sur les résultats mentionnés précédemment, le mélange DAI (4+8+12 mL) est par conséquent très efficace pour réduire la turbidité d'une suspension de boue rouge. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, après une heure de décantation, est de 220 ± 5 g/L. La concentration moyenne obtenue, pour le polymère A (100%), est de 208 ± 5 g/L. Les résultats de compaction obtenus de l'utilisation du polymère A sont généralement moins élevés. Le niveau de compaction obtenu du mélange DAI (4+8+12 mL) est donc peu efficace pour compacter le sédiment.

4.2.2. Concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge

Une série d'essais a été effectuée avec la séquence d'injection DAG pour un dosage correspondant à 1136 g/t pour l'agent de floculation D, à 115 g/t pour le polymère A et à 1420 g/t pour l'agent de floculation G. Le dosage est le même pour chaque essai mais le volume varie en fonction de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge. Les différentes concentrations en matières particulaires de la boue sont de 35,2 g/L, de 55,8 g/L et de 72,2 g/L. La Figure 4.36 présente la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Les résultats obtenus démontrent une diminution de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la boue. À concentration élevée, des observations en laboratoire ont permis de constater la formation de ponts plus compacts, des « réseaux », qui permettent d'agglomérer plus efficacement les particules en suspension. Ces réseaux compacts semblent entraîner une réduction considérable de la vitesse de sédimentation retardée. Les résultats présentés à la Figure 4.36 sont liés par une relation de type puissance.

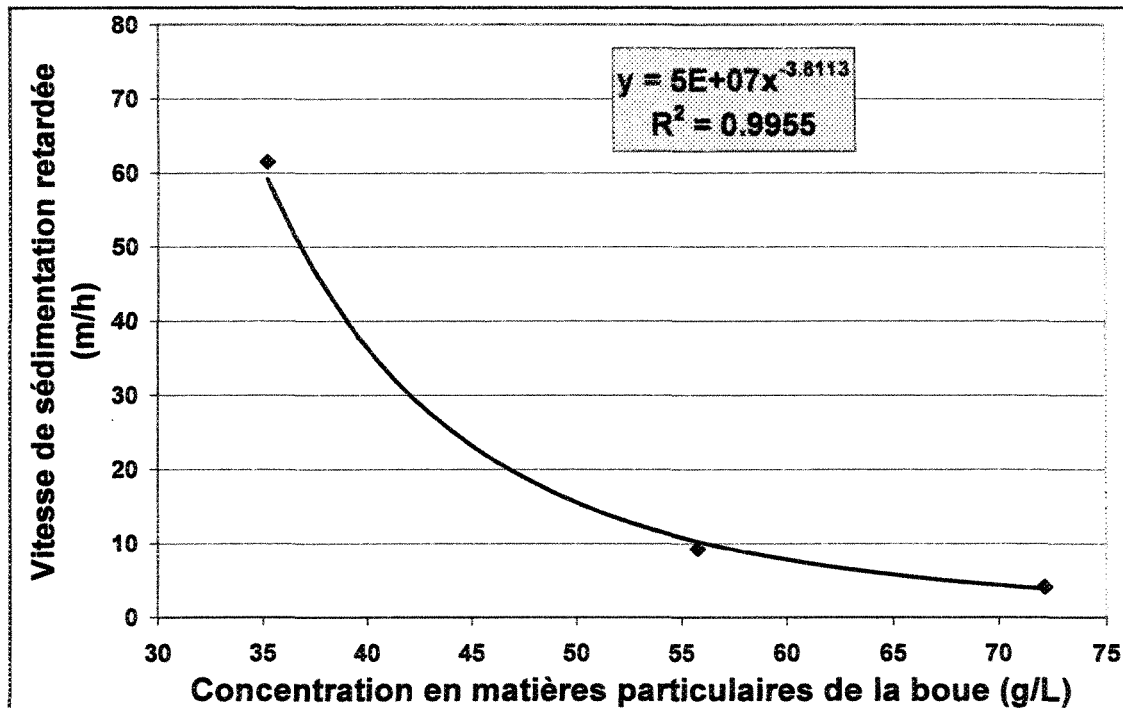


Figure 4.36 Vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue

La Figure 4.37 présente la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Ce graphique met en évidence une diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge. Ce phénomène est probablement dû à une plus grande proximité entre les particules en suspension qui permet d'obtenir une plus grande surface de contact entre les particules de boue et de polymère. 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 en suspension et ainsi, d'améliorer la clarté de la suspension. Les résultats présentés à la Figure 4.37 sont liés par une relation de type puissance.

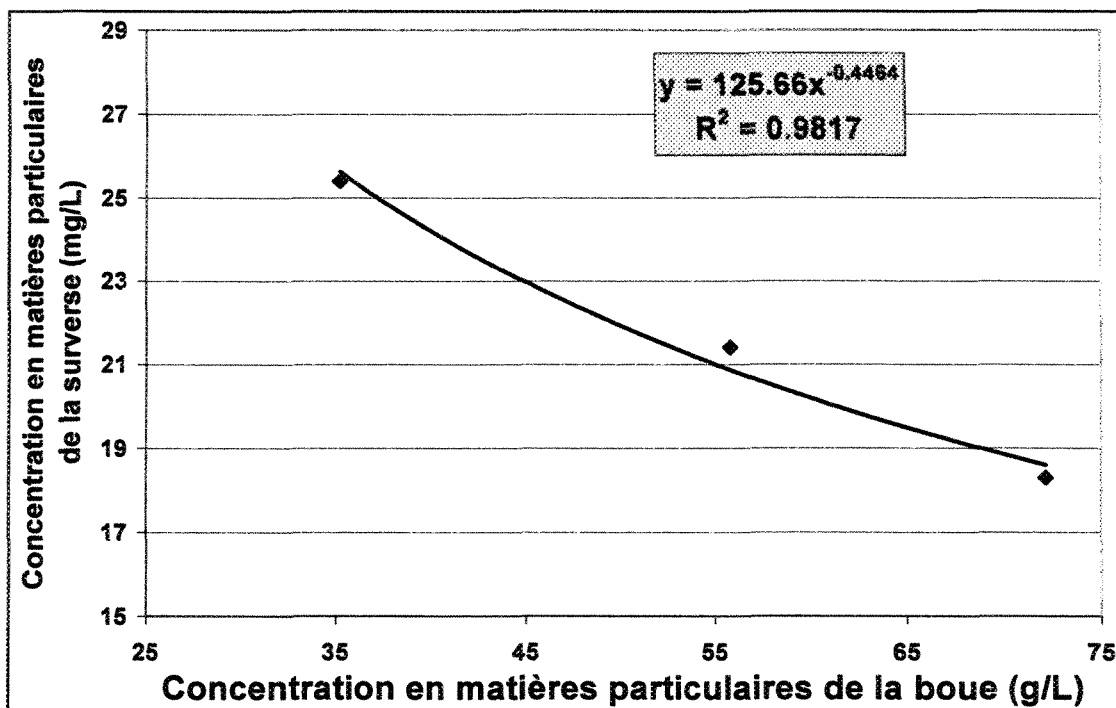


Figure 4.37 Concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue

La série d'essais suivante a été effectuée afin de confirmer la véracité du phénomène observé précédemment. La diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse est liée à l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la boue. Ce phénomène est très important en usine puisque la concentration de la boue se situe généralement autour de 30 g/L.

Une série d'essais a été effectuée avec la séquence d'injection DAI pour un dosage correspondant à 1129 g/t pour l'agent de floculation D, à 115 g/t pour le polymère A et à 1254 g/t pour l'agent de floculation I. Le dosage est le même pour chaque essai mais le volume ajouté à la suspension varie en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Les différentes

concentrations sont de 31,9 g/L, de 49,5 g/L et de 88,6 g/L. La Figure 4.38 présente la vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Les résultats obtenus montrent une diminution de la vitesse de sédimentation retardée en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la boue. Les résultats de cette série d'essais sont les mêmes que pour la série précédente. Les résultats présentés à la Figure 4.38 sont liés par une relation de type puissance.

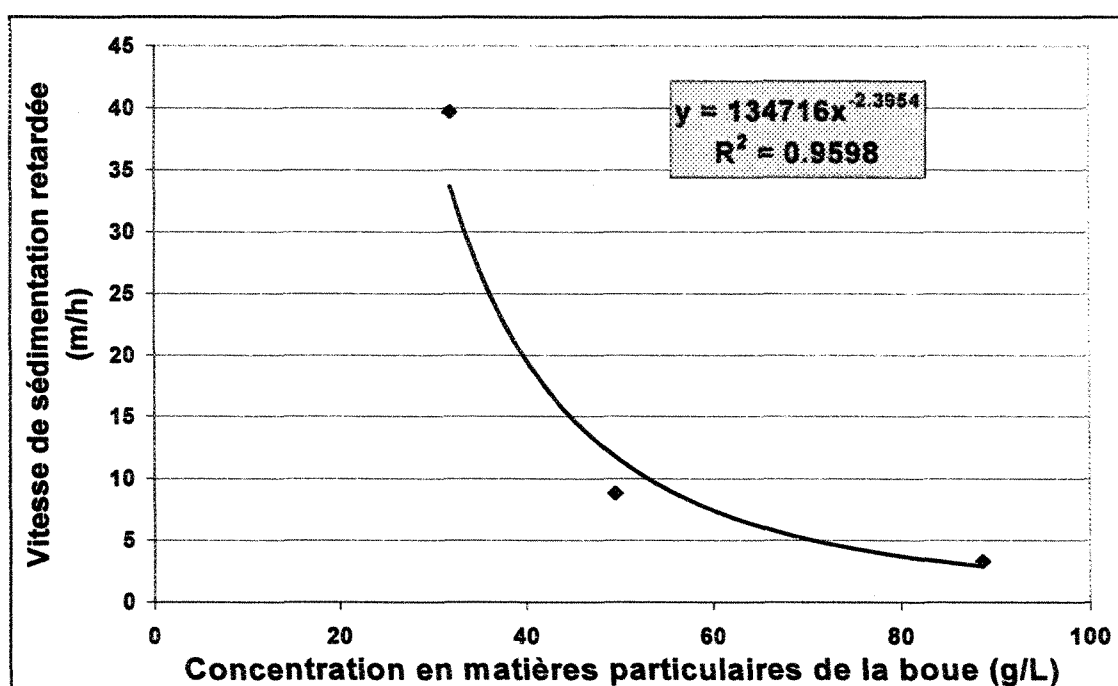


Figure 4.38 Vitesse de sédimentation retardée en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue

La Figure 4.39 présente la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue. Ce graphique met en évidence une diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de l'augmentation

de la concentration en matières particulaires de la suspension de boues rouges. Les résultats présentés à la Figure 4.39 sont également liés par une relation de type puissance. Les résultats obtenus de cette série d'essais appuient la tendance selon laquelle la concentration en matières particulaires de la surverse diminue avec l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle la concentration en matières particulaires de la suspension est très importante pour optimiser la floculation et par conséquent, la clarté de la surverse.

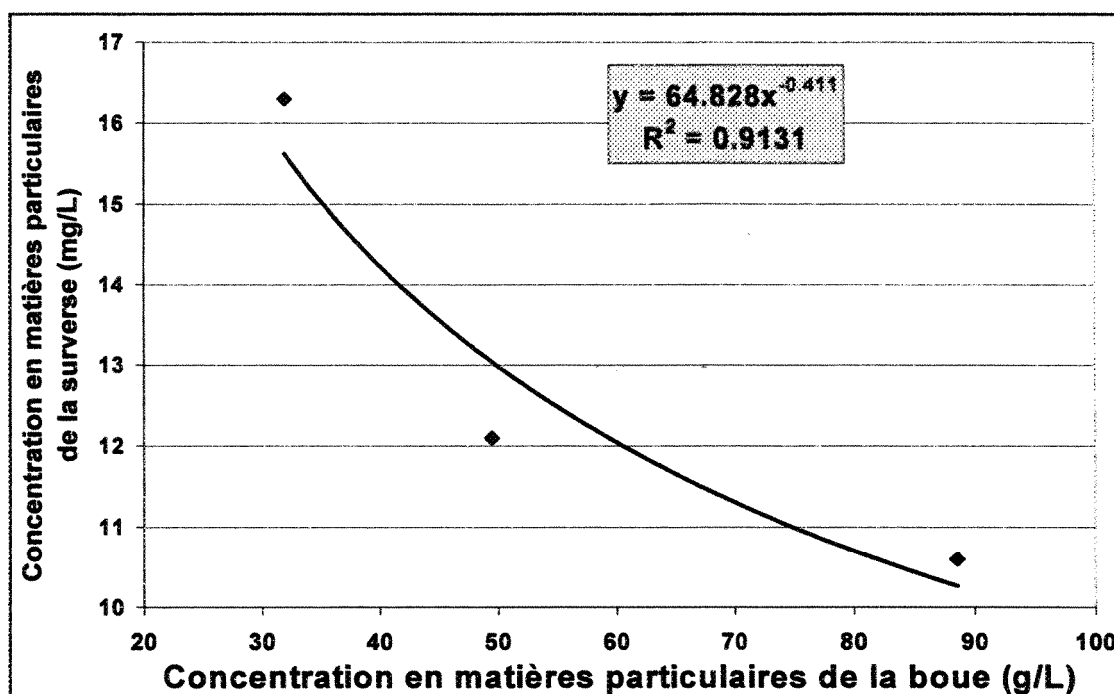


Figure 4.39 Concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de la concentration en matières particulaires de la boue

CONCLUSION

Le premier objectif de ce projet de recherche était d'optimiser la méthodologie du test de sédimentation des boues rouges afin de réduire la variabilité au niveau des mesures de vitesses de décantation pour une série d'essais effectuée dans des conditions expérimentales similaires.

Afin d'y parvenir, il a été nécessaire d'évaluer chaque étape de la procédure dans le but de cibler les erreurs reliées à la dispersion des résultats. Une partie importante de la dispersion des résultats est liée à la méthode de préparation des solutions de polymères. Il a été démontré que l'augmentation de la période de vieillissement au-delà de 24 h améliore considérablement l'activité d'un polymère tout en réduisant le dosage requis pour atteindre une vitesse de sédimentation acceptable [18]. Après 24 h, l'activité continue d'augmenter lentement atteignant un niveau optimal à ~ 72 h. Finalement, une légère réduction dans l'efficacité de la floculation a été observée pour un vieillissement de plus de 144h [18]. Ces observations ont permis de comprendre le processus de solubilisation des polymères et de modifier adéquatement la méthode de préparation afin d'assurer la stabilité de la solution. La méthode de préparation de la suspension de boue rouge et de liqueur Bayer contribue également à la dispersion des résultats. Puisque la vitesse de sédimentation est très sensible à la concentration en matières particulaires de la boue, même une faible variation de cette concentration entraîne une diminution de la reproductibilité entre les essais. Cette vitesse décroît rapidement avec l'augmentation de la surface totale des particules pour un dosage fixé de floculant (et inversement). Chaque cylindre doit donc contenir la même concentration en matières particulaires

de la boue afin de réduire la dispersion des résultats de vitesse de sédimentation. Le choix de l'agitateur est donc important pour maintenir l'homogénéité d'une suspension aqueuse. Les agitateurs à écoulement axial sont supérieurs aux agitateurs à écoulement radial pour maintenir des solides en suspension. Évidemment, plusieurs autres variables influencent la performance d'une agitation. En particulier, il faut considérer le type et le nombre d'agitateur, la géométrie du réservoir, le diamètre du réservoir et de l'agitateur, la position de l'agitateur dans le réservoir (hauteur et largeur), la hauteur du liquide et la distance entre les agitateurs. La prise en considération de toutes ces variables permet d'atteindre des conditions optimales d'agitation dans un réservoir afin d'obtenir une suspension homogène. La méthodologie révisée du test de sédimentation des boues rouges a permis de réduire de 47% la variabilité des résultats pour le polymère A, de 75% pour le polymère B et de 78% pour le polymère C en comparant les résultats obtenus avec la méthodologie initiale. Tous ces résultats démontrent l'amélioration de la reproductibilité de la méthodologie révisée du test de sédimentation des boues rouges. La méthode révisée permet maintenant de reproduire des essais dans les mêmes conditions expérimentales. Des écarts de 5% et moins sont obtenus pour des vitesses de sédimentation entre un polymère d'essai et un polymère témoin. Il devient alors possible de réaliser une étude comparative sur la clarté d'une suspension de boue rouge et de liqueur Bayer par floculation.

Les autres objectifs de ce projet de recherche étaient d'effectuer des essais de floculation dans un cylindre en contrôlant les différentes variables afin d'établir les conditions optimales de séparation solide-liquide et de réduire la quantité de matières particulaires en suspension dans la surverse à un niveau inférieur à ceux retrouvés actuellement en usine.

Une première série d'essais a été effectuée aux conditions d'opérations retrouvées en usine au niveau des décanteurs secondaires ou laveurs. La concentration de la liqueur Bayer est fixée à 10 g/L de caustique et la température du mélange est maintenue à la température ambiante soit environ 21 °C. La première variable considérée est la concentration de la solution des agents de floculation. Ces séries d'essais ont permis de mettre en évidence une augmentation de la turbidité de la surverse en fonction de l'augmentation de la concentration du polymère (de 0,0050 % p/p à 0,50 % p/p). Ces tendances ont été observées pour les trois polymères utilisés dans cette étude.

Une autre variable considérée dans cette étude est la double addition d'un mélange de polymère. Le plus bas résultat de turbidité est obtenu avec le mélange AB (75-25 %). Le dosage des polymères est de 26 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La vitesse de sédimentation retardée moyenne obtenue de ce mélange est $8,0 \pm 1,4$ m/h et la turbidité moyenne 123 ± 2 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 47,3 mg/L. En comparant ce résultat aux résultats de turbidité obtenus en utilisant le polymère le plus efficace, ce mélange permet de réduire la turbidité de la surverse de 26 %. La filtration relative moyenne, pour cet essai, est de 5.02. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, après une heure de décantation, est de 270 ± 7 g/L.

La triple addition d'un mélange d'agents de floculation est une autre variable importante. Le meilleur résultat de turbidité est obtenu avec le mélange IAB (3+5+3 mL). Le dosage des différents agents de floculation est de 302 g/t pour l'agent I, de 10 g/t pour le polymère A et de 6 g/t pour le polymère B. La vitesse de sédimentation retardée moyenne obtenue de ce mélange est $6,9 \pm 0,6$

m/h et la turbidité moyenne est de $8,0 \pm 0,8$ NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 2,2 mg/L. Le polymère A est le plus efficace des trois polymères utilisés pour réaliser cette étude. En comparant les résultats de turbidité obtenus de l'utilisation du polymère A (100%) avec les résultats obtenus en utilisant le mélange IAB (3+5+3 mL), une diminution de 93 % de la turbidité de la surverse est notée. La filtration relative moyenne, pour cet essai, est de 4,39. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, après une heure de décantation, est de 262 ± 2 g/L.

La variation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge a permis de mettre en évidence deux observations importantes. Premièrement, une diminution de la vitesse de sédimentation retardée est observée en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la boue. La seconde observation est une diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge. Les résultats obtenus confirment l'hypothèse selon laquelle la concentration en matières particulaires de la suspension est très importante pour optimiser la floculation et par conséquent, la clarté de la surverse. En portant sur un graphique tous ces résultats, une relation de type puissance est mise en évidence.

Une seconde série d'essais a été effectuée aux conditions d'opérations retrouvées au niveau des décanteurs à haut rendement (DHR). La concentration de la liqueur Bayer est de ~ 220 g/L de caustique, ~ 35 g/L de carbonate et la température du mélange est d'environ 110 °C. La première variable considérée est la triple addition d'un mélange d'agents de floculation. Parmi tous les essais

effectués, le plus bas résultat de turbidité est obtenu avec le mélange DAI (4+8+12). Le dosage des agents de floculation est de 1138 g/t pour l'agent D, de 114 g/t pour le polymère A et de 683 g/t pour l'agent I. La vitesse de sédimentation retardée moyenne obtenue de l'utilisation de ce mélange est $15,1 \pm 0,6$ m/h et la turbidité moyenne est de 31 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 11,6 mg/L. En comparant ce résultat aux résultats de turbidité obtenus en utilisant le polymère le plus efficace, ce mélange permet de réduire la turbidité de la surverse de 74 %. Des échantillons de surverse ont été recueillis en usine après l'étape de filtration. Des mesures de turbidité ont été réalisées sur ces échantillons afin de vérifier la quantité de matières particulaires encore présente dans la liqueur avant l'étape de précipitation. La turbidité moyenne obtenue est de 25 ± 1 NTU correspondant à une concentration en matières particulaires de la surverse de 9,4 mg/L. La concentration moyenne en matières particulaires du sédiment, après une heure de décantation, est de 208 ± 5 g/L.

La variation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge a permis de mettre en évidence les mêmes observations qui ont été faites au niveau des décanteurs secondaires ou laveurs. Premièrement, une diminution de la vitesse de sédimentation retardée est observée en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la boue. La seconde observation est une diminution de la concentration en matières particulaires de la surverse en fonction de l'augmentation de la concentration en matières particulaires de la suspension de boue rouge. En portant sur un graphique tous les résultats obtenus, une relation de type puissance est également mise en évidence.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme ASTM D2035-80, Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water, 1999.
- [2] Connelly, L.J., Owen, D.O., Richardson, P.F., Synthetic flocculant technology in the Bayer process, Light Metals, 1986, p. 61-68.
- [3] Xiang, Yu, Somasundaran, P., Enhanced flocculation with double flocculant, vol. 81, Colloids and surfaces. A. Physicochemical and engineering aspects, 1993, p. 17-23.
- [4] Bulidorova, G.V., Myagchenkov, V.A., Kinetics peculiarities of kaolin sedimentation in the presence of anionic and cationic polyacrylamide flocculants, vol. 57 (6), Colloid journal of the russian academy of sciences, 1995, p. 736-740.
- [5] Narkis, N., Ghattas, B., Rebhun, M. and Rubin, A.J., vol. 9, Water supply, 1991, p. 37-44.
- [6] Biggs, S., Habgood, M., Jameson, G.J., Yan, Y-D., Aggregate structures formed via a bridging flocculation mechanism, vol. 80 (1-3), Conference on Solid-Liquid Separation Systems: special issue, 2000, p. 13-22.

- [7] Bajpai, A.K., Bajpai, S.K., Kinetics of flocculation of iron oxide particles by polyacrylamide, vol. 3 (4), Indian journal of chemical technology, 1996, p. 219-223.
- [8] Département d'ingénierie, 2002, Notes de cours en Ingénierie de l'aluminium 6 GEN 654, UQAC, chap. 2 p. 9-18.
- [9] Rushton, A., Ward, A.S., Holdich, R.G., 2000, Solid-Liquid Filtration and Separation Technology, 2^{ème} édition, Wiley-VCH, République fédérale d'Allemagne, p. 1-587.
- [10] Forbes, D.L., Theorie of flocculation, Copyright WET, Inc., 2000, p. 1-8.
- [11] Momento technique de l'eau, 9^{ème} édition, Tome 1, Copyright par Degremont, Paris, p. 1-271.
- [12] Zhang, J., Huguenard, C., Scarnecchia, C., Menghetti, R., Buffle, J., Stabilization and destabilization of hematite suspensions by neutral and anionic polyacrylamide, vol. 151 (1-2), Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 1999, p. 49-63.
- [13] McCarron, A.M., Crispo, S., Smith-Palmer, T., The flocculation of kaolin by cationic polyacrylamides and the effect of cationic surfactant on this process, vol. 83 (11), Journal of applied polymer science, 2002, p. 2382-2389.

- [14] Khangaonkar, P.R., Bala Subramani, K.J., Flocculation of hematite fines by anionic polyacrylamide polymers, vol. 6 et 7, Minerals engineering, 1993, p. 765-774.
- [15] Hecker, R., Fawell, P.D.; Jefferson, A., The agglomeration of high molecular mass polyacrylamide in aqueous solutions, vol. 70 (11), Journal of applied polymer science, 1998, p. 2241-2250.
- [16] Fulford, G., Ferland, P., Tests de sédimentation des boues rouges, méthode 1234F-90, Alcan International Limitée, Centre de Recherche et de Développement Arvida, 1990, p. 1-16.
- [17] Harris, Daniel C., Quantitative chemical analysis, W.H. Freeman and company, Fifth edition, 1999, p. 51-58.
- [18] 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.
- [19] Kulicke, W.M., Kniewske, R., Long-term change in conformation of macromolecules in solution 2. Poly(acrylamide-co-sodium acrylate), Makromol. Chem., Vol 182, 1981, p. 2277-2287.

- [20] Armenante, P.M., Nagamine, E.U., Susanto, J., Determination of correlations to predict the minimum agitation speed for complete solid suspension in agitated vessels, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 76 no. 3, 1998, p. 413-419.
- [21] Gonzalez, R., Gentina, J.C., Acevedo, F., Optimization of the solids suspension conditions in a continuous stirred tank reactor for the biooxidation of refractory gold concentrates, Process Biotechnology, Vol 6 no. 3, 2003.

ANNEXE A

1. Méthode initiale de préparation des solutions de polymère

Préparer une solution de NaOH, 10 g/L en dissolvant $2,5 \pm 0,01$ g de pastilles de NaOH dans 250 mL d'eau et mélanger. Vider environ 75 mL de cette solution dans une fiole conique tarée de 125 mL. Ajouter un agitateur magnétique et peser $0,5 \pm 0,0001$ g de floculant synthétique en poudre. Saupoudrer lentement le floculant sous agitation dans la fiole conique. Prendre soin de ne pas laisser tomber de morceaux de floculant dans la solution parce que cela causerait la formation de grumeaux ou de masses gonflées de floculant non dissous. Placer la fiole contenant la solution sur une balance et compléter la pesée jusqu'à $100 \pm 0,0001$ g avec la solution de NaOH, 10 gpL. Terminer la dissolution du floculant synthétique sans chauffage. Transférer dans une bouteille de plastique, étiqueter et entreposer dans un endroit frais. Cette solution contient environ 0,5 g de floculant par 100 g de solution (0,5 % p/p).

2. Méthode révisée de préparation des solutions de polymère

Préparer une solution de NaOH 10 gpL en dissolvant $20,0 \pm 0,1$ g de pastilles de NaOH dans un volumétrique de 2 L et compléter jusqu'à la marque avec de l'eau distillée et mélanger. Peser exactement $99,50 \pm 0,01$ g de cette solution dans un bécher de 250 mL. Peser $0,50 \pm 0,01$ g de floculant. Placer l'agitateur mécanique (impeller) dans le bécher, agiter fortement la solution de NaOH (environ 300 rpm) et ajouter le floculant 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 ou de masses gonflées 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 floculation. La solution sera utilisée pour une période de six jours et sera ensuite renouvelée.

3. Méthode initiale de préparation de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer

Ajouter 15 L d'eau distillée dans une chaudière. Vider environ 45 mL de liqueur mère (Bayer) dans le contenant d'eau distillée. Bien agiter avec un agitateur de façon à former un vortex. Introduire dans le vortex environ 930 mL de boue humide et agiter la suspension pendant environ 30 minutes. Cette suspension contient environ 50 g/L de particules solides en suspension.

4. Méthode révisée de préparation de la suspension de boues rouges et de liqueur Bayer

Ajouter 18 L d'eau distillée (pour une hauteur de 29 cm) dans un réservoir (28 cm de diamètre et 36 cm de hauteur). Vider environ 45 mL de liqueur mère (Bayer) dans le contenant d'eau distillée. Agiter la solution avec un agitateur à écoulement axial (de 9 cm de diamètre) positionné à 10 cm du fond du réservoir. Introduire dans le vortex environ 930 mL de boue humide et agiter la suspension pendant environ 30 minutes. Cette suspension contient environ 50 g/L de particules solides en suspension.