



Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de la personne autrice de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'autrice ou l'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

**Approche de développement d'un critère de non-ségrégation statique des
résidus miniers à l'échelle du laboratoire**

DIMA ALAIN DONALD

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*

Génie minéral

Mai 2026

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

Approche de développement d'un critère de non-ségrégation statique des résidus miniers à l'échelle du laboratoire

présenté par **Alain Donald DIMA**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Benoît COURCELLES, président

Mamert MBONIMPA, membre et directeur de recherche

Tikou BELEM, membre et codirecteur de recherche

Abdelkabar MAQSUD, membre et codirecteur de recherche

Ramanambelina Faneva Manambina RARISON, membre externe

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents pour leur présence, l'amour qu'ils m'ont témoigné ainsi que leur soutien multiforme et indéfectible dont j'ai bénéficié tout au long de mon parcours académique.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche, le professeur Mamert MBONIMPA, qui a cru en moi en me donnant l'opportunité de concrétiser mon projet de maîtrise. Je me réjouis pleinement d'avoir eu la chance de travailler à ses côtés. Il a été non seulement un encadreur scientifique, mais aussi un modèle et un mentor qui m'a guidé vers le travail bien fait, la persévérance et la rigueur. Je remercie chaleureusement mes deux-codirecteurs les professeurs Tikou BELEM et Abdelkabar MAQSoud pour leur implication, leur complémentarité scientifique et leurs qualités humaines. J'ai beaucoup appris grâce à vos observations et précieux conseils. Merci pour votre disponibilité et la bonne collaboration tout au long de mon parcours.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à l'Institut de Recherches en Mines et Environnement (IRME -UQAT) ainsi qu'à Polytechnique de Montréal et à ses partenaires miniers (Agnico Eagle Ltée, Mine Canadian Malartic, Dhilmar et IAMGOLD Corp., Mine Raglan-Glencore et Rio Tinto), et au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG).

Je souhaite témoigner mes vifs remerciements à toutes l'équipe IRME, passant du corps professoral au corps administratif, ainsi qu'à l'équipe de l'URSTM, et particulièrement à Akué Sylvette AWOH, directrice de l'URSTM, de m'avoir permis de réaliser mes travaux au sein du laboratoire ainsi qu'à Alain PERREAULT, Joël BEAUREDARD, Raphaël CHARTIER; Jean Christophe TURCOTTE, et Hadj Ghani MENASRIA pour leur soutien technique, leur disponibilité et la bonne collaboration.

J'aimerais remercier le professeur Benoît COURCELLES, président du jury ainsi que le professeur Ramanambelina Faneva Ramanambelina RARISON, évaluateur externe, qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier Davarpanah Seyed Morteza et Saadou Oumarou Danni pour la collaboration et les échanges constructifs dans le cadre de la recherche scientifique. Mes remerciements s'adressent également à tous mes camarades et amis étudiants ainsi qu'aux différentes structures qui m'ont accueilli dans l'exécutif de l'ICM (UQAT et Rouyn-Noranda). Et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin par leurs conseils et contacts, veuillez recevoir l'expression de ma sincère reconnaissance.

RÉSUMÉ

La ségrégation est un phénomène naturel rencontré, entre autres, dans les dépôts hydrauliques de résidus miniers en pulpe ou épaissis. Les résidus entreposés dans les parcs paraissent homogènes à première vue, mais la ségrégation agit en organisant les particules selon leur taille et leur densité sans une manifestation évidente en surface. Cette redistribution silencieuse peut engendrer une hétérogénéité interne des propriétés physiques, hydrogéotechniques et minéralogiques. Dans le cas de résidus potentiellement générateurs de drainage minier acide, il en résulte une complexité au niveau du design des méthodes de restaurations des parcs à résidus. Si la déposition de résidus non-ségrégant conduit à des dépôts homogènes, peu de critères existent pour prédire dans quelles conditions les résidus sont non-ségrégants.

La présente étude jette les bases pour le développement d'un tel critère en étudiant la ségrégation verticale à l'aide d'expériences de sédimentation effectuées au laboratoire en colonnes sur des résidus ayant les pourcentages solides massiques initiaux (C_{w-ini}) de 60%, 65% et 70%. Après des temps de sédimentation, sept échantillons ont été pris le long de chaque colonne d'une hauteur de 90 cm (≈ 36 pouces) et d'un diamètre intérieur de 15 cm (≈ 6 pouces). Des caractérisations de ces échantillons ont permis d'établir les profils verticaux des propriétés physiques (distribution granulométrique, densité relative des grains solides, masse volumique) et rhéologiques.

Trois comportements principaux ont été identifiés pour les résidus étudiés, une forte ségrégation pour $C_{w-ini} = 60\%$, une ségrégation intermédiaire pour $C_{w-ini} = 65\%$ et une pâte cohésive non ségrégant pour $C_{w-ini} = 70\%$. Le niveau de ségrégation a pu être quantifié à l'aide d'un indice de ségrégation (IS) dérivé des profils verticaux des pourcentages solides massiques. Les résultats indiquent que IS diminue lorsque le pourcentage solide initial des résidus C_{w-ini} augmente pour un temps de caillage donné. Pour une valeur C_{w-ini} donnée, IS augmente d'abord avec le temps de sédimentation jusqu'à atteindre une valeur maximale et il diminue ensuite jusqu'à atteindre un équilibre dépendamment du C_{w-ini} considéré. Près des temps de sédimentation de 24h, l'équilibre était presque atteint (à une valeur IS_{24h}) même pour $C_{w-ini} = 60\%$.

Des relations exponentielles décroissantes ont pu être développées entre IS_{24h} et les paramètres physiques et rhéologiques des résidus. Avec un critère critique de non-ségrégation établi à $IS_{24h} \leq 0,05$, les caractéristiques initiales des résidus ont pu être établies comme conditions de non-ségrégation pour les résidus étudiés : $C_{w-ini} \geq 63,5\%$, une masse volumique initiale $\rho_p \geq 1,72 \text{ g/cm}^3$,

un seuil de cisaillement initial $\tau_{0\text{-HB}} \geq 6,85$ Pa et une viscosité dynamique initiale à taux de cisaillement nul $\eta_0 \geq 3,2$ Pa.s. L'approche proposée des critères de non-ségrégation uniparamétriques pourrait aider à développer un critère multiparamétrique qui inclut tous ces paramètres.

ABSTRACT

Segregation is a natural phenomenon observed, among other contexts, in hydraulic deposits of mining tailings in slurry or thickened form. At first glance, tailings stored in tailings storage facilities (TSF) may appear homogeneous, but segregation operates by organizing particles according to their size and density along the flow path. This silent redistribution can lead to internal heterogeneity in physical, hydrogeotechnical, and mineralogical properties. In the case of tailings that may generate acid mine drainage, this results in complexity in designing restoration methods for TSF. While the storage of non-segregating tailings leads to homogeneous deposits, few criteria exist to predict under which conditions tailings remain non-segregating.

This study lays the groundwork for developing such a criterion by examining vertical segregation through laboratory sedimentation experiments conducted in columns on tailings with initial solids mass concentrations (C_{w-ini}) of 60%, 65%, and 70%. After sedimentation periods, seven samples were collected along each column, which measured 90 cm (≈ 36 inches) in height and 15 cm (≈ 6 inches) in intern diameter. Characterization of these samples made it possible to establish vertical profiles of physical properties (particle size distribution, relative density of solid grains, bulk density) and rheological properties. Three main behaviours were identified for the studied tailings : strong segregation for $C_{w-ini} = 60\%$, intermediate segregation for $C_{w-ini} = 65\%$, and a cohesive, non-segregating paste for $C_{w-ini} = 70\%$. The degree of segregation was quantified using a segregation index (IS) derived from vertical profiles of solids mass concentration. Results indicate that IS decreases as the initial solids concentration (C_{w-ini}) increases for a given settling time. For a given C_{w-ini} value, IS first increases with sedimentation time until reaching a maximum, then decreases until reaching an equilibrium that depends on the considered C_{w-ini} . Near a sedimentation time of 24 hours, equilibrium was almost reached (at a value IS_{24h}) even for $C_{w-ini} = 60\%$.

Decreasing exponential relationships were established between $IS_{(24h)}$ and the physical and rheological parameters of the tailings. Using a critical non-segregation criterion defined as $IS_{(24h)} \leq 0.05$, the initial characteristics of the tailings could be identified as conditions for non-segregation for the studied materials: $C_{w-ini} \geq 63.5\%$, initial bulk density $\rho_p \geq 1.72 \text{ g/cm}^3$, initial yield stress $\tau_{0-HB} \geq 6.85 \text{ Pa}$, and initial dynamic viscosity at zero shear rate $\eta_0 \geq 3.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. The proposed uni-parameter non-segregation criteria approach could help develop a multi-parameter criterion incorporating all these parameters.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES ANNEXES	
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectif du projet de recherche	4
1.4 Hypothèse.....	4
1.5 Structure du mémoire	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Types, méthodes de transport et de dépôt des résidus miniers.....	6
2.1.1 Types de résidus miniers (suivant leur consistance)	6
2.1.2 Résidus en pulpe.....	6
2.1.3 Résidus épaissis.....	10
2.1.4 Résidus en pâte.....	11
2.1.5 Résidus filtrés.....	12
2.1.6 Retour sur les critères de passage d'un type de résidus à un autre	13
2.1.7 Classification géotechnique et propriétés des résidus miniers	14
2.2 Comportement rhéologique.....	15

2.2.1	Définition de la rhéologie.....	15
2.2.2	Fluides newtoniens.....	17
2.2.3	Fluides non-newtoniens.....	18
2.2.4	Modèles rhéologiques.....	20
2.2.5	Comportement rhéologique des résidus miniers	22
2.3	Ségrégation des résidus	23
2.3.1	Définition.....	23
2.3.2	Impact de la ségrégation latérale sur les propriétés physiques dans les parcs à résidus 24	
2.3.3	Impact de la ségrégation latérale sur la conductivité hydraulique dans les parcs à résidus 24	
2.4	Processus de sédimentation	26
2.4.1	Types de sédimentation statique.....	26
2.4.2	Vitesse de sédimentation.....	28
2.4.3	Forces en présence lors d'une sédimentation.....	30
2.5	Facteurs d'influence de la sédimentation	33
2.5.1	Effet de la taille et de la densité des particules.....	33
2.5.2	Effet de la paroi et de l'inclinaison de la colonne	34
2.5.3	Effet du diamètre de la colonne	35
2.5.4	Effet de la concentration solide initiale	35
2.6	Indice de ségrégation des résidus miniers	37
2.7	Récapitulatif et besoins en recherche	39
CHAPITRE 3	MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES.....	40
3.1	Matériaux	40
3.2	Homogénéisation et caractérisations initiales des résidus miniers.....	40

3.2.1	Caractérisation physique	42
3.2.2	Caractérisation chimique	45
3.2.3	Caractérisation minéralogique	45
3.3	Protocole des tests de sédimentation statiques en colonnes	46
3.3.1	Préparation des résidus	46
3.3.2	Remplissage des colonnes et test de sédimentation	47
3.4	Caractérisations pré- et post-sédimentation	48
3.4.1	Détermination de la masse volumique	49
3.4.2	Caractérisation rhéologique	49
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	53
4.1	Vitesse de sédimentation	53
4.2	Profils verticaux du pourcentage solide massique	56
4.3	Profils verticaux de la masse volumique	58
4.4	Profils verticaux de la taille des particules	60
4.5	Profils verticaux des propriétés rhéologiques	64
CHAPITRE 5	DISCUSSION DES RÉSULTATS	73
5.1	Condition de non-ségrégation uniparamétrique	73
5.2	Approche pour la détermination d'un critère de ségrégation multiparamétrique	76
5.3	Tests de sédimentation vs tests d'écoulement	76
CHAPITRE 6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	78
6.1	Conclusions	78
6.2	Recommandations	79
RÉFÉRENCES		81
ANNEXES		90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Types de fluides non-newtoniens, catégories et caractéristiques	19
Tableau 2.2 : Vitesse de sédimentation des particules en suspension dans l'eau (Shammas et al., 2005).....	33
Tableau 3.1 : Valeurs initiales de l'analyse granulométrique des échantillons de résidus étudiés	44
Tableau 3.2 caractéristique des résidus utilisés pour les essais de sédimentation en colonne set temps de sédimentation	48
Tableau 3.3 Modèles et principes des modèles d'écoulements	51
Tableau A.1 Résultats XRF	90
Tableau A.2 Résultats de l'analyse DRX	91
Tableau A.3 Formules chimiques des minéraux identifiés par diffraction aux rayons DRX.....	91
Tableau C.1 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 60\%$ (15min, 30min, 1h)	96
Tableau C.2 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 60\%$ (2h,3h,4h)	97
Tableau C.3 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 60\%$ (5h,6h,24h)	98
Tableau C.4 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 65\%$ (15min, 30 min,1h)	99
Tableau C.5 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 65\%$ (2h,3h,4h)	100
Tableau C.6 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 65\%$ (5h,6h et 24h) ...	101
Tableau C.7 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 70\%$ (15min, 30min,1h)	102
Tableau C.8 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 70\%$ (2h,3h,4h)	103
Tableau C.9 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 70\%$ (5h,6h et 24h) ...	104

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma conceptuel de la technique de NPS avec couverture monocouche (adapté de Aubertin et al., 2015).....	3
Figure 2.1 Aspect des résidus en pulpe (Bussière, 2007).....	7
Figure 2.2 Méthode de décharge ponctuelle (Vick, 1990).....	8
Figure 2.3 Lance à robinets (Vick, 1990).....	8
Figure 2.4 Entreposage des résidus par hydrocyclone (Blight, 2009).....	9
Figure 2.5 Aspect des résidus épaissis, exemple de Esperanza TSF Centinela Mine Chili (Cacciuttolo & Valenzuela, 2022).....	10
Figure 2.6 Aspect des résidus en pâte (Martin et al., 2005).....	11
Figure 2.7 Dépôts des résidus en pâtes (Theriault et al., 2003) A) Dépôt progressif sous forme de cône B) superposition des couches 1 de pâtes C) Fine couche de résidus superposée aux résidus séchés.	12
Figure 2.8 Déposition des résidus filtrés (Kissiovo, 2020)	13
Figure 2.9 Courbes granulométriques typiques des résidus miniers (Aubertin et al., 2002).	14
Figure 2.10 Cisaillement d'un fluide visqueux entre deux plaques parallèles (Roitto,2014).	16
Figure 2.11 Fluide newtonien : a) Courbes d'écoulement et b) Courbe de viscosité.....	17
Figure 2.12 Comportement rhéologique associé (Paterson, 2006).....	18
Figure 2.13 Comportement rhéologique associé (Boger, 2013).....	22
Figure 2.14 Plan schématique des zones avec des résidus à granulométries différentes dans un parc à résidus (Pullum et al., 2018).....	24
Figure 2.15 Ordre de distribution de la conductivité hydraulique par ordre de grandeur dans un parc à résidus (MEND, 1996)	25
Figure 2.16 Variation de la conductivité hydraulique saturée transversale et verticale avec la distance de point de décharge (adapté de Vick 1990, Temgoua, 2021).....	26
Figure 2.17 Détermination de la zone de sédimentation : libre ou entravée (Darby, 2001)	27

Figure 2.18 Variation du critère de stabilité des particules pour différentes formes et orientations (Jossic et Magnin, 2001).	29
Figure 2.19 Répartition des contraintes de cisaillement autour de la particule dans un fluide au repos (a) et dans un écoulement cisailé (b) (Talmon & Huisman, 2005).....	30
Figure 2.20 Hauteur de l'interface suspension/liquide en fonction du temps pour une suspension de particules monodisperses de verre, pour différents angles d'inclinaison de la colonne (Herbolzheimer & Acrivos 1979).....	35
Figure 2.21 Influence du pourcentage solide initial C_{w-ini} , de SFR (sand to fine ratio) et FWR (wine to water ratio) sur l'évolution des profils verticaux de pourcentage solide et de teneur en sable (particules $>44 \mu m$) au cours de la sédimentation : a) et d) $C_{w-ini}=18,8\%$, SFR=1 et FWR=10, b) et e) $C_{w-ini}=46,2\%$, SFR=1 et FWR=30 et c) et f) $C_{w-ini}=57,1\%$, SFR=1 et FWR=40 (Mihiretu, 2009).	37
Figure 3.1 Étapes suivies pour la préparation et la caractérisation initiale des résidus: a) récupération du surnageant, b) transfert des résidus dans les chambres de la pompe-malaxeur, c) homogénéisation des résidus, d) Mise en lots des résidus pour la caractérisation initiale.	41
Figure 3.2 Caractérisations initiales des résidus et équipements associés	41
Figure 3.3 Équipements de caractérisation utilisés	42
Figure 3.4 Courbe de distribution granulométrique des résidus	44
Figure 3.5 Spectrogramme de diffraction des rayons X des résidus étudiés.	46
Figure 3.6 Colonnes de sédimentation typique avec des ports d'échantillonnage (a) et une colonne transparente utilisée pour la détermination de la vitesse de sédimentation (b)	48
Figure 3.7 Croisillon (vane) du rhéomètre AR2000 utilisé.....	50
Figure 3.8 Modèle d'écoulement (TA Instruments).....	52
Figure 4.1 Courbe de sédimentation et évolution du pourcentage solide des résidus sans prise en compte de l'eau surnageant (a) Estimation théorique de l'évolution de C_w avec le retrait d'eau (b).	54
Figure 4.2 Vitesse de sédimentation.....	55

Figure 4.3 Profils de pourcentage solides des résidus le long de la hauteur de la colonne après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 6h et 24h pour des pourcentages solides de : a) $C_{w-ini} = 60\%$, b) $C_{w-ini} = 65\%$ et c) $C_{w-ini} = 70\%$ 57

Figure 4.4 Profils des masses volumiques des pulpes échantillonnées le long de la hauteur de la colonne après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 6h, et 24h pour des teneurs en eau initiale de : a) $C_{w-ini} = 60\%$, b) $C_{w-ini} = 65\%$ et c) $C_{w-ini} = 70\%$ 59

Figure 4.5 Distributions de la taille des particules échantillonnées le long de la hauteur de la colonne après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 6h et 24h pour des pourcentages solides initiaux de : $C_{w-ini} = 60\%$ (a, b, c, d, e,) ; $C_{w-ini} = 65\%$ (f, g, h, i, j) et $C_{w-ini} = 70\%$ (k, l, m, n, o). 62

Figure 4.6 Évolutions des profils verticaux des diamètres D_{50} , D_{60} et D_{90} après des temps de sédimentation de : 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests réalisés avec des résidus contenant des pourcentages solides initiaux de : $C_{w-ini} = 60\%$ (a - c), 65% (d - f) et 70% (g - j). 64

Figure 4.7 Rhéogramme typique (a) et courbe de viscosité (b) des échantillons prélevés à différentes profondeurs pour une pulpe avec $C_{w-ini} = 65\%$ après un temps de sédimentation de 6h. 65

Figure 4.8 Évolutions des profils verticaux des propriétés rhéologiques après des temps de sédimentation de : 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests réalisés avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de 60%: (a) seuil de cisaillement τ_{0-HB} , (b) indice d'écoulement n , (c) Viscosité nulle η_0 et (d) Viscosité à l'infini η_∞ 68

Figure 4.9 Évolutions des profils verticaux des propriétés rhéologiques après des temps de sédimentation de : 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests de sédimentation réalisés avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de 65%: seuil de cisaillement τ_{0-HB} (a), indice d'écoulement n (b), viscosité nulle η_0 (c) et viscosité à l'infini η_∞ (d). 70

Figure 4.10 Évolutions des profils verticaux des propriétés rhéologiques après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des test de sédimentation réalisés avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de 70%: (a) Seuil de

cisaillement τ_{0-HB} , (b) indice d'écoulement n , (c) Viscosité nulle η_0 et (d) viscosité à l'infini η_∞	72
Figure 5.1 Évolution temporelle de l'indice de ségrégation (IS) pour différent pourcentage initial C_{w-ini} de : 60%,65% et 70% avec un seuil d'indice de ségrégation $IS = 0,05$	73
Figure 5.2 Variations de l'indice de ségrégation après 24h de sédimentation (IS_{24h}) en fonction des propriétés initiales de la pulpe : (a) pourcentage solide; (b) Masse volumique et (c) seuil de cisaillement (d) viscosité nulle	75
Figure B.1 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 60\%$ (15min,30min,1h,2h, 3h, 4h, 5h et 6h)	92
Figure B.2 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 60\%$ (24h) et $C_{w-ini} = 65\%$ (15min,30min,1h,2h, 3h, 4h et 5h)	93
Figure B.3 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 65\%$ (6h et 24h) et $C_{w-ini} = 70\%$ (15min,30min,1h,2h, 3h et 4h)	94
Figure B.4 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 70\%$ (5h, 6h et 24h)	95

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEV : pression d'entrée d'air

ASTM : American Society for Testing and Materials

C_v : concentration volumique

C_w (%) : pourcentage solide

$C_{w\text{-ini}}$: pourcentage solide initial

$C_{w\text{-fin}}$: pourcentage solide final

$C_{w\text{-max}}$: pourcentage solide maximal

DMA : drainage minier acide

D_x : distribution granulométrique

e : indice des vides

G_s : densité relative des grains solides

H : est la hauteur de l'interface eau-résidus à partir de la base de la colonne

H_{ti} : est la hauteur de l'interface mesurée à un temps t_i .

IS : indice de ségrégation

K_{sat} : conductivité hydraulique saturée

M_s : masse sèche (g)

M_w : masse d'eau (g)

$M_{w\text{-aj}}$: masse d'eau à ajouter (g)

n : indice d'écoulement

η : viscosité dynamique

η_0 : viscosité nul (Pa.s)

η_∞ : viscosité infinie de Cross

$P_{80\text{ }\mu\text{m}}$: pourcentage de particule inférieur à $80\mu\text{m}$ (%)

P_{crit} : point critique

PGA : potentiel générateur d'acide

PTE : port d'échantillonnage

S_r : degré de saturation (%)

TSF : tailings Storage Facility ou encore parc à résidus

URSTM : unité de recherche et de service en technologie minérale

V_{cr} : vitesse d'écoulement critique

V_s : vitesse de sédimentation (mm/min)

V_{s-max} : vitesse de sédimentation maximale

V_{s-ti} : vitesse de sédimentation (m/s) au temps de sédimentation t_i ,

w : teneur en eau massique

τ_{0-HB} : seuil de cisaillement de Herschel-Bulkley

PNK : porte le nom des auteurs (Ponder, Nakamura et Kuroda), ils ont développé une formule qui permet de décrire la sédimentation dans les systèmes inclinés appelé effet Boycott.

SFR : (= masse de sable ou particules avec $d > 44 \mu m$ / masse de la fraction de fines ou particules avec $d < 44 \mu m$).

FWR : (= masse eau / masse de la fraction de fines ou particules avec $d < 44 \mu m$).

.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Minéralogie des résidus	90
ANNEXE B Distributions granulométriques	92
ANNEXE C Propriétés rhéologiques	96
ANNEXE D Calcul de l'Indice de ségrégation.....	105

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'industrie minière occupe une place importante dans l'économie de plusieurs pays du monde. Au cours de la valorisation des minerais, des quantités importantes de résidus miniers (type de rejet provenant de l'usine de traitement) sont produites et entreposées dans les parcs à résidus. Ces résidus sont souvent déposés selon la méthode conventionnelle sous forme de pulpe ou de résidus densifiés (épaissis, en pâte ou filtrés) (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002; Spitz & Trudinger, 2019). Les résidus en pulpe, épaissis, en pâte et filtrés sont communément caractérisés comme des résidus ayant respectivement des pourcentages solides massiques ($C_w = \text{masse du solide/masse totale}$) situés dans les intervalles suivants : 20 à 45%, 45 à 70%, 70 à 85% et supérieur à 85% (Bussière, 2007). Plus C_w augmente, plus la matrice de résidus est homogène (les résidus conservent ces propriétés en tout point de la matrice) après leur entreposage dans le parc à résidus.

Dans certaines conditions de dépôt hydraulique particulièrement de résidus en pâte ou épaissis, une ségrégation des particules de résidus peut avoir lieu suivant la distribution des tailles granulométriques, la densité, la forme des particules, le pourcentage solide et les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité) ainsi que des caractéristiques de l'écoulement (vitesse et tirant) des résidus durant leur déposition (Behnam Pirouz et al., 2008; Mihiretu, 2009; Fitton, 2018). Le dépôt préférentiel de particules de résidus causé par l'entreposage hydraulique peut créer des zones de plages de fraction granulométrique variables (grossières, moyennes et fines) dans un parc à résidus (Vick, 1990; Blight, 2009). L'hétérogénéité de la distribution granulométrique des résidus a un impact sur le comportement hydrogéotechnique (Bussière, 2007). La ségrégation vient affecter la répartition spatiale des propriétés hydrogéotechniques (capacité de rétention d'eau, conductivité hydraulique saturée et niveau de la nappe phréatique) et minéralogiques (présence de sulfure métallique) des résidus (Driouky, 2020; Temgoua, 2021).

Le phénomène de ségrégation des résidus peut être étudié au laboratoire en amont par des essais statiques et dynamiques. Les essais statiques sont réalisés par des colonnes de sédimentation et permettent d'observer la distribution verticale des propriétés physiques des particules. Pour quantifier ce phénomène, un critère de ségrégation (IS) qui sert à évaluer les conditions de non-ségrégation des résidus a été introduit. Donahue et al. (2008) propose de le calculer à partir du pourcentage solide moyen ($C_{w\text{-moy}}$) une limite de non-ségrégation statique, ou tenir compte de la

portion fine ($d < 44 \mu\text{m}$) dans les couches de sable bitumineux et du rapport (sable/fine). Mihiretu (2009) adopte un seuil conçu pour mesurer la variabilité granulométrique dans les dépôts statiques et dynamiques des résidus miniers. D'autres considérations ont été prises pour définir la limite de ségrégation tenant respectivement compte du profil de concentration solide après sédimentation (Sorta, 2015) et d'un modèle continu de ségrégation basé sur la distribution de la taille des particules et l'équilibre des forces (Li & Van Zyl, 2022, 2023, 2024).

Lorsque ces résidus contiennent des sulfures métalliques, ils peuvent s'oxyder au contact de l'eau et de l'oxygène contenu dans l'air, ce qui peut donner naissance au drainage minier acide (DMA), si le pouvoir neutralisant des résidus est faible. Le DMA engendre des répercussions néfastes sur l'environnement. En effet, il entraîne la libération des métaux lourds tels que le cadmium (Cd), le plomb (Pb), ou encore le nickel (Ni) favorisant ainsi leur dissolution dans le milieu environnant, ce qui conduit à la contamination de la nappe (Wolkersdorfer & Howell, 2004). La prévention de la formation du DMA représente un défi majeur pour l'industrie minière, en particulier lors des phases de restauration des sites (Aubertin et al., 2015). Les principales méthodes de restauration actuellement employées visent à contrôler les flux d'eau et d'oxygène afin de limiter l'oxydation des minéraux (Bussière et al., 2005; Aubertin et al., 2015).

Dans les zones à climat tempéré froid à humide, comme le Québec où le bilan hydrique annuel est positif, il est difficile d'empêcher les infiltrations d'eau sur un site de grande superficie, surtout s'il est relativement plat, par exemple un parc à résidus (Aubertin et al., 2015). Il est plus facile de contrôler l'entrée de l'oxygène que celle de l'eau à la surface des résidus (Johnson & Hallberg, 2005; Ouangrawa et al., 2007; Bussière et al., 2007; Mbonimpa et al., 2008; Aubertin et al., 2015; Bussière & Guittonny, 2020). Parmi les méthodes proposées utilisant la barrière à l'oxygène, on retrouve la nappe phréatique surélevée (NPS) combinée avec un recouvrement monocouche (fait de matériaux naturels ou de résidus non potentiellement générateurs d'acide). La figure 1.1 ci-dessous montre le schéma conceptuel de la technique de NPS avec couverture monocouche. Il consiste à rehausser volontairement le niveau phréatique afin de maintenir les résidus réactifs au-dessus de la nappe proche de la saturation (degré de saturation $S_r > 85\%$) et ainsi limiter leur oxydation (Dagenais et al., 2006; Ouangrawa et al., 2007). En effet, comme le coefficient de diffusion de l'oxygène est très faible pour des degrés de saturation élevés ($>85\%$), le flux d'oxygène consommé par les résidus va être considérablement réduit (Dagenais et al., 2006;

Ouangrawa et al., 2009; Ethier et al., 2018). L'épaisseur des résidus (h) dans la frange capillaire ne doit pas dépasser la pression d'entrée d'air (AEV, exprimée en termes de hauteur d'eau) des résidus et une couche de protection (monocouche), qui permet de contrôler les échanges sol-atmosphère, doit être mise en place pour améliorer l'efficacité de la technique (Aubertin et al., 2015).

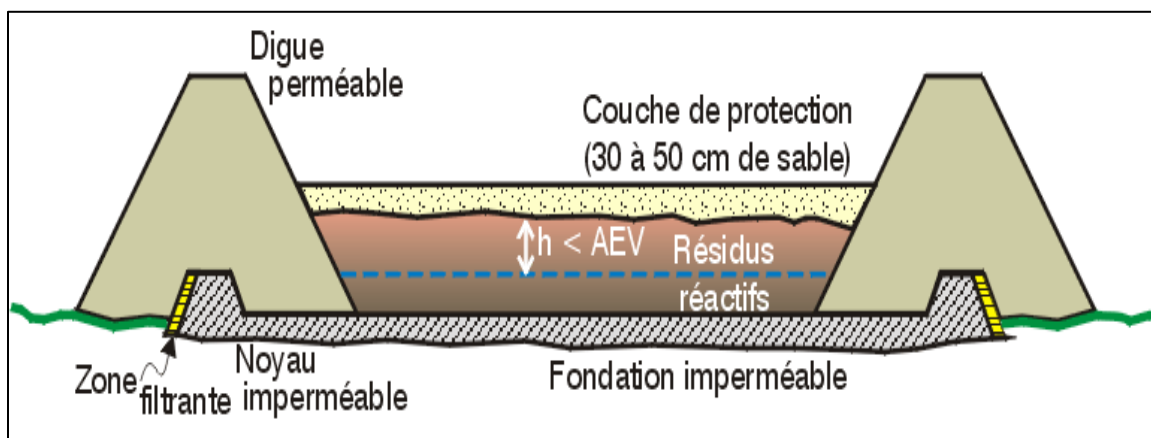


Figure 1.1 Schéma conceptuel de la technique de NPS avec couverture monocouche (adapté de Aubertin et al., 2015)

1.2 Problématique

Il a été démontré à l'échelle du laboratoire, des mesures de terrain et de modélisations numériques que la technique des NPS est sensible à la profondeur de la nappe phréatique (Ouangrawa et al., 2009); elle-même pouvant être influencée par la variation latérale de la conductivité hydraulique et les propriétés de rétention d'eau résultant de la ségrégation granulométrique des résidus. Ainsi, en affectant le niveau de la nappe, la ségrégation devient nuisible à l'efficacité de NPS. Jusqu'à présent, les études réalisées n'ont pas tenu compte de l'effet de la ségrégation des résidus sur l'efficacité de la technique de NPS combinée au recouvrement monocouche. La mise en place de résidus non-ségrégants pourrait contribuer à améliorer la performance de cette technique.

Si l'on peut s'attendre à une ségrégation de particules lors de la déposition hydraulique des résidus en pulpe, le pourcentage solide des résidus épaissis à partir duquel ils vont devenir non ségrégant et permettre la mise en place d'un matériau homogène ne peut, à ce jour, être défini. D'ailleurs, tout critère basé exclusivement sur le pourcentage solide massique reste imprécis et insuffisant, car le comportement des résidus en phase de déposition dépend non seulement de C_w , mais aussi

d'autres facteurs (distribution granulométrique, densité relative des grains solides, propriétés rhéologiques, vitesse d'écoulement). Il serait alors important d'établir un critère définissant les conditions de ségrégation et non-ségrégation qui tiennent compte de ces facteurs. Ce critère pourrait permettre aux industriels d'anticiper le choix des équipements de densification faisant que les résidus soient non ségrégant dans l'objectif d'améliorer le design et la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée (NPS).

1.3 Objectif du projet de recherche

L'objectif principal consiste à développer un critère de non-ségrégation des résidus miniers en pulpe en se basant sur les tests de sédimentation statique à l'échelle du laboratoire. Pour atteindre cet objectif principal, on a établi les objectifs spécifiques suivants :

Étape 1 : Déterminer l'influence du pourcentage solide massique (60%, 65%, 70%) des résidus de roches dures sur l'évolution et la distribution verticale des propriétés physiques et rhéologiques des résidus lors de leur sédimentation statique.

Étape 2 : Proposer des critères préliminaires de non-ségrégation statique des résidus à partir des propriétés physiques et rhéologiques et de l'indice de ségrégation.

1.4 Hypothèse

- Des critères de non-ségrégation statique des résidus peuvent être définis à partir des profils verticaux des propriétés physico-rhéologiques obtenues lors des tests de sédimentation en colonne.

1.5 Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en six (6) chapitres. Le premier chapitre présente le contexte, la problématique, le besoin de la recherche. Il définit également les objectifs et l'hypothèse formulée dans ce projet. Le deuxième chapitre propose une revue de littérature qui apporte des informations supplémentaires pour faciliter la compréhension du projet. Cette revue aborde notamment les types, méthodes de transport et de dépôt des résidus, ainsi que de leur classification géotechnique. Elle présente également la ségrégation des résidus et ces différents facteurs qui d'influences, suivie

d'une analyse de la rhéologie, de la sédimentation et des paramètres qui les affectent. Le troisième chapitre aborde la méthode expérimentale appliquée. Il s'agit d'une caractérisation physique et rhéologique des résidus utilisés pour les essais de sédimentation. Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats des essais expérimentaux. Le cinquième chapitre discute des résultats obtenus, en définissant le critère de non-ségrégation lié à chaque paramètre caractéristique des résidus. Le sixième chapitre vient conclure l'étude et formuler des recommandations pour les travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre est une synthèse qui rassemble, analyse et organise des connaissances pertinentes de plusieurs articles ou contenus de recherches scientifiques en relation avec la ségrégation des résidus miniers. Après une description des caractéristiques des résidus miniers (physiques, types et méthodes de déposition), la rhéologie est introduite afin de comprendre la ségrégation générée par le dépôt hydraulique des résidus. L'impact de la ségrégation est également présenté. Un accent particulier est mis sur la sédimentation verticale en colonne et la notion d'indice de ségrégation est introduite.

2.1 Types, méthodes de transport et de dépôt des résidus miniers

2.1.1 Types de résidus miniers (suivant leur consistance)

Les résidus sont généralement transportés et entreposés en surface dans les parcs à résidus sous forme de pulpes, essentiellement constituées du mélange d'eau, de procédés et de fractions de roches dures finement broyées pour atteindre la taille des silts et des sables (Opris, 2017). Des résidus densifiés (épaissis, en pâte et filtrés) se distinguent principalement par leur pourcentage solide élevé et sont de plus en plus préférés par rapport aux résidus en pulpe.

Les parcs à résidus sont des ouvrages de surface utilisés pour le stockage et la gestion des résidus miniers. Ils peuvent être ceinturés en partie ou en totalité (selon la topographie du site) par des digues qui doivent retenir les rejets du concentrateur (Benzazoua et al., 2013). Ces digues peuvent être construites à partir des matériaux d'emprunts naturels (sables, graviers, argiles, etc.) ou à partir de rejets miniers. Généralement pour l'entreposage des résidus en pulpe, trois types de digues de rétention peuvent être utilisées pour la gestion des parcs à résidus en surface. On rencontre les digues construites par la méthode en amont, la méthode en aval et la méthode de l'axe central (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002).

2.1.2 Résidus en pulpe

Les résidus en pulpe (ou résidus conventionnels) sont des résidus en suspension déposés hydrauliquement (par pipeline) dans des parcs à résidus conventionnels avec des pourcentages solides (C_w) compris entre 20% à 45% (Vick, 1990; Martin et al., 2005; Deschamps et al., 2009; Aubertin et al., 2013). La figure 2.1 ci-dessous montre l'aspect des résidus en pulpe. Ces résidus

ont des teneurs en eau très élevées (Crowder, 2004) formant une pulpe moins consistante et favorable au transport hydraulique. Ces résidus sont normalement pompés à partir du concentrateur vers les digues de rétention. En considérant la vitesse d'écoulement des résidus, il existe une vitesse d'écoulement critique (V_{cr}) en dessous de laquelle, on observe une ségrégation avec sédimentation des particules solides au dépôt (Deschamps et al., 2009). L'affaissement mesuré au cône d'Abrams de ces résidus en suspensions est total, avec une teneur en eau située entre 120% et 230% environ (Martin et al., 2005) et une concentration solide volumique (C_v) inférieure à 40% (Chryss & Pullum, 2007). À la sortie du concentrateur, les teneurs en eau des résidus conventionnels varient généralement entre 122% et 300% (Robertson & Kirsten, 1987; Blight, 2009; Mihiretu, 2009).



Figure 2.1 Aspect des résidus en pulpe (Bussière, 2007)

Le transport des résidus en pulpe se fait parfois par gravité (ou par pompage) dans des parcs à résidus. Il nécessite un système adapté en fonction de l'altitude relative entre l'usine et le parc, de la longueur des conduites et des pertes de charge (Vick, 1990). Il faut souligner que les systèmes de tuyauterie et de pompage des résidus sont difficiles à concevoir et à opérer (Vick, 1990), une réalité qui demeure d'actualité malgré les progrès technologiques. Le transport hydraulique par pipeline jusqu'au parc à résidus est actuellement la forme la moins chère de transport des solides (Blight, 1983). Parmi les méthodes générales de dépôt, les plus reconnues sont : la décharge ponctuelle, la lance à robinet et le cyclonage (USEPA, 1994).

Comme illustré à la figure 2.2, la décharge ponctuelle consiste à déplacer périodiquement l'extrémité de la canalisation pour former une série de deltas (Vick, 1990). Ce type de dépôt est couramment utilisé dans les digues retenant la pulpe en amont du bassin. Il permet non seulement de répartir la pulpe sur de vastes surfaces, mais aussi d'assurer le dépôt cyclique même pour de faible volume de pulpe. Cela augmente, la surface exposée et favorise la sédimentation et le

drainage, et évite la formation de zones saturées. Particulièrement dans les environnements froids, cette méthode limite l'accumulation d'eau libre qui pourrait geler et compromettre la stabilité de la digue (Lighthall et al., 1989) et favorise le drainage continu et la consolidation des résidus anciennement déposés (Temgoua, 2021).

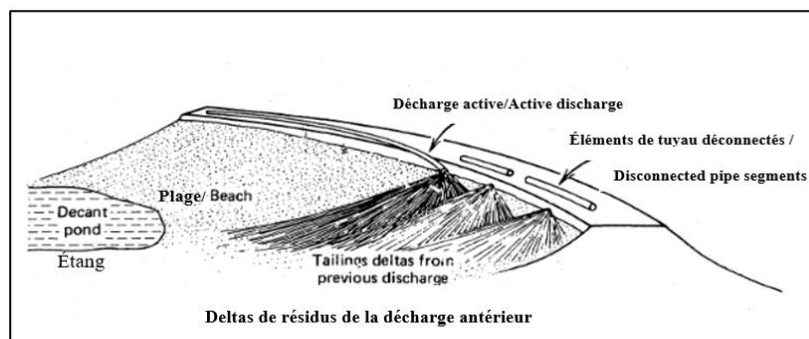


Figure 2.2 Méthode de décharge ponctuelle (Vick, 1990)

Le dépôt par lances à robinet tel qu'illustré à la figure 2.3 ci-dessous consiste à déverser les résidus à l'aide de tuyaux équipés de robinets, espacés à intervalles réguliers le long d'un collecteur (Lighthall et al., 1989). Cette méthode permet de décharger les résidus de manière rapprochée (tuyaux espacés de 50 à 150 pieds), sans déplacer fréquemment le pipeline ou déconnecter les segments de conduite (Vick, 1990). Les points d'injection, munis de vannes, facilitent le contrôle et la distribution de décharge.

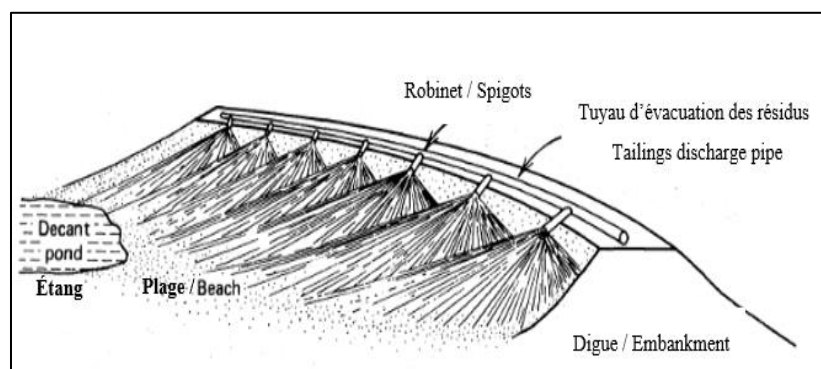


Figure 2.3 Lance à robinets (Vick, 1990).

Quelle que soit la méthode de dépôt choisie, un plan de dépôt doit être établi dès la conception et maintenu pendant l'exploitation. La décharge des résidus avec les lances à robinets vise à créer un flux de résidus uniforme, elle peut néanmoins engendrer une hétérogénéité de la distribution des particules de résidus, diminuant la densité, la résistance au cisaillement et la perméabilité des

résidus à mesure que l'on s'éloigne du point de déversement (Dixon-Hardy & Engels, 2007). Les avantages incluent le développement de plages stabilisant la digue principale et la dissipation de la pression interstitielle c'est-à-dire qu'une réduction progressive de la pression de l'eau contenue dans les pores des résidus grâce au drainage et à la consolidation améliore la stabilité globale du dépôt (Acevedo Valle, 2017).

Les cyclones, ou hydrocyclones illustrées à la figure 2.4 ci-dessous, sont des dispositifs mécaniques utilisés pour séparer les particules fines et grossières des résidus par action centrifuge (Antunes & Medronho, 1992; Acevedo Valle, 2017).

Sous pression, la pulpe pénètre dans le cyclone, où les particules fines et la majeure partie de l'eau (surverse) sont évacuées par la sortie supérieure, tandis que les particules grossières (sous-verse) descendent en spirale à travers une section conique et sortent par le bas. Ces dernières sont utilisées pour construire les digues à résidus, tandis que la surverse est évacuée soit, vers le parc à résidus (USEPA, 1994; Temgoua, 2021).

Cette méthode facilite un dépôt hydraulique à haute densité (USEPA, 1994), exige peu d'entretien et fonctionne efficacement même lorsqu'elle travaille sous des conditions extrêmes de haute température et de forte pression (Antunes & Medrohno, 1992).

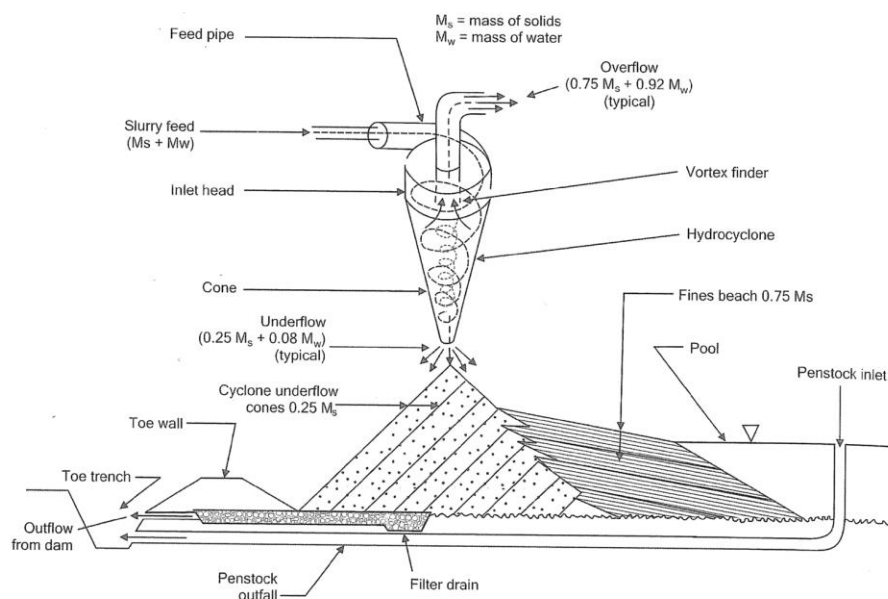


Figure 2.4 Entreposage des résidus par hydrocyclone (Blight, 2009)

2.1.3 Résidus épaissis

Shields (1975) a introduit le concept de résidus épaissis. Les résidus épaissis en anglais « thickened tailings » sont obtenus à partir de l'épaississement des résidus en pulpe à l'aide d'un épaississeur de diamètre variable de quelques mètres à plus de 100 m (Lapierre, 2014; Reid & Fourie, 2015; Bussière & Guittonny, 2020). Le pourcentage solide des résidus épaissis est compris entre 45% et 70% (Barbour et al., 1993; Sofrá & Boger, 2002; Sahi et al., 2019). La réduction de la teneur en eau a un impact significatif sur la résistance au cisaillement de ces résidus. La réduction de la teneur en eau des résidus épaissis respectivement de 122% à 42% pour des pourcentages solides respectifs de 45% et 70% augmentent leur résistance au cisaillement. Dans les conditions de transport, les résidus épaissis sont pompables lorsque le seuil de cisaillement (τ_0) se situe généralement entre 10 et 300 Pa (Bussière, 2007; Simms, 2017). Une fois déposé, le seuil de cisaillement devient plus faible que 50 Pa (Simms, 2017). La figure 2.5 montre la décharge des résidus épaissis dans le parc à résidus de la mine de Centinela au Chili (Cacciuttolo & Valenzuela, 2022). Les résidus épaissis sont partiellement déshydratés avec une consistance pompable à travers des pipelines vers un parc à résidus. Pour garantir l'écoulement des résidus épaissis, il faut que la vitesse d'écoulement soit supérieure à la vitesse critique (V_{cr}), de manière à éviter la sédimentation et garantir un transport sans ségrégation des particules. En réalisant des mesures d'affaissement au cône d'Abrams d'un échantillon de résidus épaissis pour des pourcentages solide compris entre 45% et 70%, il est possible d'observer des suintements d'eau de résidus (Crowder, 2004; Martin et al., 2005).



Figure 2.5 Aspect des résidus épaissis, exemple de Esperanza TSF Centinela Mine Chili (Cacciuttolo & Valenzuela, 2022).

2.1.4 Résidus en pâte

Les résidus en pâte (en anglais : « paste tailings ») sont obtenus à des conditions de filtration et épaissement très élevées grâce à une série d'équipements incluant des filtres (sous vide ou à presse) et des épaisseurs. À la sortie du filtre, le pourcentage solide des résidus en pâte se situe entre 70% à 85% (Benzaazoua et al., 2003; Ouellet et al., 2006; Ouattara, 2011). Cette densité de pulpe est atteinte grâce à des épaisseurs d'ultrahaute densité qui ressemblent aux épaisseurs conventionnels, mais ont un rapport hauteur/diamètre plus élevé afin d'améliorer la sédimentation des particules (Wills & Finch, 2015). La teneur en eau des résidus en pâte est très faible : $20\% < w < 40\%$ environ selon les matériaux. Les résidus en pâte ne montrent pas de vitesse d'écoulement critique (V_{cr}) pour la sédimentation et la ségrégation (Martin et al., 2005).

Les résidus en pâte peuvent également s'écouler dans un tuyau selon un mécanisme de type piston « plug flow » (Martin et al., 2005). Pour que la pâte soit transportée via des canalisations, à l'aide de pompes centrifuges, il doit y avoir une vitesse critique (V_{cr}) au-dessus de laquelle l'écoulement entraîne les solides, mais en dessous de cette dernière, les solides se déposent et peuvent boucher la tuyauterie. Contrairement aux rejets épaissis, on n'observe pas d'eau de suintement dans ces résidus lors de leur déposition ou à la suite d'un essai d'affaissement. Ce matériau peut être déposé soit à la surface ou dans des excavations souterraines (sous forme de remblai en pâte cimenté). La figure 2.6 ci-dessous montre la déposition des résidus en pâte.



Figure 2.6 Aspect des résidus en pâte (Martin et al., 2005)

Le dépôt des résidus en pâte s'effectue en cycle d'entreposage à partir des tours d'entreposage souvent sous forme de couche mince empilée progressivement pour favoriser la dessiccation des

résidus proches de la surface et améliorer la résistance. Le dépôt se fait sur une surface de pente moyenne de l'ordre de 5 degrés. Le taux de déposition qui a été adopté sur le site Bulyanhulu était d'une couche tous les 5 jours, chaque couche ayant une épaisseur maximale de 30 cm (Theriault et al., 2003). Ce type de dépôt facilite la dessiccation des résidus contrairement au dépôt de couches épaisses où la dessiccation est insuffisante pour arrêter les écoulements à mesure que la pile s'élève en hauteur. Le dépôt des résidus en pâte peut également s'effectuer à partir d'un tour de dépôt sous forme conique. Cette forme de dépôt permet de maximiser la surface de dépôt. Les avantages de la technique de dépôt des résidus en pâte en surface incluent la non-nécessité de construction de digue de rétention d'eau (du fait que l'eau libre est limitée, voire inexistante. Cette caractéristique contribue à réduire le risque de DMA en facilitant la réhabilitation progressive du site (Theriault et al., 2003) . La figure 2.7 montre l'entreposage des résidus en pâtes.



Figure 2.7 Dépôts des résidus en pâtes (Theriault et al., 2003) A) Dépôt progressif sous forme de cône B) superposition des couches 1 de pâtes C) Fine couche de résidus superposée aux résidus séchés.

2.1.5 Résidus filtrés

Les résidus filtrés en anglais : « filtered tailings » sont produits à l'aide des filtres à disques ou filtres-presses à partir duquel on obtient un gâteau de filtration généralement transporté vers le parc à résidus au moyen de camions ou bande convoyeurs. Les résidus filtrés sont des résidus secs, avec des pourcentages solides $C_w > 85\%$ et des teneurs en eau, $w < 20\%$. Dans cet état, les résidus sont secs, ce qui leur donne l'aspect d'un matériau granulaire compressé « filter cake ». À ce point, il n'est plus possible de pomper les résidus et donc leur transport ne peut pas se faire par pipeline. Le transport des résidus filtré requiert des systèmes de convoyeurs à bandes ou des camions ou trains

(Gowan & Williams, 2002; Martin et al., 2005). On parle alors de l'empilement à sec (dry stacking), comme c'est le cas à la mine Raglan (Canada) (Bussière 2007). Dans les régions très sèches (arides) ou très froides (nordiques), on utilise souvent le convoyeur à bande pour déposer les résidus filtrés. En général, la construction des digues n'est pas nécessaire pour l'installation des résidus filtrés. L'affaissement mesuré au cône est nul ou négligeable. La figure 2.8 montre l'entreposage des résidus filtrés dans un parc à résidus (Kissiovo, 2020).



Figure 2.8 Déposition des résidus filtrés (Kissiovo, 2020)

2.1.6 Retour sur les critères de passage d'un type de résidus à un autre

À ce jour, il n'y a pas de définitions unanimes de rejets épaissis, en pâte et secs. Dans les sections précédentes, le passage d'un type de résidus à un autre est basé sur le pourcentage massique solide, qui, malheureusement présente une limite puisqu'il est influencé par la densité relative des grains solides (D_R). Les critères de passage d'une catégorie à une autre peuvent dépendre d'autres facteurs, en plus du pourcentage solide et de la densité D_R , comme la distribution granulométrique et les propriétés rhéologiques des résidus. Ce sont toutes ces propriétés qui vont définir le comportement global des résidus, à savoir si la matrice de résidus entreposés dans un parc à résidus va être homogène ou hétérogène. Spiers (2010) propose une catégorisation basée sur le seuil de cisaillement des résidus qui est défini à la section 2.2 ci-dessous. Ainsi, les résidus sont en pulpe, épaissis ou en pâte lorsque leur seuil de cisaillement est respectivement inférieur ou égal à 20 Pa, compris entre 20 et 100 Pa, et supérieur à 100 Pa. La limite entre les résidus en pâte et les résidus filtrés n'est pas définie. Néanmoins, ce genre de critère uniparamétrique n'est pas aussi suffisant, car un même seuil de cisaillement ne veut pas dire que toutes les autres propriétés sont identiques

pour conduire à un comportement similaire. Différents types de résidus peuvent exhiber des seuils de cisaillement différents à un même pourcentage solide (Boger et al., 2006).

2.1.7 Classification géotechnique et propriétés des résidus miniers

L'analyse de la courbe granulométrique montre que les résidus étudiés dans la figure 2.9 présentent d'une part dans la zone délimitée en jaune, des distributions dominées par des particules fines, avec des tailles $D_{50} \approx 30-60 \mu\text{m}$ et $D_{60} \approx 70-80 \mu\text{m}$ majoritairement comprise entre 2 et $80 \mu\text{m}$. Ce qui correspond au domaine ML (limon non plastique) (ASTM-D2487, 2017) (Aubertin et al., 2002; Bussière et al., 2007). D'autre part, l'analyse des résidus au-delà de 0,1 mm (100 μm) et plus précisément du fuseau de la mine de cuivre (plus à droite) montre également des valeurs $D_{50} \approx 120 \mu\text{m}$ et $D_{60} \approx 160 \mu\text{m}$ supérieure à $80 \mu\text{m}$. Ces tailles dépassent la limite des silts ($80 \mu\text{m}$) et se situent dans le domaine des sables fins SM (ASTM-D2487, 2017) (Aubertin et al., 2002; Bussière et al., 2007).

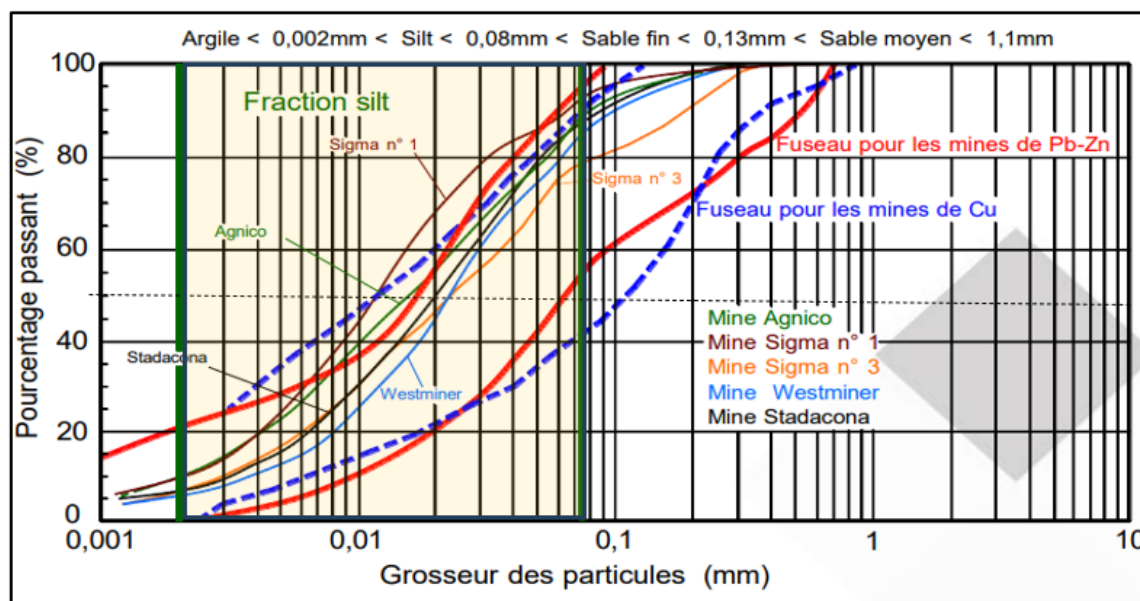


Figure 2.9 Courbes granulométriques typiques des résidus miniers (Aubertin et al., 2002).

Du point de vue minéralogique, la densité relative (G_s) des résidus est comprise typiquement entre 2,6 à 4,5 (Vick, 1990). Cependant, pour les roches dures, la densité relative des grains peut être comprise entre 2,6 et 4 (et plus selon la minéralogie) ou entre 1,4 et 1,6 pour les roches sédimentaires (Aubertin et al., 2002).

L'indice de vide (e) dans un parc à résidus varie de 0,6 à 1,7 pour les fractions fines ($< 0,075 \mu\text{m}$) et 0,6 à 0,9 pour les fractions grossières (Aubertin et al., 2013). La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des résidus mesurés au laboratoire varient entre 10^{-4} et $10^{-6} \text{ cm.s}^{-1}$ pour la fraction plus fine (ML) et 10^{-2} à $10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ pour la fraction plus grossière (SM) (Bussière et al., 2007). Les résidus présentent une conductivité hydraulique anisotrope causée par la ségrégation naturelle des particules résultant du mode de déposition (hydraulique). Cette anisotropie se traduit par une conductivité horizontale moyenne supérieure de 10 à 100 fois (dans certains cas) à la conductivité verticale moyenne (L'Écuyer et al., 1993). Il est possible d'utiliser les résidus pour la fabrication du remblai destiné au support de terrain (Belem & Benzaazoua, 2003).

2.2 Comportement rhéologique

2.2.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie est une étude de la déformation et l'écoulement de la matière (Tia & Ruth, 1987; Boger et al., 2006; Spelay, 2007). C'est l'étude de la manière dont la matière répond aux contraintes ou déformations qui lui sont appliquées. La rhéologie des matériaux est mesurée à l'aide d'un rhéomètre qui permet de relier la contrainte, la vitesse de cisaillement et temps pour déduire les paramètres tels que la viscosité apparente, le seuil d'écoulement et le comportement dépendant du temps. En théorie, tous les matériaux ont des propriétés rhéologiques qui affectent leur comportement (Paterson, 2006). Pour comprendre la rhéologie des fluides, le flux de couette illustré à la figure 2.10 ci-dessous peut être utilisé pour définir la viscosité. Il s'agit d'une expérimentation par piégeage du fluide entre une plaque horizontale fixe et une plaque horizontale se déplaçant à la surface du liquide suivant la direction x à la vitesse V_s . La couche supérieure du liquide se déplace parallèlement à la plaque mobile à la même vitesse c'est-à-dire ($V = V_s$). Chaque couche différentielle du liquide se déplacera plus lentement que la couche supérieure en raison de forces de frottement qui s'opposent au mouvement relatif. Une force externe est nécessaire pour maintenir la plaque supérieure en mouvement .

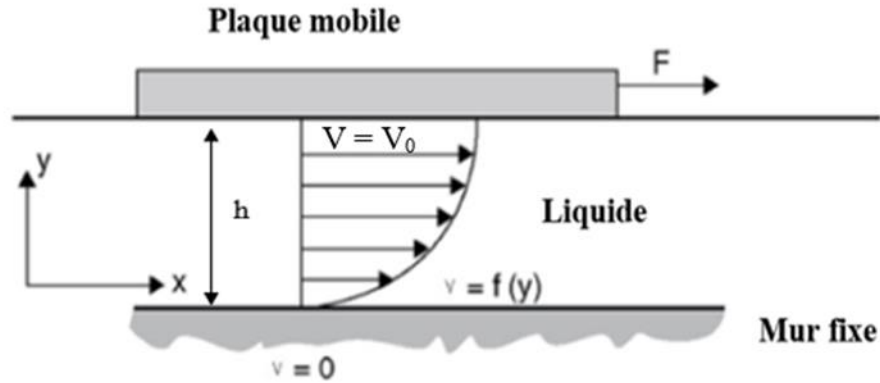


Figure 2.10 Cisaillement d'un fluide visqueux entre deux plaques parallèles (Roitto,2014).

L'équation de la vitesse $V(y)$ (m.s^{-1}) du fluide à une distance y est donnée par l'équation (2.1) ci-dessous :

$$V = \frac{dx}{dt} \quad (2.1)$$

Lorsque $y = 0$ (plaque fixe), $V(0) = 0$ et lorsque $y = h$ (plaque mobile), $V(h) = V_s$

Le profil de vitesse entre les deux plaques n'est pas linéaire (voir Fig. 2.10), sauf dans le cas particulier d'un fluide newtonien (définition donnée ci-dessous) pour lequel le profil de vitesse entre les deux plaques est linéaire. Dans ce cas, la vitesse du fluide à la hauteur y , notée $V(y)$ entre les deux plaques peut être exprimée comme suit :

$$V(y) = V_s \frac{y}{h} \quad (2.2)$$

Le déplacement ou la déformation γ entre les deux plans est défini par :

$$\gamma = \frac{dx}{dy} \quad (2.3)$$

Le gradient de vitesse ($\dot{\gamma}$) est alors donné par l'équation (2.4) :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dx}{dt dy} = \frac{d}{dy} \frac{dx}{dt} = \frac{dV(y)}{dy} \quad (2.4)$$

La contrainte de cisaillement est donnée par l'équation (2.5) suivante :

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (2.5)$$

τ : contrainte de cisaillement (Pa) ; F : force tangentielle (N) et S : représente la surface cisailée.

La viscosité dynamique (η) du fluide est alors définie comme :

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

La viscosité dynamique η (Pa.s) est une grandeur qui décrit la résistance interne d'un fluide à l'écoulement. Lors de l'écoulement, les forces de friction entre les particules du fluide essaient d'empêcher le mouvement des particules l'une devant l'autre.

La relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement définit la courbe d'écoulement ou rhéogramme. La relation entre la viscosité dynamique et le taux de cisaillement définit la courbe de viscosité. Il existe également une viscosité cinématique (ν) représentant le rapport entre la viscosité (η) dynamique et la masse volumique du fluide (ρ_f). En se basant sur ces courbes qui décrivent le comportement des fluides, on distingue les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens.

2.2.2 Fluides newtoniens

Un fluide est dit newtonien lorsque son comportement montre une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement induite (τ) et le gradient de vitesse ou taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$), comme décrit dans l'équation (2.7) ci-dessous (Padet, 1991). La pente de la droite, qui représente la viscosité dynamique devient alors une constante indépendante du taux ou de la contrainte de cisaillement, mais dépendante de la température. Les figures 2.11a (rhéogramme) et 2.11.b (courbe de viscosité) illustrent ce comportement.

$$\tau = \dot{\gamma} \eta \quad (2.7)$$

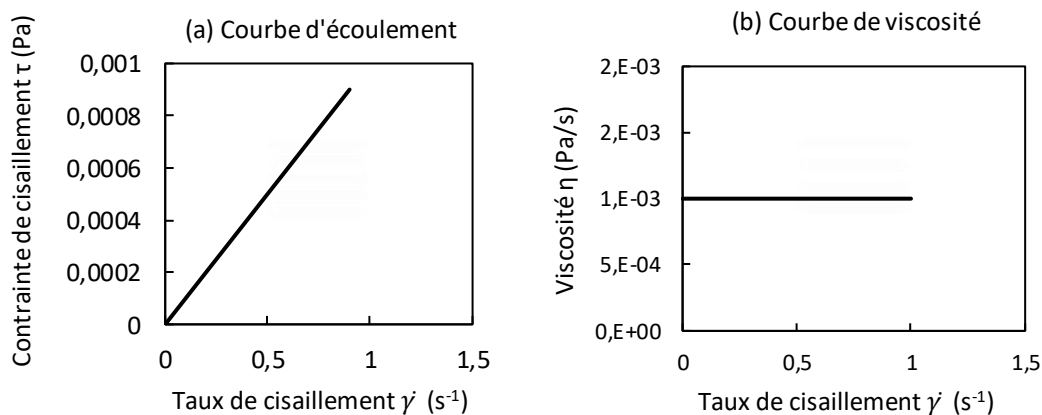


Figure 2.11 Fluide newtonien : a) Courbes d'écoulement et b) Courbe de viscosité

2.2.3 Fluides non-newtoniens

Un fluide est dit non-newtonien lorsque sa viscosité varie en fonction du taux ou de la contrainte de cisaillement. La figure 2.12 et le tableau 2.1 ci-dessous présentent les différentes catégories de fluides non-newtoniens et leurs caractéristiques. Une description de chaque type (ou catégorie) de fluide est présentée dans le tableau 2.1 ci-dessous.

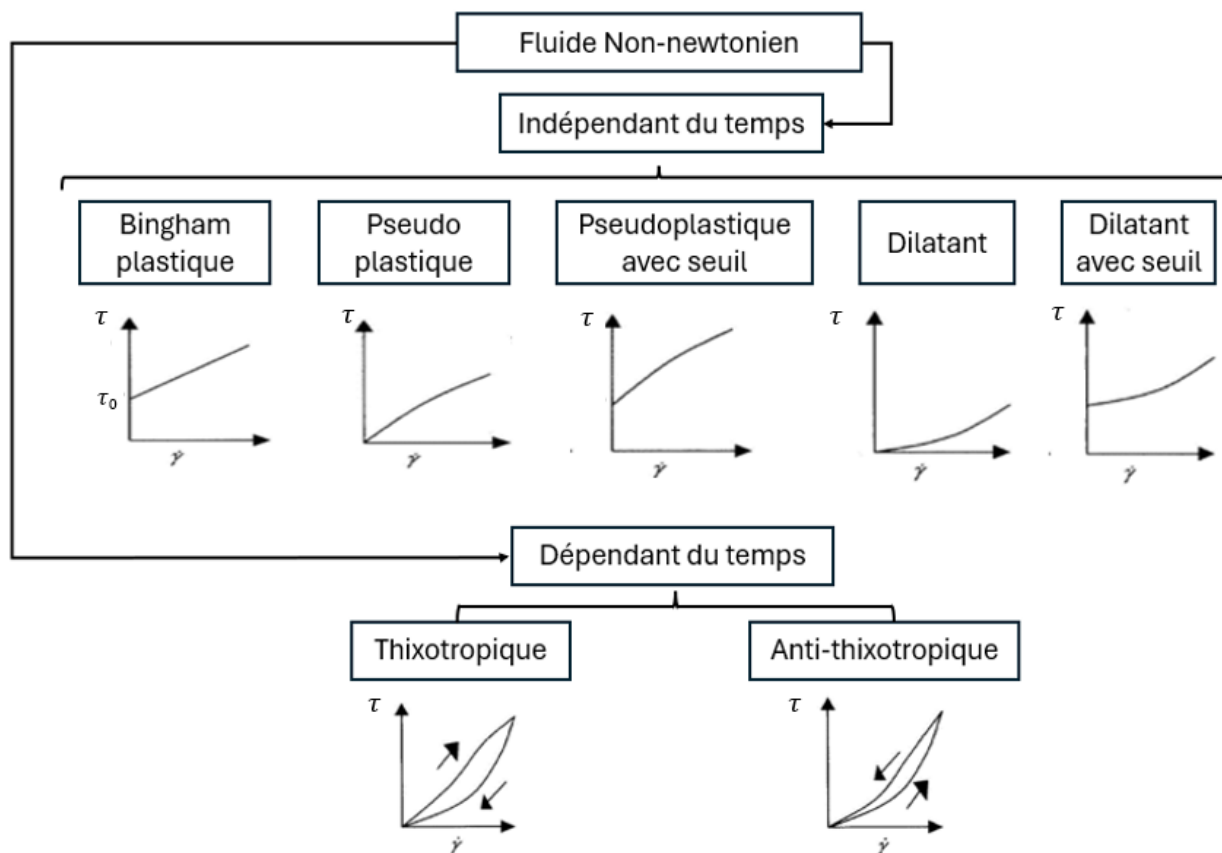


Figure 2.12 Comportement rhéologique associé (Paterson, 2006)

Pour les fluides indépendants du temps, la rhéogramme et la courbe de viscosité dépendent uniquement de du taux de cisaillement, et non de la durée d'application de la contrainte, contrairement aux fluides dépendant du temps. Dans ces deux types de fluides non-newtoniens, on trouve des fluides avec ou sans seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement dynamique (noté généralement par τ_y ou τ_0) correspond à la contrainte minimale nécessaire pour mettre le fluide en mouvement i.e., pour initier l'écoulement (Barnes, 2000). Il faut distinguer le seuil de cisaillement statique et le seuil de cisaillement dynamique (e.g. Pullum, 2007; Ji et al., 2022). Le seuil de

cisaillement statique est la contrainte la plus petite qui suffit à initier l'écoulement d'un fluide au repos. Le seuil de cisaillement dynamique est la contrainte nécessaire pour maintenir l'écoulement une fois que la suspension a déjà été cisailée et que sa structure a été partiellement détruite.

Les fluides non-newtoniens dépendant du temps sont constitués de fluides thixotropiques et anti-thixotropiques ou rhéopexiques dont la viscosité diminue ou augmente respectivement avec le temps sous un taux de contrainte de cisaillement constant (Mewis & Wagner, 2009; Larson & Wei, 2019). Ces fluides peuvent être sans seuil de cisaillement (voir Fig. 2.12) ou avec seuil de cisaillement. La mayonnaise, le dentifrice, les peintures, le ketchup, le gel pour les cheveux, certaines argiles, etc. sont quelques exemples de fluides thixotropiques. Ils deviennent de plus en plus liquides lorsqu'on les agite. La crème fouettée ou chantilly et le gypse (pâte de plâtre) sont un exemple de fluides rhéopexiques qui (fouettage), elle s'épaissit et se solidifie sous l'effet de l'agitation.

Tableau 2.1 Types de fluides non-newtoniens, catégories et caractéristiques

Catégories de fluides non-newtoniens	Types de fluides	Caractéristiques essentielles
Sans seuil de cisaillement (τ_0)	Rhéofluidifiant ou pseudoplastique	La viscosité dynamique de ce fluide diminue avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement.
	Rhéopépaississant	La viscosité augmente avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement.
Avec seuil de cisaillement (τ_0)	Fluide plastique de Bingham	Ces fluides ont un seuil de cisaillement (τ_0) nécessaire pour initier l'écoulement. Au-delà de ce seuil, le fluide se comporte comme un fluide newtonien, avec une rhéogramme linéaire et une viscosité constante (η).
	Fluide à seuil rhéofluidifiant ou pseudoplastique	Ces fluides ont un seuil de cisaillement (τ_0) au-delà duquel, la viscosité diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. Le fluide s'amincit pendant le cisaillement c'est-à-dire, plus le fluide est cisailé, moins il est visqueux.
	Fluide à seuil rhéopépaississant ou dilatant	Au-delà du seuil de cisaillement (τ_0), le fluide devient plus visqueux lorsque le taux de cisaillement augmente.

2.2.4 Modèles rhéologiques

Contrairement aux fluides newtoniens dont le comportement est décrit uniquement par la viscosité (voir éq. 2.7), plusieurs paramètres sont nécessaires pour relier la contrainte de cisaillement ou la viscosité au taux de cisaillement, et leur description repose sur des lois mathématiques adaptées à leurs spécificités (Spelay, 2007; Ouattara, 2011). Plusieurs équations empiriques ont été développées pour tenter de décrire le comportement des fluides à partir des rhéogrammes ou des courbes de viscosités déterminées au laboratoire (Fester et al., 2012).

Les rhéogrammes et les courbes de viscosité des fluides pseudoplastiques sans seuils de cisaillement peuvent être décrits par une loi de puissance ou loi d'Ostwald-de-Waele (Fester et al., 2012) comme suit.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.9)$$

K est un indice de consistance (Pa.s^n) et n est l'indice d'écoulement. Lorsque $n > 1$, le fluide est rhéoépaississant (dilatant); lorsque $n = 1$, le fluide est newtonien et lorsque $n < 1$, le fluide est rhéofluidifiants (pseudoplastique) avec un seuil. Lorsque $n=1$, le fluide est newtonien.

Les rhéogrammes et les courbes de viscosité de fluides non-newtoniens avec seuil de cisaillement peuvent en général être décrits par le modèle de Herschel-Bulkley donné par les équations suivantes (Fester et al., 2012) :

$$\tau = \tau_{0-HB} + K\dot{\gamma}^n \quad (2.10)$$

$$\eta = \frac{\tau_{0-HB}}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.11)$$

τ_{0-HB} est le seuil de cisaillement de Hershel-Bulkey (Pa), K est l'indice de consistance (Pa.s^n), et n est l'indice d'écoulement (-). Lorsque $n > 1$, le fluide est rhéoépaississant (dilatant); lorsque $n = 1$, le fluide a le comportement de Bingham et lorsque $n < 1$, le fluide est rhéofluidifiant (pseudoplastique) avec un seuil. Les équations 2.12 et 2.13 illustrent les modèles de Bingham (Fester et al., 2012).

$$\tau = \tau_{0-B} + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2.12)$$

$$\eta = \frac{\tau_{0-B}}{\dot{\gamma}} + \eta_B \quad (2.13)$$

τ_{0-B} est le seuil de cisaillement de Bingham (Pa) et η_B est viscosité plastique de Bingham (Pa s).

Une alternative populaire au modèle de Herschel-Bulkley, c'est un modèle théorique à deux paramètres présenté par Casson (Alderman, 1997; Fester et al., 2012) :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{0-C}} + \sqrt{\eta_C} \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (2.14)$$

$$\eta = \frac{[\sqrt{\tau_{0-C}} + \sqrt{\eta_C} \dot{\gamma}]^2}{\dot{\gamma}} \quad (2.15)$$

η_C est la viscosité dynamique de Casson (Pa s), ce qui correspond à la viscosité asymptotique à très haut taux de cisaillement (viscosité à l'infini) et τ_{0-C} est seuil de cisaillement Casson (Pa).

Les courbes de viscosités peuvent aussi être décrites par différents modèles rhéologiques, incluant ceux de Sisko, Williamson et Cross (Nehdi & Rahman, 2004). Le modèle de Sisko est donné par l'équation 2.16.

$$\eta = \eta_\infty + K_s \times \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.16)$$

où K_s est la consistance dans le modèle de Sisko.

Pour les données générées à faibles taux de cisaillement, le modèle de Williamson défini par l'équation (2.17) peut donner un bon ajustement (Cross, 1965).

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + a\dot{\gamma}} \quad (2.17)$$

où a est une constante ; η_0 est la viscosité au taux de cisaillement à nul et η_∞ est la viscosité à un taux de cisaillement infini (à très haut taux de cisaillement).

Dans le modèle de Cross est un bon permettant un ajustement de données obtenues sur une large plage de taux de cisaillement. Ce modèle est donné par l'équation suivante (Cross, 1965).

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (K_c \dot{\gamma})^m} \quad (2.18)$$

Où m est l'indice de Cross; η_0 est la viscosité à un taux de cisaillement zéro et K_C est une constante du fluide dans le modèle de Cross.

Ces différents paramètres des modèles rhéologiques constituent les propriétés rhéologiques qui, une fois déterminées, permettent de bien décrire les rhéogrammes et courbes de viscosité.

2.2.5 Comportement rhéologique des résidus miniers

Les résidus miniers (pulpe ou épaissis) sont généralement pompés et conduits vers les parcs à résidus à travers des systèmes de transport hydraulique. Pour garantir l'écoulement des résidus (pulpe, épaissis ou en pâte), il faut comprendre la rhéologie des résidus miniers. Généralement les résidus présentent un comportement de type non-newtonien caractérisé par la présence d'un seuil de cisaillement dont l'application d'une contrainte supérieure permet le transport hydraulique (Pullum, 2007; Ouattara, 2011).

Les propriétés rhéologiques des résidus miniers sont influencées par le pourcentage solide, la distribution granulométrique, la densité relative des grains solides, la minéralogie, etc. La figure 2.13 est un exemple typique de l'influence du pourcentage solide sur le seuil de cisaillement. Pour tous les différents types de résidus étudiés, le seuil de cisaillement augmente de manière exponentielle à partir d'un certain pourcentage solide qui varie selon le type de résidus. Ce pourcentage solide « critique » est par exemple autour de 0,2 (ou 20%) pour les résidus argileux des mines de charbon et autour de 75% pour l'échantillon de résidus en pâte. La différence entre ces courbes est liée à l'impact d'autres facteurs qui influencent la rhéologie des résidus, ces paramètres étaient différents pour les matériaux étudiés.

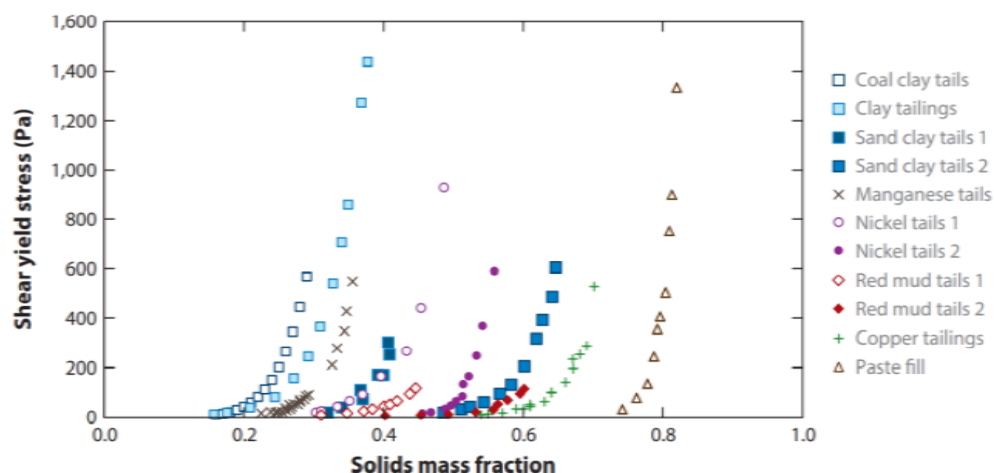


Figure 2.13 Comportement rhéologique associé (Boger, 2013)

Une granulométrie fine augmente la cohésion interne et la viscosité, tandis que la granulométrie plus grossière rend le mélange plus fluide (Wang et al., 2019; Sharma & Goel, 2022). Pour un résidu fin et grossier avec les mêmes teneurs en eau; Sharma et Goel (2022) constatent que dans les particules grossières, l'eau reste libre et facilite le mouvement des particules, l'augmentation de la taille des particules entraîne une diminution de la viscosité et de la contrainte seuil. Les particules de petite taille possédant une surface spécifique plus élevée; réduisent la fluidité du mélange en empêchant le glissement entre les particules, la viscosité devient élevée. La présence d'une fraction importante de particule fine dans une suspension favorise l'apparition d'un comportement non-newtonien à cause des interactions interparticulaires qu'elles génèrent. Lorsque ces particules fines sont présentes dans un mélange à pourcentage élevé et qu'elles sont floculées, elles peuvent former une structure interne continue au sein du fluide. Cette structuration confère alors à la suspension un seuil de cisaillement, caractéristiques des milieux viscoplastiques. Ce seuil permet de résister aux contraintes gravitaires exercées par les particules plus grossières, contribuant ainsi à leur maintien en suspension et limitant leur dépôt dans des conditions statiques (Hill, 1996).

2.3 Ségrégation des résidus

2.3.1 Définition

La ségrégation particulaire est un processus naturel entraînant la séparation, suivie d'un regroupement préférentiel, des particules dans différentes zones physiques spécifiques, suivant leurs granulométries ou propriétés physiques similaires (de Silva et al., 2000). Elle peut être statique ou dynamique.

La ségrégation statique ou verticale s'observe lorsque cette séparation des particules se fait dans une suspension au repos, par sédimentation. Li & Van Zyl (2023) définissent cette ségrégation comme le tri des particules solides en raison d'une différence de taille ou de densité différente observée dans une décantation entravée. Cette ségrégation verticale est par exemple observable dans les colonnes de sédimentation. Les zones physiques correspondent aux différentes couches de la hauteur de la colonne où des couches de concentration solides distinctes se forment au cours du temps de sédimentation.

La ségrégation dynamique ou latérale est un processus plus complexe où intervient une action combinée de la sédimentation et du transport des particules pendant l'écoulement d'une

suspension. C'est cette forme de ségrégation qu'on peut observer durant le dépôt des résidus dans les parcs à résidus. Une fois le dépôt hydraulique des résidus en arrêt, les particules sédimentent en mode statique.

2.3.2 Impact de la ségrégation latérale sur les propriétés physiques dans les parcs à résidus

La figure 2.14 montre la distribution naturelle de la taille des particules lors du déversement de la pulpe de résidus dans un parc à résidus. Les particules grossières ont tendance à se déposer près du point de décharge tandis que les fines se déposent plus loin près de la zone de l'étang d'eau surnageant. Les particules de tailles moyennes occupent la partie médiane de la plage (Pullum et al., 2018).

Il est aussi documenté que plus les particules sont lourdes (avec une densité relative des grains solides élevée), dépendamment de leurs propriétés minéralogiques, plus elles se déposent en amont de l'écoulement (Temgoua, 2021).

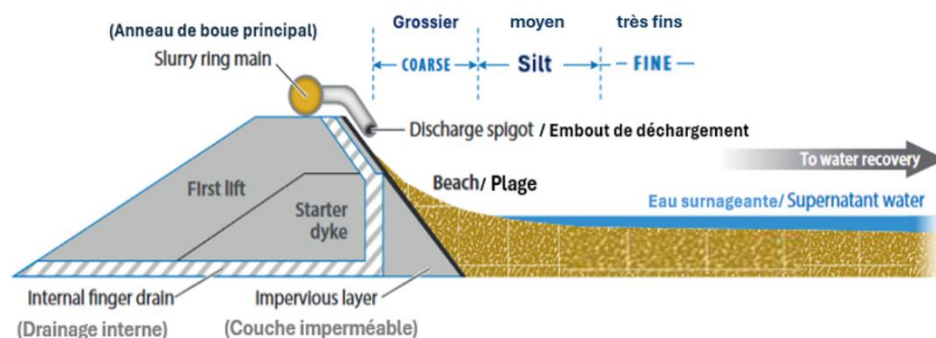


Figure 2.14 Plan schématique des zones avec des résidus à granulométries différentes dans un parc à résidus (Pullum et al., 2018)

2.3.3 Impact de la ségrégation latérale sur la conductivité hydraulique dans les parcs à résidus

De la variation latérale de la distribution granulométrique des particules des résidus induite par la ségrégation, comme montré ci-dessus, résulte une variation latérale de toutes les propriétés hydrotechniques dépendant de la granulométrie. Il s'agit principalement de la conductivité

hydraulique saturée et de la courbe de rétention d'eau. La figure 2.15 (MEND, 1996) illustre une variation typique de l'ordre de grandeur de la conductivité hydraulique saturée selon les zones du parc à résidus.

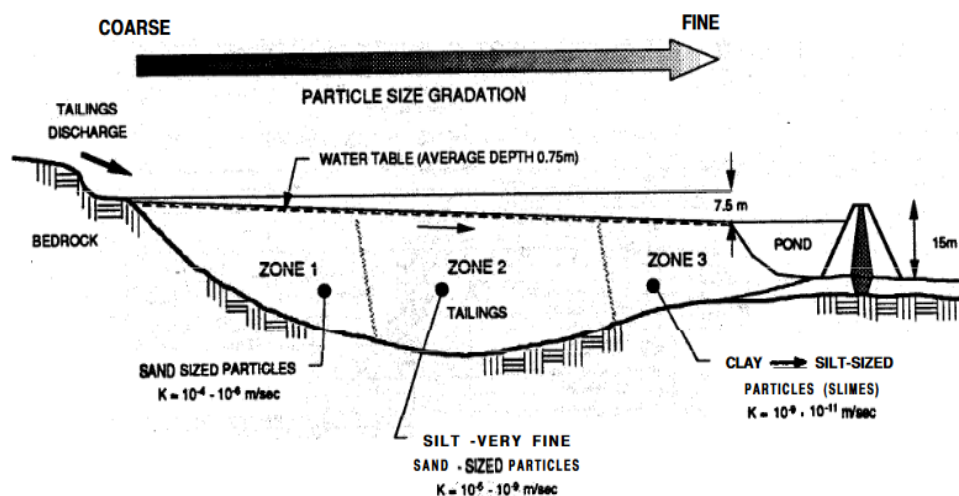


Figure 2.15 Ordre de distribution de la conductivité hydraulique par ordre de grandeur dans un parc à résidus (MEND, 1996)

Dans certains cas, une différence d'un ou deux ordres de grandeur dans la conductivité hydraulique peut provoquer un écoulement de l'eau selon des trajectoires irrégulières et détournées, ce qui complique les efforts de réhabilitation (Driouky, 2020). La figure 2.16 montre une représentation de la variation de la conductivité hydraulique horizontale (k_H) et verticale (k_V) des résidus en fonction de la distance au point de décharge (Temgoua 2021). Cette représentation met en évidence une anisotropie marquée dans la plage intermédiaire comme l'avait mentionné (Vick, 1990). Dans toutes les zones de résidus, la conductivité hydraulique saturée (k_H) est beaucoup plus élevée que la conductivité verticale (k_V). Cela montre que l'eau circule plus facilement horizontalement que verticalement à l'intérieur des résidus.

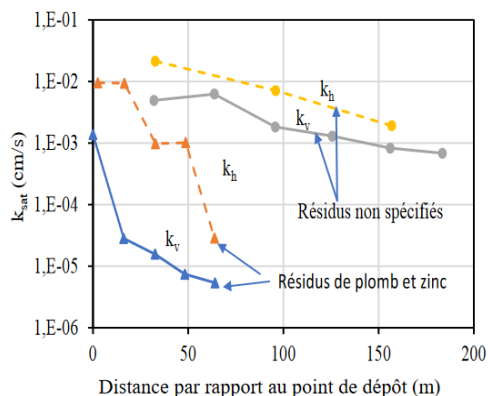


Figure 2.16 Variation de la conductivité hydraulique saturée transversale et verticale avec la distance de point de décharge (adapté de Vick 1990, Temgoua, 2021)

2.4 Processus de sédimentation

2.4.1 Types de sédimentation statique

Khelifi (2018) a identifié trois facteurs clés qui influencent simultanément la sédimentation : la taille des particules, leurs concentrations massiques et leurs interactions dans la suspension. Li et al. (2024), affirment que ces paramètres combinés au pourcentage solide et au degré de cohésion des particules, permettent de classer le comportement de la sédimentation d'une suspension en quatre types :

- Sédimentation floculante : les particules floculent en suspensions pour former des agrégats. La taille effective des particules et la vitesse de sédimentation augmentent généralement au fur et à mesure que les particules s'agrègent (Khelifi, 2018);
- Sédimentation libre : la sédimentation est en régime libre sans être affectée par les parois de la colonne ni par la présence d'autres particules. La concentration des particules est insuffisante pour provoquer des déplacements importants de fluide quand les particules sédimentent (Imai, 1980; Blazy et al., 1999). Avec l'augmentation du pourcentage solide massique dans le temps, le comportement de la sédimentation passe d'une sédimentation libre à une sédimentation entravée (Li et al., 2024);
- Sédimentation entravée ou gênée : elle se produit lorsque la concentration solide des particules devient suffisamment élevée pour que les distances interparticulaires soient réduites et que les interactions hydrodynamiques deviennent significatives (McRoberts & Nixon, 1976). Dans ce cas, les particules ne sédimentent plus de manière indépendante, car leur mouvement est

freiné par la présence de particules voisines, ce qui entraîne une diminution de la vitesse de sédimentation par rapport à la chute libre. Les forces interparticulaires devenues significatives maintiennent les particules en position relativement fixes et sont contraintes de sédimer sous forme de masse, avec une vitesse constante et une interface nette. Li et al. (2024) constatent que contrairement à la sédimentation en compression, la sédimentation des particules se fait de manière collective, sans contact permanent des particules bien qu'on observe une interface nette (eau surnageant et résidus);

- Sédimentation en compression : elle apparaît après la sédimentation entravée et correspond à un régime de suspensions très fortement concentrées, dans lequel les particules constitutives de la pulpe entrent en contact permanent pour former un réseau solide continu. Dans ce régime, le poids des couches supérieures génère des contraintes qui se transmettent à leur tour à travers le réseau de particule. La sédimentation ne résulte plus uniquement de la chute gravitaire des particules, lorsque la concentration des particules est très élevée. Blazy et al. (1999) montre que la structure de la pulpe devient compacte et développe une force de compression qui entraîne le refoulement du liquide des couches inférieures, augmentant ainsi la concentration solide. La limite de cette zone de compression et celle de la zone entravée remonte progressivement à partir du bas de la colonne au cours du processus de sédimentation (Li et al., 2024).

La figure 2.17 ci-dessous, proposée par Darby (2001), permet de déterminer le type de régime de sédimentation en fonction de la fraction massique des particules ($10\% \leq C_w \leq 50$) et du rapport $(\rho_s - \rho_f)/\rho_s$, fonction des masses volumiques des particules (ρ_s) et du fluide (ρ_f).

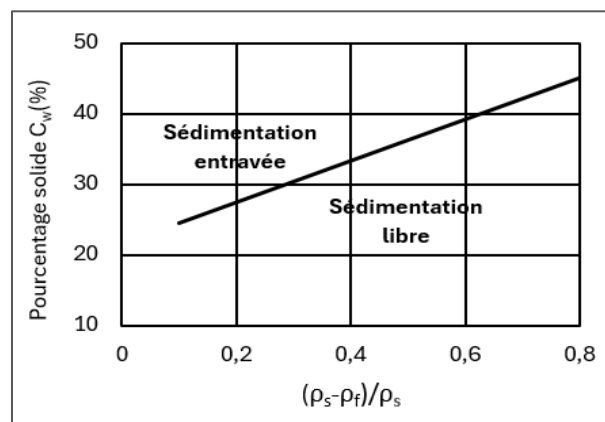


Figure 2.17 Détermination de la zone de sédimentation : libre ou entravée (Darby, 2001)

2.4.2 Vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation définie expérimentalement dans une colonne au cours de la sédimentation correspond au taux de diminution de l'interface solide-liquide au cours du temps. Comme montré dans l'équation ci-dessous, cette vitesse est estimée par le rapport entre la variation de la hauteur et l'intervalle de temps considéré (Kynch, 1952; Khelifi, 2018).

$$V_{s-ti} = -\frac{dH}{dt} = \frac{H_{ti} - H_{ti+1}}{t_{i+1} - t_i} \quad (2.19)$$

Dans cette équation, V_{s-ti} est la vitesse de sédimentation (m/s) au temps de sédimentation t_i , H est la hauteur de l'interface eau-résidus à partir de la base de la colonne (au temps $t = 0$, $H_0 = 90$ cm), H_{ti} est la hauteur de l'interface mesurée à un temps t_i . La vitesse de sédimentation globale est liée à la vitesse de chute des différentes particules qui est contrôlée par différents paramètres selon qu'on a un fluide newtonien ou non-newtonien.

Pour des fluides newtoniens, la vitesse de chute d'un grain isolé (supposé sphérique) dépend du poids propre du grain et de la viscosité dynamique du liquide. Elle est définie par la loi de Stokes donnée par l'équation (2.20) ci-dessous (Stokes, 1851; Hannah & Harrington, 1981; Mihiretu, 2009; Spelay, 2007).

$$V_s = \frac{D^2 \times g \times (\rho_s - \rho_f)}{18 \eta} \quad (2.20)$$

Où D est le diamètre de la particule solide (m), g est l'accélération gravitationnelle (m/s^2), η est la viscosité dynamique du fluide, ρ_s est la masse volumique du grain solide et ρ_f est la masse volumique du fluide.

Pour les fluides non-newtoniens de type Bingham, la vitesse de sédimentation en conditions d'écoulement laminaire est donnée par l'équation (2.21) suivante (van Rhee, 2002):

$$V_s = \frac{D^2 \times g \times (\rho_s - \rho_f)}{18 \eta_B} - \left[D \times \frac{\tau_{0-B}}{\eta_B} \times \left(1 + \frac{\pi}{12} \right) \right] \quad (2.21)$$

Où τ_{BH} est le seuil d'écoulement de Bingham (Pa)

2.4.3 Forces en présence lors d'une sédimentation

Lorsque $V_s = 0$, la particule reste en suspension. Talmon et al. (2005) décrivent le comportement d'une particule dans un fluide au repos. Ils indiquent que, pour une particule sphérique dans un fluide au repos, les contraintes exercées par le fluide sur la surface de la particule, opposées à sa chute (figure 2.19a), augmentent avec la vitesse jusqu'à atteindre une valeur maximale correspondant soit à la résistance hydrodynamique du fluide, soit à son seuil de cisaillement dans le cas où le fluide est non-newtonien. Cette limite conditionne la vitesse de chute de la particule.

La figure 2.19b montre la redistribution des contraintes autour d'une particule sphérique soumise au cisaillement du fluide dans lequel il est immergé. On constate que les contraintes hydrodynamiques exercées sur la surface de la particule ne sont pas uniformément réparties. Ces contraintes engendrent des forces : F_1 , F_2 , F_3 et F_4 qui se répartissent à différentes zones de la surface. La dissymétrie de ces forces crée un couple hydrodynamique qui facilite la rotation (ω) de la particule avec une vitesse angulaire ($\dot{\omega}$). L'association de $\dot{\omega}$ et du champ de la vitesse (u) cisailé modifie la résistance exercée par le fluide pour favoriser la sédimentation.

F_1 et F_3 représentent les forces tangentielles exercées respectivement sur les parties supérieures et inférieures de la particule. En présence d'un gradient de vitesse, la vitesse du fluide sera plus élevée dans la partie supérieure, ce qui conduira à une asymétrie des contraintes de cisaillement. De plus, la différence entre F_1 et F_3 va donner une force nette dans la direction de l'écoulement et un moment de rotation. F_2 et F_4 représentent les forces appliquées sur le côté de la particule. Ces forces sont influencées par la rotation de la particule et la distribution du champ de vitesse autour de cette dernière. Leur déséquilibre entraîne une force de portance, responsable de la migration latérale de la particule.

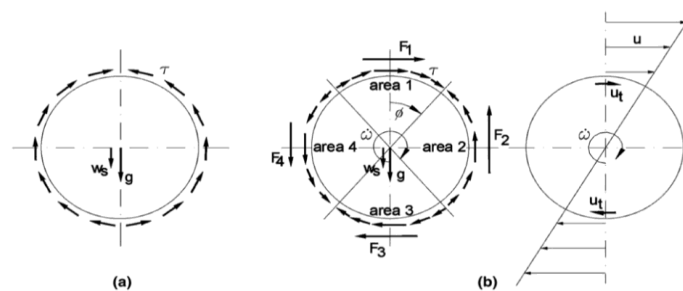


Figure 2.19 Répartition des contraintes de cisaillement autour de la particule dans un fluide au repos (a) et dans un écoulement cisailé (b) (Talmon & Huisman, 2005).

Wang et al. (2018) ont établi une relation entre les propriétés de sédimentation et les paramètres rhéologiques des résidus grossiers. Ils considèrent que le phénomène de sédimentation des particules de résidus est étroitement lié aux forces mises en jeu dans la suspension à savoir la gravité, la flottabilité et l'adhérence. Dans les conditions statiques, l'équation (2.24) exprime la résultante des forces pour les grosses particules :

$$F_R = G - f_f - f_a \quad (2.24)$$

F_R est la résultante des forces, G est la gravité reçue par les particules grossières, $f_{f\text{ est}}$ la force de flottabilité à laquelle la particule grossière est soumise et f_a est la force d'adhérence reçue par les particules grossières.

$$F_R = G - f_f - f_a = 0 \quad (2.25)$$

La force d'adhérence est fortement à la consistance de la suspension des résidus, et une valeur maximale de la force d'adhérence $f_{a,max}$ peut être atteinte lorsque la résultante des forces pour les particules grossières est non nulle, ce cas la sédimentation des résidus se produit. La force d'adhérence maximale $f_{a,max}$ satisfait à l'inéquation (2.26) suivante :

$$f_{a,max} < G - f_f \quad (2.26)$$

Lorsque la résultante des forces est dirigée vers le haut, le phénomène de sédimentation devient difficile à se produire. L'inéquation (2.17) est satisfaite pour la $f_{a,max}$.

$$f_{a,max} > G - f_f \quad (2.27)$$

Si la force d'adhérence à laquelle les particules grossières sont soumises est suffisamment grande, la suspension pourrait devenir un excellent fluide non sédimentaire. Dans ce cas, l'inéquation (2.28) est satisfaite.

$$f_{a,max} \geq G - f_f = (\rho_s - \rho_f) \times g \times V \quad (2.28)$$

$V = (\pi d^3/6)$ est le volume de la particule grossière.

Jossic & Magnin (2001) et Saak et al. (2001) ont également relié la force d'adhérence maximale fournie par les suspensions de résidus des suspensions. Ils parviennent à relier la force d'adhérence au seuil de cisaillement des suspensions, $f_{a,max}$ peut-être défini par l'équation (2.29) suivante :

$$f_{a,max} = A \times \tau_0 \quad (2.29)$$

τ_0 est le seuil de cisaillement et A : est la surface de contact entre la particule grossière et la suspension dans la direction du mouvement.

Le seuil de cisaillement des suspensions est lié aux conditions des suspensions (physico-chimiques) et se compose d'un seuil de cisaillement statique et d'un seuil de cisaillement dynamique (Wang et al., 2018). Le seuil de cisaillement statique est mesuré dans les conditions statiques par :

$$f_{a,max} = C \times A \times \tau_s \quad (2.30)$$

C est le coefficient de force d'adhérence ($C = 1$ pour les particules sphériques tandis que pour les particules non sphériques, il est compris entre 1,2 et 2); τ_s est le seuil de cisaillement statique de la suspension et $A = (\pi d^2/4)$.

Afin d'éviter la sédimentation des particules grossières de résidus, la force d'adhérence maximale fournie par la suspension doit être supérieure à la force d'adhérence exercée sur les particules grossières. Ainsi, les conditions de sédimentation et de non-sédimentation s'énoncent comme suit par combinaison des équations (2.31 et 2.32):

- Non-sédimentation

$$\tau_s > \frac{2(\rho_s - \rho_f)gd}{3C} \quad (2.31)$$

- Sédimentation

$$\tau_s < \frac{2(\rho_s - \rho_f)gd}{3C} \quad (2.32)$$

Dans ces équations, d est diamètre des particules grossières. Pour des particules non sphériques, le diamètre équivalent noté $d_e = (6V/\pi)^{1/3}$.

Il apparaît ainsi que les propriétés de sédimentation des suspensions de résidus dépendent non seulement de la densité et du diamètre des particules, mais également de la contrainte seuil de la suspension. Le coefficient de force d'adhérence augmente avec l'augmentation de la contrainte seuil de la suspension. Par ailleurs, plus la contrainte seuil de la suspension est élevée, plus la suspension tend à présenter un comportement de non-sédimentation.

2.5 Facteurs d'influence de la sédimentation

2.5.1 Effet de la taille et de la densité des particules

La ségrégation des particules dans une suspension dépend fortement de l'équilibre entre les mécanismes de séparation liés à la taille et à la densité des grains (Gray & Ancey, 2015). Considérant cet équilibre, les particules peuvent soit se séparer en couches distinctes, soit demeurer homogènes. Lorsque, la densité spécifique des particules est identique, la ségrégation différentielle entre les particules ne dépendra plus de la densité, mais plutôt de leur taille (Gray & Ancey, 2011).

Le tableau 2.2 montre les temps de sédimentation dans l'eau calme de quelques matériaux typiques en fonction de leur diamètre. Ces résultats sont obtenus dans les conditions expérimentales contrôlées à 10 °C, avec les mêmes caractéristiques chimiques et des particules de forme sphérique et de densité $G_s = 2,65$ (Shammas et al., 2005). On peut constater que plus les particules sont fines, plus le processus de sédimentation gravitaire est lent.

Tableau 2.2 : Vitesse de sédimentation des particules en suspension dans l'eau (Shammas et al., 2005)

Diamètre de la particule (μm)	Temps approximatif pour sédimenter (sur une hauteur de 1m)
10000	1,2 s
1000	9 s
100	2 min
10	2 h
0,1	800 jours

Dans les essais en colonnes de sédimentation, les particules de plus grand diamètre se déposent plus rapidement, créant un profil de concentration variable selon la hauteur de la colonne (Xu et al., 2017; Chalaturnyk et al., 2002). Li & van Zyl (2022) ont introduit le concept de taille critique d_0 , définie comme le seuil à partir duquel une particule est susceptible de participer à la ségrégation initiale. Seules les particules dont la taille dépasse cette valeur critique sont impliquées dans cette première phase de séparation.

La différence de densité entre le fluide et les particules est importante dans le processus de la ségrégation (voir sections 2.4.2 et 2.4.3). L'étude du comportement de ségrégation et de sédimentation freinée des suspensions de résidus miniers a montré que les particules ayant une densité élevée ont une tendance à se ségréger plus facilement que celle de même taille avec une

densité plus faibles (Li, 2023). Eltilib et al. (2011) ont démontré que l'augmentation de la densité du fluide réduit la vitesse de sédimentation des particules, en particulier celle de petite taille. En faisant varier la densité du fluide de 0,9982 à 1,4379 g/cm³, ils ont observé une mise en suspension plus efficace des particules fines, ce qui réduit leur tendance à sédimenter.

La vitesse de sédimentation peut également être influencée par la forme des particules, mesurée par le facteur de sphéricité. Ce facteur compare la surface réelle de la particule à celle d'une sphère parfaite. À une faible densité de fluide (0,9982 g/m⁻³), les particules de petites tailles ont une vitesse de sédimentation plus faible même avec une sphéricité élevée.

2.5.2 Effet de la paroi et de l'inclinaison de la colonne

L'inclinaison de la colonne d'essai de sédimentation peut avoir un effet significatif sur la vitesse de sédimentation. L'inclinaison accélère le processus de sédimentation, car elle modifie la direction et l'intensité des forces agissant sur les particules (Ponder, 1925; Nakamura et Kuroda, 1937; Herbolzheimer & Acrivos, 1981; Khelifi, 2018). La figure 2.20 montre l'effet de l'inclinaison de la colonne lors de l'essai de sédimentation. La courbe A ($\alpha = 0^\circ$) est la référence ou témoin, à ce niveau la sédimentation réalisée dans la colonne verticale est lente, car l'interface descend très lentement et la pente est faible c'est-à-dire que le temps de sédimentation est au maximum. Les courbes : B ($\alpha = 20^\circ$) ; C ($\alpha = 35^\circ$) et D ($\alpha = 50^\circ$) montrent que plus l'angle augmente, plus la pente de la courbe est raide. L'inclinaison de la colonne affecte la vitesse de sédimentation c'est-à-dire que l'interface résidus/eau stagnante descend rapidement, ce qui montre que la vitesse de sédimentation augmente en réduisant le temps nécessaire pour atteindre l'état final (avec l'inclinaison des colonnes, la séparation solide-liquide s'intensifie). La ligne en pointillées représente les résultats obtenus à partir de la théorie de Ponder (1925), Nakamura et Kuroda (1937), souvent abrégée PNK, tandis que la ligne continue (-) représente la prédiction du modèle PNK modifié, qui intègre explicitement l'influence de la couche de sédiments sur le comportement du système. L'équation PNK (non donnée ici) permet de décrire la vitesse de sédimentation dans les systèmes inclinés (effet boycott). Herbolzheimer & Acrivos (1981) constate que plus la colonne d'essai est inclinée plus le temps de sédimentation est rapide. En effet, quand la colonne est inclinée, les particules présentes dans la colonne entrent dans une forte interaction avec la paroi. Cette interaction modifie le champ de vitesse du fluide et favorise l'écoulement le long de la paroi.

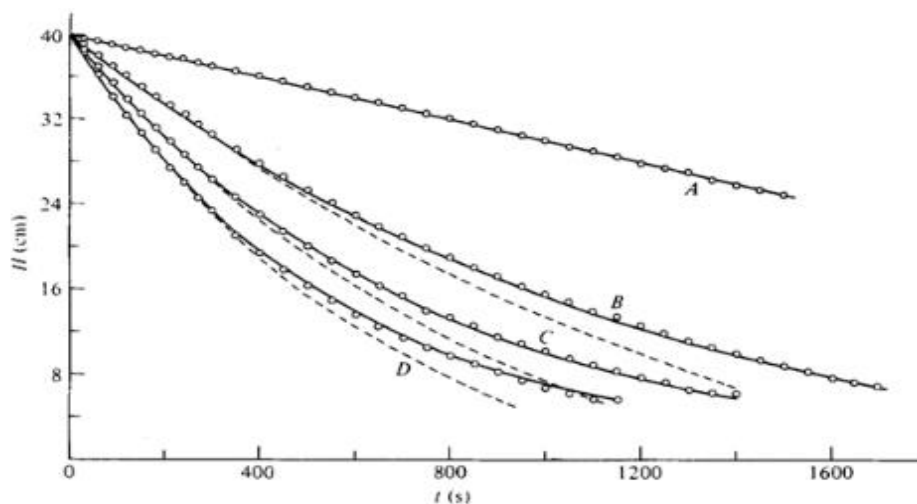


Figure 2.20 Hauteur de l'interface suspension/liquide en fonction du temps pour une suspension de particules monodisperses de verre, pour différents angles d'inclinaison de la colonne (Herbolzheimer & Acrivos 1979).

2.5.3 Effet du diamètre de la colonne

L'interaction entre les particules en suspension et les parois de la colonne d'essai influence significativement la cinétique de la sédimentation. Ce phénomène, appelé effet de paroi, se manifeste par un frottement qui réduit la vitesse de chute des particules (Sills, 1998). Gao et al. (2016) recommandent un diamètre interne de 14,5 cm pour s'affranchir de l'effet de paroi. Il convient également de savoir que ce seuil n'est pas indépendant des caractéristiques de la suspension. Au fur et à mesure que la concentration solide augmente, l'influence des parois ne se limite plus aux effets hydrodynamiques. Dans les suspensions concentrées par exemple, la formation d'un réseau particulaire permet une redistribution partielle des contraintes vers les parois, la littérature le qualifie d'effet de type Janssen, ce qui contribue à ralentir davantage la sédimentation par rapport à un milieu sans paroi (Been & Sills, 1981; Saint-Michel et al., 2018).

2.5.4 Effet de la concentration solide initiale

Le pourcentage solide initial (C_{w-mi}) d'une suspension influence directement la ségrégation verticale au sein d'une colonne de sédimentation. Une concentration élevée de particules augmente la viscosité et le seuil d'écoulement du mélange, ce qui ralentit la vitesse de chute individuelle des

particules (voir équations des sections 2.4.2 et 2.4.3). La concentration élevée intensifie les interactions interparticulaires, ce qui contribue à modifier le comportement collectif du système sédimentaire (Zhang, 2020; Richardson & Zaki, 1954). Une suspension avec un pourcentage solide élevé tend à maintenir une zone de décantation entravée uniforme, limitant la ségrégation verticale tandis qu'un pourcentage solide faible réduit la capacité de la résistance à la décantation, cela contribue à la formation du gradient de concentration au fil du temps de sédimentation (Li et al., 2023).

La figure 2.21 montre le comportement temporel du pourcentage solide des sables pour une suspension de mélange argile présentant un ratio sable/fines $SFR=1$ et un ratio fine/eau FWR variant de 10, 30 et 40. [SFR (= masse de la fraction de sable ou particules avec $d > 44 \mu m$ /masse de la fraction de fines ou particules avec $d < 44 \mu m$)] et le rapport [FWR (= masse de l'eau /masse de la fraction fine ou particules avec $d < 44 \mu m$)]. Pour les figures 2.22a et 2.22d, les mesures sont effectuées à des intervalles de temps de 15 secondes sur une durée totale de 90 secondes. Le pourcentage initial des mélanges était $C_{w-ini} = 18,8\%$, $SFR=1$ et $FWR=10$, les profils de pourcentage de sable montre un faible pourcentage au-dessus de la colonne (15-50 cm) avec des pourcentages de sable élevé au fond de la colonne (0-15 cm). À $C_w = 18,8\%$, la ségrégation est presque instantanée et se produit dans les premières secondes suivant la préparation du mélange. En l'absence de fortes interactions interparticulaires pour s'opposer à l'effet de la gravité dans la pulpe, l'analyse des profils temporels montre une sédimentation immédiate de la fraction sableuse (15%) vers la base de la colonne, ce qui conduit à un dépôt ségrégué par zone de concentration solide. Pour $C_{w-ini} = 46,2\%$: $SFR=1$ et $FWR = 30$ pour les figures 2.22b et 2.22e. Pour $C_{w-ini} = 57,1\%$: $SFR=1$ et $FWR= 40$ pour les figures 2.22c et 2.22f, les profils de pourcentages solides et de teneur en sable correspondant deviennent progressivement et respectivement presque verticaux, et ce, malgré une durée d'essai prolongé (180 secondes) et 24 heures. Le processus de sédimentation ne conduit à aucune tendance visible à une ségrégation au cours de cette période.

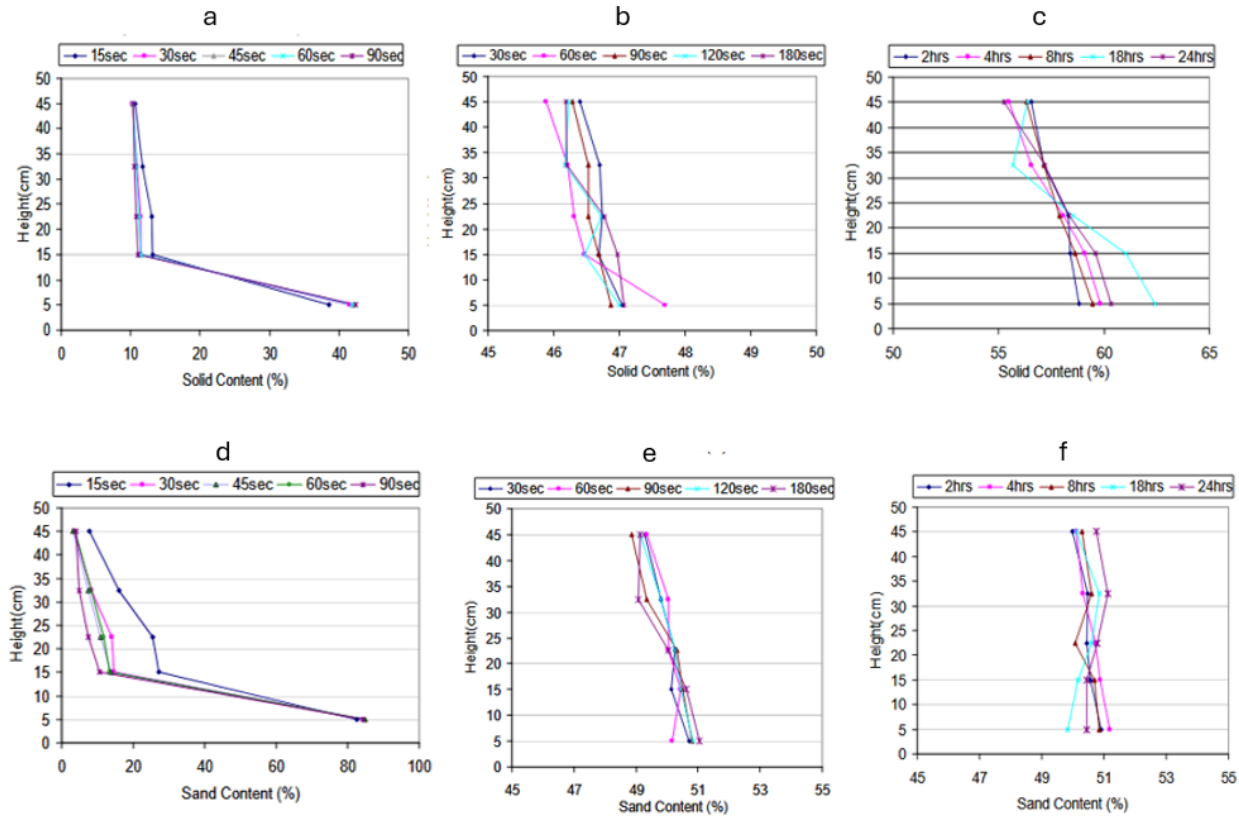


Figure 2.21 Influence du pourcentage solide initial C_{w-ini} , de SFR (sand to fine ratio) et FWR (wine to water ratio) sur l'évolution des profils verticaux de pourcentage solide et de teneur en sable (particules $> 44 \mu\text{m}$) au cours de la sédimentation : a) et d) $C_{w-ini} = 18,8\%$, SFR=1 et FWR=10, b) et e) $C_{w-ini} = 46,2\%$, SFR=1 et FWR=30 et c) et f) $C_{w-ini} = 57,1\%$, SFR=1 et FWR=40 (Mihiretu, 2009).

2.6 Indice de ségrégation des résidus miniers

Dans le contexte des résidus miniers, il est difficile d'affirmer qu'une fraction de particules soit, à elle seule ségrégant ou non. Une règle de pouce est utilisée dans l'industrie pour prédire le comportement global des résidus. Thomas (1976) trouve que les particules de taille supérieure à $75 \mu\text{m}$ sédimentent plus facilement contrairement aux particules fines généralement inférieures à $50 \mu\text{m}$ qui ont tendance à demeurer en suspension dans le mélange. L'affinité des différentes fractions granulométriques à se déplacer différemment dans le fluide sous l'effet de la gravité et du fluide porteur peut favoriser la ségrégation. Le comportement final d'un résidu en suspension dépend de plusieurs paramètres : distribution granulométrique des particules PSD (μm), densité spécifique des grains solides, pourcentage en solide initial C_{w-ini} , propriétés rhéologiques. Donahue

et al. (2008) recommandent d'utiliser C_{w-ini} comme indicateur de ségrégation pour des rapports sable/fines $SFR \geq 5$. Avec cette approche, les proportions de particules grossières deviennent importantes et C_{w-ini} (%) tient compte de la tendance naturelle (ou propension) du mélange à se ségréger dans le mélange.

Le processus de sédimentation englobe à la fois la dispersion des particules dans un fluide et leur décantation sous l'effet de plusieurs mécanismes comme la gravité, l'interaction visqueuse, la traction exercée par l'écoulement et l'interaction entre les particules (Mihiretu, 2009). Pour mieux cerner le comportement des résidus lors de la ségrégation verticale, des essais en colonne de sédimentation peuvent être réalisés au laboratoire. Mihiretu (2009) parvient à montrer, à partir des essais en colonne, que la rhéologie des fines (viscosité, et seuil de cisaillement), le pourcentage solide et la taille des particules grossières et les conditions de dépôt commandent la transition entre le dépôt homogène et la stratification. Afin de pouvoir quantifier le degré de ségrégation dans les dépôts de résidus, Mihiretu (2009) a proposé un indice statistique de ségrégation (IS) (équation 2.33). Cet indice permet de distinguer les dépôts homogènes et stratifiés en tenant compte de la profondeur de la colonne de sédimentation.

L'équation de l'indice de ségrégation (IS) pondère chaque concentration massique en solides (C_{wi}) par la hauteur de la section (h_i) dans laquelle l'échantillon a été prélevé. Cette pondération permet de tenir compte de la contribution réelle de chaque couche à la structure verticale du mélange. Cette approche permet de représenter fidèlement la distribution verticale des particules dans la colonne.

$$IS = \sqrt{\frac{\sum_i h_i \times (C_{wi} - C_{w moy})^2}{\sum h_i}} \quad (2.33)$$

$$\text{où } C_{w moy} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{wi})}{n} \quad (2.34)$$

Dans cette équation, C_{wi} (%) est le pourcentage solide de la section de hauteur i considérée, $C_{w moy}$ (%) est la moyenne pondérée des pourcentages solides mesurés après sédimentation dans la colonne et h_i est hauteur de la section (i) considérée. Mihiretu (2009) adopte un seuil $IS = 0,05$ pour distinguer les dépôts homogènes ($IS < 0,05$), et considère qu'au-delà de cette valeur, le comportement des résidus est ségrégant ($IS > 0,05$).

2.7 Récapitulatif et besoins en recherche

La ségrégation est un phénomène couramment rencontré dans l'industrie minière, surtout dans le processus d'entreposage des résidus en pulpe et épaissis. Bien qu'elle ne soit pas visiblement perceptible, elle contribue fortement à influencer la distribution des propriétés physiques des résidus. L'hétérogénéité de la distribution granulométrique des résidus a un impact sur le comportement hydrogéotechnique des résidus (Bussière, 2007). Puisque les résidus au repos peuvent ségréger et sédimenter naturellement dans le parc à résidus, l'approche expérimentale en colonne permettrait d'évaluer l'influence de la ségrégation sur la structuration verticale du dépôt. Les études existantes présentées ci-dessus se sont surtout concentrées sur la description du phénomène de ségrégation, sur l'identification des conditions qui favorisent l'apparition du phénomène de ségrégation et sur l'analyse de l'influence de divers paramètres. Malgré ces progrès, la littérature ne montre pas clairement comment les propriétés physiques incluant la rhéologie et les interactions interparticulaires de résidus évoluent pendant la ségrégation statique ni comment elles sont liées à la capacité des résidus de ségréger.

Cette étude jette les bases d'une approche à l'échelle du laboratoire qui permettrait de développer des liens entre les propriétés intrinsèques des résidus miniers et leur aptitude à la ségrégation. L'approche sera utilisée lors de travaux ultérieurs pour développer un critère prédictif de non-ségrégation. Une fois ce critère développé, les partenaires industriels pourront mieux comprendre le comportement ségrégatif des résidus miniers et intégrer cette connaissance dans le processus décisionnel lié au mode d'entreposage des résidus privilégiant des résidus non ségrégant. Les effets indésirables de la ségrégation sur la performance hydrogéotechnique des techniques de réhabilitation des parcs à résidus pourront être limités.

CHAPITRE 3 MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Ce chapitre présente les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées pour étudier la sédimentation statique de résidus miniers à partir des colonnes de sédimentation. Il décrit les différentes techniques mises en œuvre pour préparer et mettre en place les résidus dans les colonnes de sédimentation. La méthode d'échantillonnage des résidus sur la longueur de la colonne est proposée, suivie des procédures de caractérisation des échantillons collectés.

3.1 Matériaux

Les résidus miniers utilisés dans le cadre de notre projet proviennent d'une mine, située dans la région minière de l'Abitibi-Témiscamingue. Au total, dix (10) barils de résidus ont été réceptionnés pour réaliser les essais de sédimentation en colonnes ainsi que d'autres essais en canal d'écoulement (flume test) qui ne font pas partie de cette étude.

3.2 Homogénéisation et caractérisations initiales des résidus miniers

La figure 3.1 montre les différentes étapes suivies au cours de la préparation initiale des résidus. Ces étapes incluent : a) le retrait de l'eau surnageant des résidus, b) le transfert des résidus sédimentés dans les cuves de la pompe-malaxeur (Compaction ChemGrout CG-500 HP) à l'aide d'une pelle, c) l'homogénéisation mécanique des résidus pendant environ (2h) et d) finalement le pompage de la pulpe homogénéisée obtenue dans 12 chaudières étiquetées servant de stockage intermédiaire. L'eau surnageant contenue dans les barils de résidus a été stockée dans des chaudières étanches. Ensuite, les résidus ont été déversés au sol, puis introduits à l'aide d'une pelle dans la pompe-malaxeur. Chaque baril contenait environ 240 kg de résidus (dépourvus d'eau surnageant). Au total, 5 barils ont été utilisés soit 1200 kg de résidus humides. Une fois, introduits dans le malaxeur, les résidus ont été progressivement homogénéisés à l'aide des agitateurs intégrés dans les cuves de la pompe-malaxeur. Après la phase d'homogénéisation (2 heures), les résidus homogènes sont pompés vers 11 chaudières de stockages préalablement étiquetés. Des échantillons prélevés dans chacune des chaudières ont été utilisés pour déterminer les pourcentages solides, et vérifier l'homogénéité et pour réaliser des caractérisations physiques (analyse granulométrique, densité relative des grains solides). Un échantillon représentatif des résidus a été immédiatement prélevé dans les chaudières pré-homogénéisées pour des caractérisations chimiques et minéralogiques des résidus. Les figures 3.2 et 3.3 montrent respectivement les caractérisations

réalisées ainsi que les équipements spécialisés utilisés . Les détails de ces caractérisations sont donnés ci-dessous.



Figure 3.1 Étapes suivies pour la préparation et la caractérisation initiale des résidus: a) récupération du surnageant, b) transfert des résidus dans les chambres de la pompe-malaxeur, c) homogénéisation des résidus, d) Mise en lots des résidus pour la caractérisation initiale.

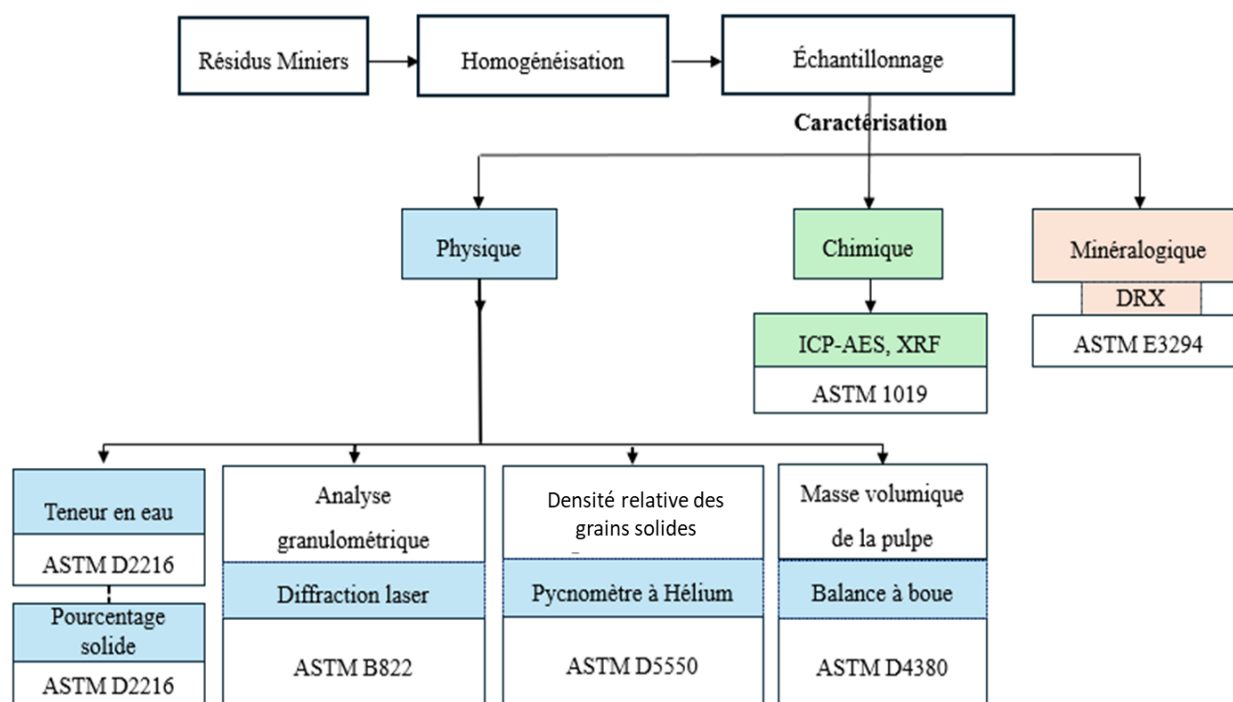


Figure 3.2 Caractérisations initiales des résidus et équipements associés

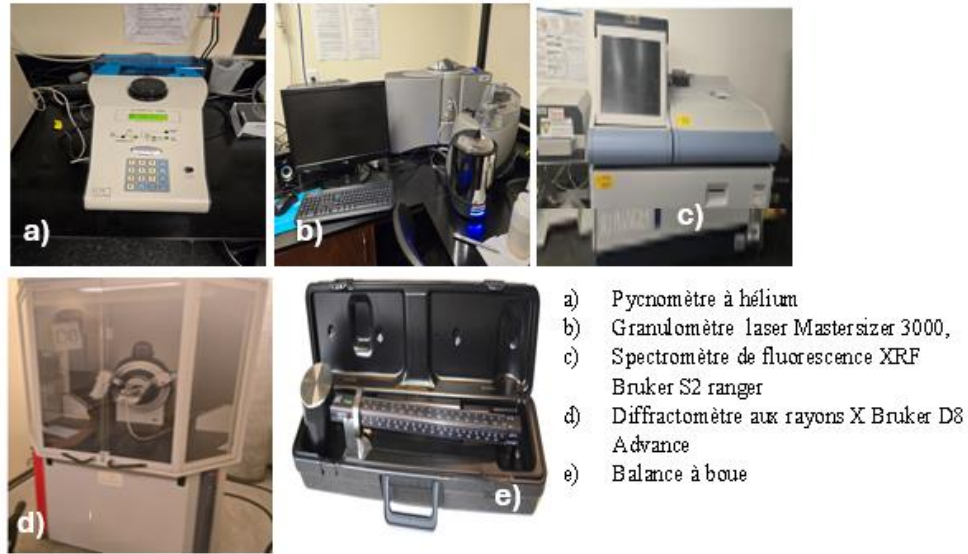


Figure 3.3 Équipements de caractérisation utilisés

3.2.1 Caractérisation physique

La caractérisation physique a porté sur la détermination de la teneur en eau massique des résidus w , le pourcentage solide C_w , la distribution granulométrique des particules, la densité relative des grains solides (G_s) et la densité de la pulpe de résidus (ρ_p). Les valeurs de la teneur en eau initiale w_{ini} et du pourcentage solide initial C_{w-ini} sont indispensables dans la préparation de la pulpe à un pourcentage solide donné différent de C_{w-ini} comme montré plus loin.

La détermination de la teneur en eau des résidus a été faite selon (ASTM D2216, 2022). Le procédé consiste à prélever un échantillon représentatif des résidus humides (préalablement homogénéisé et stocké en chaudière), d'une masse humide (M_h) d'environ 100 g, pesée à l'aide d'une balance. Cet échantillon est ensuite placé dans une étuve pour séchage à 60°C jusqu'à ce que sa masse ne change plus. Après le séchage, la masse sèche de l'échantillon (M_s) est mesurée, ce qui permet de calculer la masse d'eau (M_w) contenue dans l'échantillon humide. La teneur en eau massique w et le pourcentage solide massique des résidus C_w sont alors calculés comme suit.

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

$$C_w(\%) = \frac{1}{\left(1 + \frac{w(\%)}{100}\right)} \times 100 \quad (3.2)$$

Les résidus étudiés ont montré une teneur en eau initiale w_i de $35\% \pm 0,3\%$ pour un pourcentage solide initiale $C_{w\text{-ini}}$ de $74\% \pm 0,1\%$.

La densité relative des grains solide des résidus été mesurée à l'aide du pycnomètre à hélium Quantachrome instruments ULTRAPYC 1200e (voir figure 3.3a). Le principe de mesure consiste à injecter l'hélium, à une pression contrôlée, à travers l'échantillon sec de résidus de masse connue. Le volume du solide dans l'appareil peut alors être déterminé (équations non données ici) avec précision, permettant ainsi le calcul de la densité spécifique des grains solides (ρ_s) et par la suite la densité relative des grains solides G_s ou $D_R (= \rho_s / \rho_w)$. Une moyenne de 10 mesures faites sur le même échantillon est fournie par l'appareil. La densité relative moyenne G_s ou D_R des grains solides résidus étudiés est de $2,72 \pm 0,02$.

Les analyses granulométriques ont été réalisées par diffraction laser à l'aide du Malvern Panalytical Mastersizer 3000 de l'URSTM (figure 3.1b). Cet équipement permet de mesurer des particules de taille allant de $0,01$ à $3500 \mu\text{m}$, conformément à la norme ASTM B822 (ASTM, 2017). La diffraction permet de déterminer la taille des résidus en fonction des angles de diffraction de la lumière. Lorsque le faisceau laser traverse la suspension aqueuse contenant les résidus, les particules présentes diffusent la lumière dont les intensités sont caractéristiques des tailles de particules. Les particules plus grosses diffusent la lumière à des petits angles, tandis que les particules plus fines la diffusent à de grands angles. La dispersion des échantillons est assurée par des unités automatisées, offrant des options de dispersion humide et sèche, ce qui permet de mesurer avec plus de précision de la taille des particules solides de résidus. Une petite quantité d'échantillons de résidus (environ 1 à 2 g) est mélangée à de l'eau contenue dans le bac et transportée vers un faisceau laser pour analyse. Pour obtenir une mesure précise, l'appareil utilise un ultrason intégré dans le bac. Les ultrasons dissocient les particules fines entre elles et empêchent le laser de considérer un amas de particules comme une seule particule. Chaque analyse est réalisée et la courbe finale représente la moyenne des mesures obtenues. Lors de chaque mesure, le Malvern effectue automatiquement plusieurs acquisitions successives, qui sont moyennées en arrière-plan par le logiciel afin de réduire le bruit instrumental et améliorer la qualité des résultats.

L'analyse initiale de la granulométrie des résidus est présentée sous forme de courbe granulométrique à la figure (3.4). Le tableau 3.1 ci-dessous présente quelques caractéristiques granulométriques des résidus, incluant les valeurs des diamètres D_x définis comme diamètres

correspondant à un passant x (%) sur la courbe granulométrique, les valeurs du coefficient d'uniformité C_U (éq. 3.3) et du coefficient de courbure C_c (éq. 3.4), ainsi que la valeur du passant au tamis de 80 μm , i.e., P_{80} . On observe que C_U est de 16, ce qui indique une distribution granulométrique étalée, et C_c est de 1,06. P_{80} est de 75%.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.3)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \times D_{10})} \quad (3.4)$$

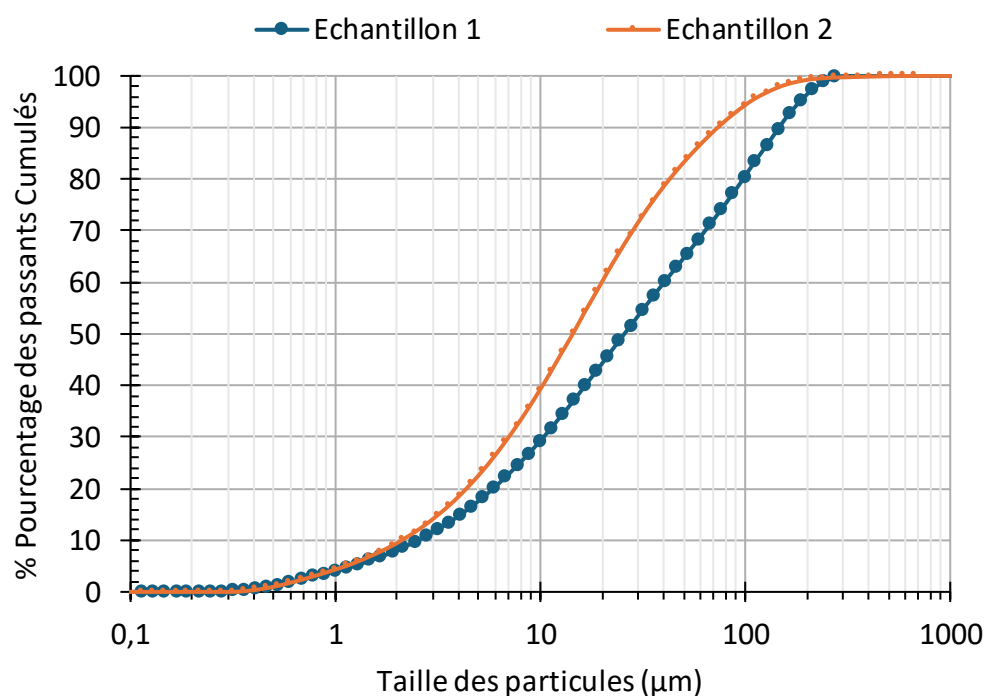


Figure 3.4 Courbe de distribution granulométrique des résidus

Tableau 3.1 : Valeurs initiales de l'analyse granulométrique des échantillons de résidus étudiés

Paramètre	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	D_{80}	D_{90}	C_U	C_c	P_{80}
Unité	μm	μm	μm	μm	μm	μm	-	-	%
Échantillon 1	2,87	11,8	29,2	45,8	111	166	16	1,1	75
Échantillon 2	2,39	7,95	16,3	22,6	48,6	83,4	9,46	1,17	90

3.2.2 Caractérisation chimique

Dans le cadre de cette étude, les analyses chimiques ont été organisées en deux étapes : la quantification des oxydes et la mesure des teneurs en soufre et en carbone (S/C). La fluorescence aux rayons X (XRF), réalisée à l'aide du spectromètre de fluorescence XRF Bruker S2 ranger (figure 3.3c), est une méthode analytique utilisée pour l'analyse chimique des résidus miniers. Grâce à cette technique, les éléments chimiques présents ont été identifiés et leurs compositions respectives mesurées: SiO_2 (60,4%), Al_2O_3 (15,4%), Fe_2O_3 (6,06%), MgO (3,2%), CaO (5,07%), Na_2O (4,56%), K_2O (1,16%), TiO_2 (0,53%), P_2O_5 (0,12%), MnO (0,09%), Cr_2O_3 (0,02), V_2O_5 (0,03%) et LOI (2,5%). Bien que l'analyse par fluorescence fournisse des informations sur les éléments, elle ne permet pas directement de déterminer les minéraux. En combinant les résultats du XRF, avec d'autres techniques comme la diffraction au RX, la minéralogie des résidus a pu être déterminée (voir section 3.2.3).

3.2.3 Caractérisation minéralogique

La caractérisation minéralogique des résidus miniers a été réalisée par SGS Natural Ressources grâce à la diffraction des rayons X (DRX) à l'aide du diffractomètre Bruker A.X.S. Advance D8 (figure 3.3). L'analyse a été réalisée en mode ($\theta/2\theta$), avec des angles de diffractions compris entre 5° et 7° permettant de satisfaire à la loi de Bragg et enregistrer les conditions de diffraction des plans cristallins. Le DRX a permis d'identifier et de quantifier les phases minérales présentes dans les échantillons de résidus miniers grâce à la loi de Bragg (logiciels EVA et TOPAS). Les rayons X diffractés sont mesurés en fonction de l'angle (2θ) pendant le bombardement de l'échantillon, et les résultats sont enregistrés dans un diffractogramme. Avant l'analyse, l'échantillon est séché, broyé, homogénéisé. L'analyse des pics du diffractomètre observée à la figure (3.5) a permis d'identifier les proportions massiques des différents types de minéraux constituant les résidus étudiés. Voir l'annexe A pour les détails de l'analyse.

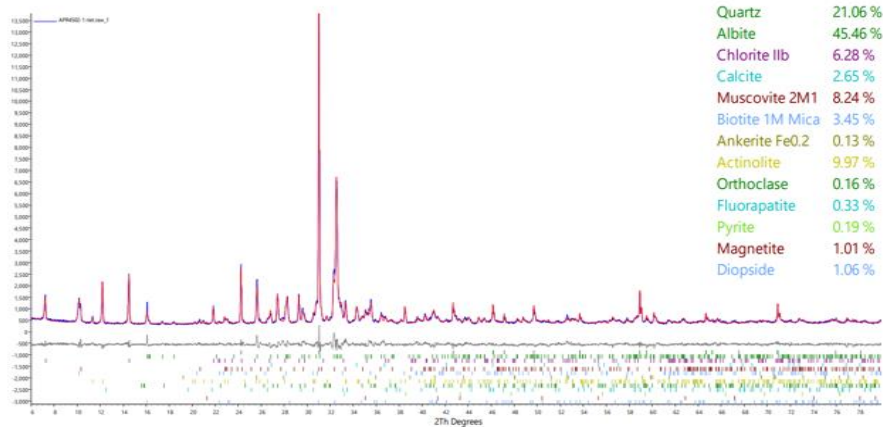


Figure 3.5 Spectrogramme de diffraction des rayons X des résidus étudiés.

3.3 Protocole des tests de sédimentation statiques en colonnes

Le protocole et le programme expérimental mis en œuvre pour l'étude de la sédimentation des résidus en colonnes. Les étapes suivantes, détaillées ci-dessous, ont été suivies :

- la préparation des résidus au pourcentage massique de solide C_w visé ;
- le remplissage des colonnes;
- la réalisation des tests de sédimentation;
- la caractérisation des échantillons collectés le long de la colonne.

3.3.1 Préparation des résidus

Les résidus contenus dans les chaudières avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de $74\% \pm 0,1$ ont été transférés par déversement dans les chambres de la pompe-malaxeur. Afin d'obtenir les résidus avec les pourcentages solides souhaités (finaux) pour les essais de sédimentation ($C_{w-fin} = 60\%$, 65% et 70%), le surnageant collecté des barils a été progressivement ajouté aux résidus. La masse d'eau à ajouter pour passer de C_{w-ini} à C_{w-fin} est donnée par l'équation 3.5. Après l'homogénéisation (environ 2h), des échantillons ont été pris directement des chambres de la pompe pour vérifier si le pourcentage solide souhaité est atteint.

$$M_{w-aj} = M_h \left(\frac{C_{w-ini}}{C_{w-fin}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

où M_{w-aj} est la masse d'eau à ajouter à une masse de résidus M_h de pourcentage initial C_{w-ini} connu pour avoir un matériau avec un pourcentage final C_{w-fin} ($< C_{w-ini}$).

Une fois, l'agitateur en marche les résidus humides ont été progressivement introduits dans les cuves en ajoutant le surnageant retiré des résidus. Après une durée d'homogénéisation suffisante, située entre 15 à 20 minutes, on prélève des échantillons pour vérifier si le pourcentage solide visé est atteint. Une procédure de séchage rapide des résidus a été utilisée (ASTM D4959). La pulpe homogénéisée à la bonne concentration solide a été échantillonnée pour la mesure de la masse volumique (densité) et des propriétés rhéologiques initiales (voir section 3.4).

3.3.2 Remplissage des colonnes et test de sédimentation

La pulpe homogénéisée a été pompée dans les colonnes de sédimentation cylindriques opaques en PVC (d'une hauteur H de 100 cm et un diamètre interne D de 15 cm) (Fig. 3.6a). Le tuyau de remplissage a été initialement positionné à environ 25 à 30 cm de la base de la colonne, puis progressivement remonté au fur et à mesure que le niveau de la pulpe augmentait, jusqu'à atteindre une hauteur de remplissage de 90 cm. Le temps de remplissage d'une colonne selon les pourcentages solides C_w était de 51 secondes pour 70%, 47 secondes pour 65% et 44 secondes pour 60%. Dès lors que les colonnes sont remplies, un film en plastique est utilisé pour couvrir la surface des colonnes afin de limiter l'évaporation. La pulpe est laissée au repos pendant neuf périodes de sédimentation de 15 min (0,25h), 30 min (0,5h), 1h, 2h, 3h, 4 h, 5h, 6h et 24h pour chaque pourcentage solide de résidus.

Chaque colonne opaque est équipée de sept (07) ports d'échantillonnage (PTE) numérotés du haut vers le bas de 1 à 7 et espacés de 12,7 cm. Ces sept PTE 1 à 7 sont positionnés respectivement à des hauteurs de 77,3 cm ; 64,6 cm ; 51,9 cm ; 39,2 cm; 26,5 cm; 13,8 cm et 1,1 cm par rapport au bas de la colonne. Ces ports ont servi à prélever un échantillon de résidus sur toute la hauteur de base 12,7 cm à l'aide d'une pompe péristaltique. L'échantillonnage a été effectué du haut vers le bas, à chaque temps de sédimentation. Pour un pourcentage solide de résidus testé, 63 échantillons ont été collectés, soit sept (07) échantillons pour chacun des neuf temps de sédimentation fixés. Pour les 3 pourcentages solides étudiés, au total, 183 échantillons ont été collectés. Chaque fois, les échantillons ont été collectés dans des contenants fermés hermétiquement en attendant leur caractérisation faite au fur et à mesure du déroulement des essais de sédimentation.

Des colonnes transparentes (Fig. 3.6b) ont été utilisées pour observer la séparation de l'eau surnageant et les résidus sédimentant et mesurer l'évolution de l'épaisseur du surnageant au cours

du temps. Ces mesures ont permis de calculer la vitesse de sédimentation en appliquant l'équation 2.19.

Tableau 3.2 caractéristique des résidus utilisés pour les essais de sédimentation en colonne set temps de sédimentation

Test	Teneur en eau (%)	Pourcentage solide massique (%)	Masse volumique de la pulpe (g/cm^3)	Temps de sédimentation (h)
1	66,6	60	1,65	0,25, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 24
2	53,84	65	1,77	
3	42,85	70	1,80	

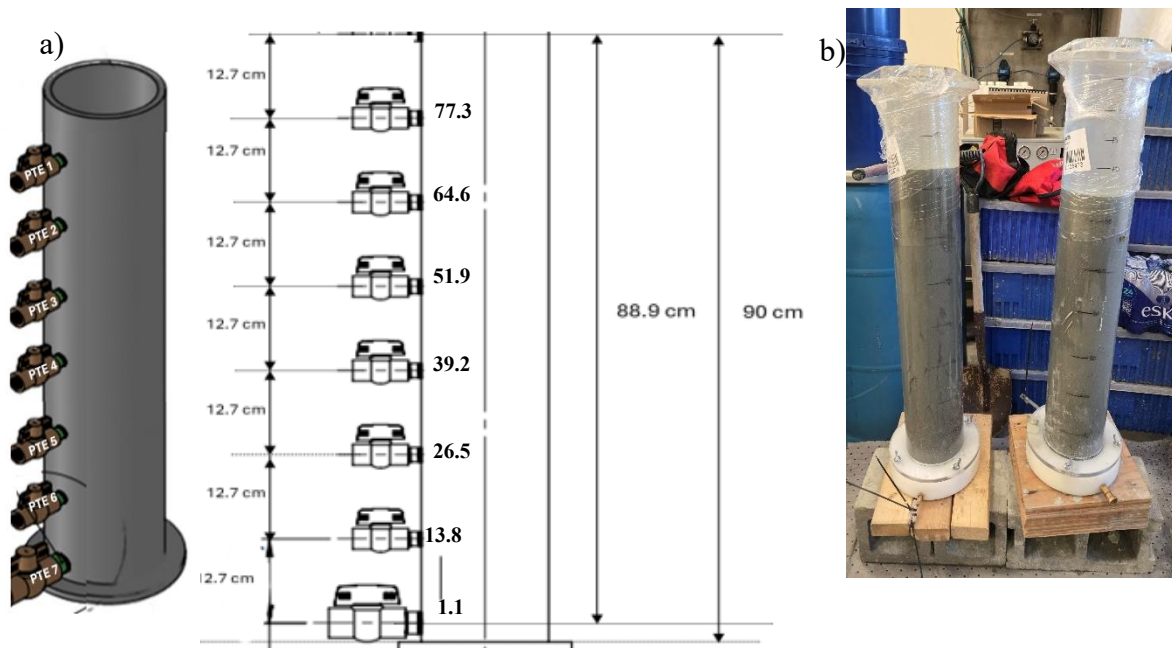


Figure 3.6 Colonnes de sédimentation typique avec des ports d'échantillonnage (a) et une colonne transparente utilisée pour la détermination de la vitesse de sédimentation (b)

3.4 Caractérisations pré- et post-sédimentation

Dans le cadre de ce travail, il a été considéré que la distribution granulométrique, la densité relative des grains solides, les propriétés chimiques, et minéralogiques de résidus homogénéisés aux différents pourcentages solides massiques visés ($C_w = 60\%$, 65% et 70%), telles que décrites à la

section 3.2 n'ont pas changées. Ils ont néanmoins fait l'objet de détermination de la masse volumique (ρ) et des propriétés rhéologiques initiales. De même, tous les échantillons de résidus collectés le long des colonnes ont fait l'objet de caractérisations physiques (w , C_w , D_R ou G_s , ρ et τ_{0-HB} , η_∞ et η_0). Les résultats obtenus vont permettre de déterminer les profils verticaux de chaque paramètre le long de chaque colonne. L'indice de ségrégation (équation 2.33) pourra alors être calculé à partir du profil vertical de du pourcentage solide C_w . Dans ce qui suit, on décrit comment la masse volumique et les propriétés rhéologiques ont été déterminées.

3.4.1 Détermination de la masse volumique

La masse volumique des résidus a été obtenue à l'aide de la balance à boue montrée à la figure 3.3d selon la norme ASTM D4380 (2020). La coupelle de 200 cm³ de la balance à boue est remplie à ras bord avec la pulpe de résidus. La mise en place d'un couvercle troué en son milieu permet de faire échapper le trop-plein de pulpe de manière à avoir un volume déterminé dans la coupelle. La coupelle est lavée en bouchant le trou du couvercle avec un doigt et essuyé. La balance alors est placée sur son support, et le poids coulissant est ensuite déplacé manuellement le long de la tige graduée jusqu'à atteindre l'équilibre, matérialisé par la centralisation de la bulle au milieu du repère de nivellement. Une fois, l'équilibre atteint la tige devient parfaitement horizontale par stabilisation de la balance à boue, la masse volumique de la pulpe est lue directement en g/cm³.

3.4.2 Caractérisation rhéologique

Les propriétés rhéologiques des échantillons de résidus ont été mesurées à l'aide d'un rhéomètre rotatif AR 2000 (TA Instruments) équipé d'une géométrie vane ou croisillon (diamètre de 28 mm et hauteur de 42 mm), adaptée aux suspensions à forte teneur en solides (Ouattara, 2011). Le diamètre du stator est de 30 mm, ce qui indique que l'entrefer latéral entre le stator et le rotor (vane) était de 1 mm. La figure 3.7 ci-dessous illustre la géométrie du croisillon.

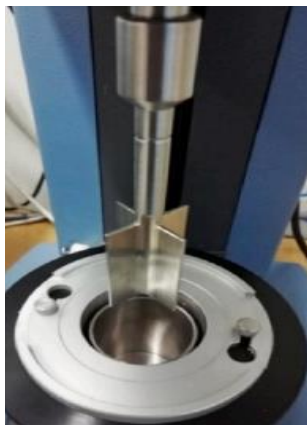


Figure 3.7 Croisillon (vane) du rhéomètre AR2000 utilisé.

Pour cette géométrie, un volume de 28,72 ml de suspension est nécessaire pour réaliser un essai rhéologique. La densité de l'échantillon mesurée en 3.4.1 à l'aide de la balance à boue est utilisée pour estimer le poids de cette quantité de suspension (en termes de force normale) à l'aide de l'équation 3.6. Le rhéomètre affiche le poids de suspension ajoutée au fur et à mesure, jusqu'à attendre la valeur F_N calculée.

$$F_N = \frac{28,72 \times \rho \times 9,81}{1000} \quad (3.6)$$

F_N : Force normale appliquée pour la préparation de 28,72 ml de l'échantillon considéré (N);

Le rhéomètre est piloté par un logiciel de contrôle qui permet le calibrage de l'appareil (réglage, inertie, friction du roulement, reconnaissance de la géométrie montée et la mise à zéro de l'entrefer). La figure 3.8 présente les modèles d'écoulements possibles dont le principe est expliqué dans le tableau 3.4.

Des tests rhéologiques préliminaires de type « peak hold » ont été effectués pour permettre de fixer le temps requis pour atteindre l'équilibre lors du cisaillement à un taux de cisaillement donné. Les tests rhéologiques ont été effectués selon la méthode d'écoulement en régime permanent (Steady State Flow) en appliquant des taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) allant de $0,1 \text{ s}^{-1}$ à 120 s^{-1} (chemin montant) et 120 s^{-1} à 0 s^{-1} (chemin descendant) en 10 paliers par chemin avec environ 45s d'équilibrage (représentant le temps requis pour que la structure du résidu passe de son état de repos à un état de régime permanent) marqué par l'apparition d'un plateau. L'acquisition des mesures débutera ensuite par palier et en mesurant la contrainte de cisaillement (τ) et de la viscosité dynamique ($\eta = \tau/\dot{\gamma}$; Pa.s^{-1}) pour chaque valeur de $\dot{\gamma}$. durant les essais, la température des échantillons a été

maintenue à 21°C grâce à un système Peltier. Par la suite, les courbes d'écoulement (ou rhéogrammes) $\tau(\dot{\gamma})$ et les courbes de viscosité $\eta(\dot{\gamma})$ ont été respectivement ajustées à l'aide des modèles rhéologiques de Herschel-Bulkley (équation 2.10) et de Cross (équation 2.18).

La qualité des ajustements entre les courbes expérimentales et prédites a été évaluée à l'aide de l'erreur standard SE, donnée par l'équation (3.7). L'erreur standard permet d'apprécier la cohérence entre les résultats expérimentaux et le modèle rhéologique appliqué, où des écarts plus importants indiquent une erreur plus élevée. Selon le manuel de l'instrument TA, l'erreur standard est considérée comme acceptable si elle est inférieure à 20%. En comparant les modèles, le modèle le plus adapté correspond à celui qui a une plus faible valeur de SE.

$$SE (\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_m - x_c)^2}{N - 2}}}{R} \times 1000 \quad (3.7)$$

x_m : valeur expérimentale ; x_c : valeur calculée par le modèle rhéologique ; N : nombre total de points de données mesurés ; R : différence entre les valeurs maximales et minimales mesurées.

Tableau 3.3 Modèles et principes des modèles d'écoulements

Modèles	Principes
Peak Hold Step	On impose un taux de cisaillement constant ($\dot{\gamma}$) et l'on observe la contrainte de cisaillement dans le temps jusqu'à la stabilisation.
Continuous Ramp Flow	On augmente progressivement et linéairement le taux de déformation, tout en mesurant la contrainte de cisaillement (τ).
Steady State Flow	On maintient un taux de déformation constant pendant une période suffisante pour atteindre un équilibre, puis la contrainte est augmentée.
Stepped Flow Step	On applique des paliers successifs de contrainte de cisaillement, et on mesure la réponse au milieu de chaque palier.

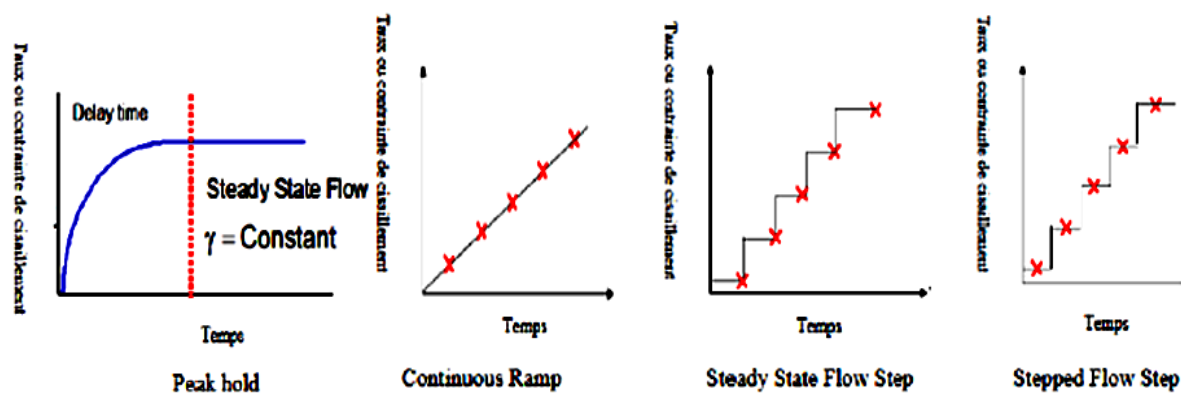


Figure 3.8 Modèle d'écoulement (TA Instruments)

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Dans ce chapitre, l'ensemble des données expérimentales obtenues est présenté. Il s'agit des résultats sur la vitesse de sédimentation déterminés à partir de la sédimentation des résidus épaissis, $C_{w-ini} = 60\%, 65\%$ et 70% suivis de l'évolution des profils de pourcentage solides, masse volumique, taille des particules, propriétés rhéologiques. Ces résultats permettront de comprendre la structuration des résidus pendant la sédimentation.

4.1 Vitesse de sédimentation

La figure 4.1a présente les courbes de sédimentation des essais réalisés pour des résidus à C_{w-ini} de $60\%, 65\%, 70\%$, sur lesquelles sont superposées des courbes qui indiquent l'évolution graduelle du pourcentage solide de ces résidus (lignes en pointillés). À partir de la forme générale des courbes de sédimentation, deux phases distinctes peuvent être identifiées. La première phase correspond à la chute rapide de l'interface entre le surnageant et le résidu, à ce niveau, la vitesse de sédimentation est élevée. Lorsque l'interface atteint une certaine hauteur, la vitesse de sédimentation diminue et marque la seconde phase par l'apparition d'un plateau quasi stable même au-delà du point critique (P_{crit}). Le point critique est un point identifié en observant l'apparition du plateau, il correspond à la hauteur maximale de chute de l'interface eau/résidus atteint au bout d'un certain temps de sédimentation. Entre la phase de chute rapide et de l'apparition du plateau, plusieurs types de sédimentation peuvent se distinguer passant d'un régime libre, à entravé et de compression (Li et al, 2024). L'analyse des différentes courbes montrent deux points critiques : P_{crit} à $t = 5h$ et $h = 25,9$ cm pour $C_{w-ini} = 60\%$ et P_{crit} à $t = 12h$; et $h = 18,2$ cm pour $C_{w-ini} = 65\%$. Pour $C_{w-ini} = 70\%$ la transition est diffuse, la courbe est asymptotique et rend complexe l'identification claire du point critique. Le $C_{w-ini} = 70\%$ est fortement structuré dès les premiers instants de l'essai, le pourcentage solide initial étant élevé, le déplacement de l'interface (surnageant/résidu) est lent. La sédimentation ne résulte plus d'un régime entravé ou libre mais plutôt d'un processus lent contrôlé par la compression. L'observation d'une quasi-stabilisation P_{crit} ($t = 24h$; $h = 18$ cm) ne doit pas être interprétée comme l'apparition d'un véritable point critique comparable à ceux identifiés à 60% et 65% . Il s'agit d'un état avancé de ralentissement, où la vitesse de déplacement de l'interface devient très faible. Pour $C_{w-ini} = 60\%$, le point critique est atteint plus rapidement ($5h$) que celui de $C_{w-ini} = 65\%$ ($12h$). La figure 4.1b présente l'évolution de C_w avec le retrait d'eau, les courbes associées à l'axe secondaire (en pointillée) montrent une augmentation du pourcentage solide vers

des valeurs C_{w-max} stables qui coïncident avec les points critiques. Les valeurs C_{w-max} sont respectivement de 68%, 72% et 78% pour $C_{w-ini} = 60\%$, 65% et 70%.

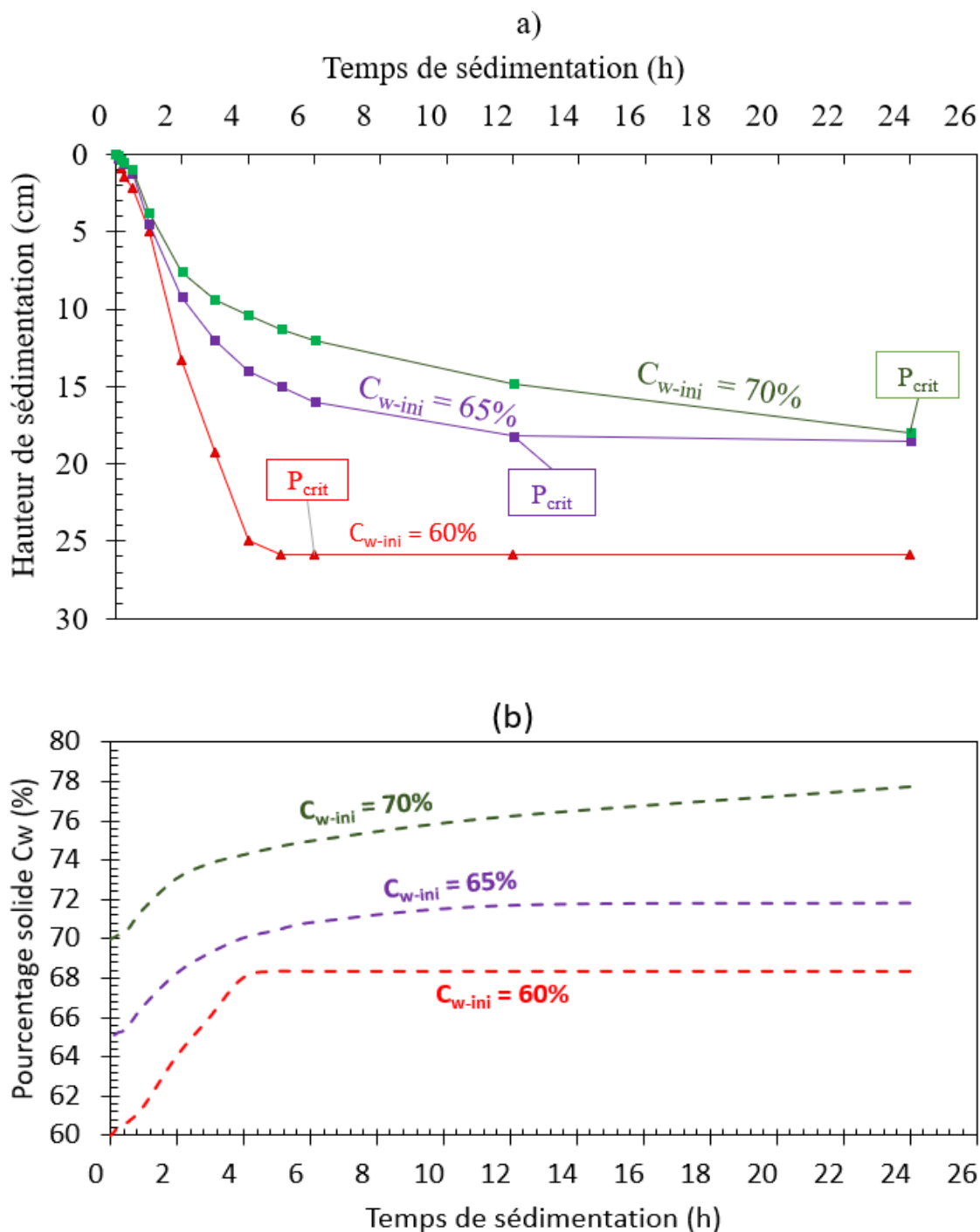


Figure 4.1 Courbe de sédimentation et évolution du pourcentage solide des résidus sans prise en compte de l'eau surnageant (a) Estimation théorique de l'évolution de C_w avec le retrait d'eau (b).

La figure 4.2 illustre l'évolution de la vitesse de sédimentation en fonction du temps de sédimentation pour des pourcentages solides initiaux $C_{w-ini} = 60\%$, 65% , 70% . L'analyse des courbes de vitesses de sédimentation montre, deux phases distinctes, une phase ascendante caractérisée par des pics de vitesses et une phase descendante caractérisée par une baisse de la vitesse de sédimentation. Dans la phase ascendante (0-2h), on observe de légères oscillations ou prépics durant la première heure des essais (0-1h). Ces prépics montrent la difficulté à lire l'interface (toujours diffuse) sans séparation de l'interface résidus/eau. Au-delà de 1h, des vitesses maximales de sédimentation ont été atteintes l'apparition des pics qui marquent les valeurs maximales de la vitesse de sédimentation. Les vitesses maximales de sédimentation mesurées étaient de 1,4 mm/min, 1,1 mm/min et 0,98 mm/min correspondant respectivement à des pourcentages solides initiaux (C_{w-ini}) de 60%, 65% et 70%.

Dans la phase descendante (2h-24h), la baisse de la vitesse de sédimentation montre que l'augmentation du pourcentage solide affecte la capacité de déplacement des particules. Pour $C_{w-ini} = 60\%$, la vitesse chute brutalement en passant par une phase de transition brusque entre 2h-6h, pour ensuite atteindre une vitesse nulle ($V_s = 0$ mm/min) au-delà de 6h. Dans le même temps, les vitesses maximales V_{s-max} , $C_{w-ini} = 65\%$ et 70% , diminuent lentement vers des vitesses minimales stables $\approx 0,125$ mm/min après 24 h de sédimentation.

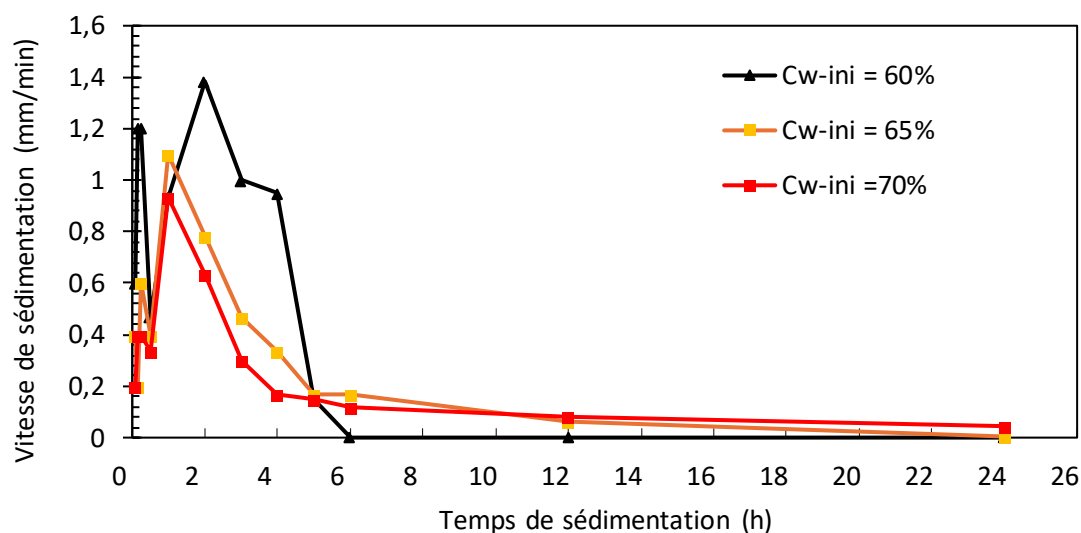


Figure 4.2 Vitesse de sédimentation

4.2 Profils verticaux du pourcentage solide massique

La figure 4.3 présente l'évolution des profils verticaux de pourcentage solide en fonction de la hauteur de la colonne pour les trois pourcentages solides initiaux des pulpes. Les résultats présentés ici se limitent aux temps de sédimentation de 15 min, 30 min, 1h, 6h et 24h dans le seul objectif de ne pas surcharger les figures. Les zones caractéristiques de sédimentations (entravée, libre et compression) sont également indiquées. La zone libre est une zone dans laquelle les particules sédimentent librement sans qu'il n'y ait de fortes interactions interparticulaires (Blazy, 1999). La zone libre représente la zone d'eau claire qui se forme au cours du temps et de l'évolution du processus de la sédimentation en colonne et se caractérise, par la remontée d'eau dans la partie supérieure de la colonne [(75 - 90 cm) localisée entre PTE 1 à 2 ou 3]. À partir des tests de sédimentation réalisés à des pourcentages solides initiaux ($C_{w-ini} = 60\%, 65\%, 70\%$), les observations ont montré un appauvrissement en particules solides associé à l'enrichissement en eau dans cette zone après 6h à 24h de sédimentation. La zone entravée, elle correspond à la zone où le pourcentage solide reste presque homogène et proche C_{w-ini} . Dans cette zone, les particules solides, entrent en interaction les unes avec les autres, sédimentent collectivement à une vitesse constante tout en conservant un pourcentage en solide proche de la concentration initiale. La zone de compression est définie comme Van Zyl (2024) pour décrire la région où le pourcentage solide augmente par rapport à celui de la pulpe initiale ($C_{w-ini} = 60\%, 65\%, 70\%$) de manière brusque avec la profondeur. Cette zone de compression se forme au fond de la colonne pour ensuite évoluer avec le temps de sédimentation suivant la hauteur de colonne.

La figure 4.3a relative aux résidus épaissis $C_{w-ini} = 60\%$ montrent une forte variation verticale de C_w . On constate la zone inférieure de compression située entre 0-20 cm de hauteur apparaissant à $t = 0$ au fond de la colonne, lorsque la valeur C_w au fond de la colonne devient supérieure à la valeur $C_{w-ini} = 60\%$ à $t = 30$ min, cette zone évolue à cause de la sédimentation en masse pour atteindre 30 cm de hauteur à $t=1h$ puis une hauteur finale de 65 cm à $t = 6h, 24h$ avec $C_{w-max} \approx 80\%$. La zone entravée est située juste au-dessus de la zone de compression entre (50-72 cm), elle présente des pourcentages solides variables (40% à 75%). Dans la zone supérieure de sédimentation libre (65-90 cm), il y avait un appauvrissement graduel en solide atteignant des pourcentages solides faibles ou négligeables à partir de 6h. La distribution verticale du solide montre une hétérogénéité dominée par un régime de sédimentation passant de libre à entravée favorable à une

forte ségrégation de solide ainsi qu'une séparation granulométrique (visible entre les échantillons collectés aux PTE1 et PTE7).

La courbe de la figure 4.3b relative aux résidus épaissis $C_{w-ini} = 65\%$ montrent que les profils de concentration solide évoluent progressivement avec une réduction visible des gradients verticaux de concentration solide. La pulpe passe plus vite dans la zone de compression comprise entre la hauteur de 0 à 60 cm à $t = 1$ h pour atteindre une hauteur de compression maximale de 70 cm à $t = 6$ h, 24 h avec $C_{w-max} \approx 80\%$.

En regardant la figure 4.3c relative à la pulpe à $C_{w-ini} = 70\%$, on constate que les profils se superposent verticalement sur la hauteur de la colonne, cela montre une uniformité de C_w sur toute la hauteur de la colonne de sédimentation à partir d'environ 70 cm. Le pourcentage solide demeure invariable dans la zone de compression, C_w atteint une valeur maximale stable et homogène sur la hauteur de la colonne avec $C_{w-max} \approx 80\%$. L'impact de la ségrégation se retrouve réduit au fur et à mesure que le pourcentage solide de la pulpe initiale augmente. Pour des résidus épaissis avec $C_{w-ini} = 70\%$, l'interaction entre les particules se trouve dominée par la compression au niveau des hauteurs comprises entre 0 et 72 cm, ce qui empêche la migration des particules.

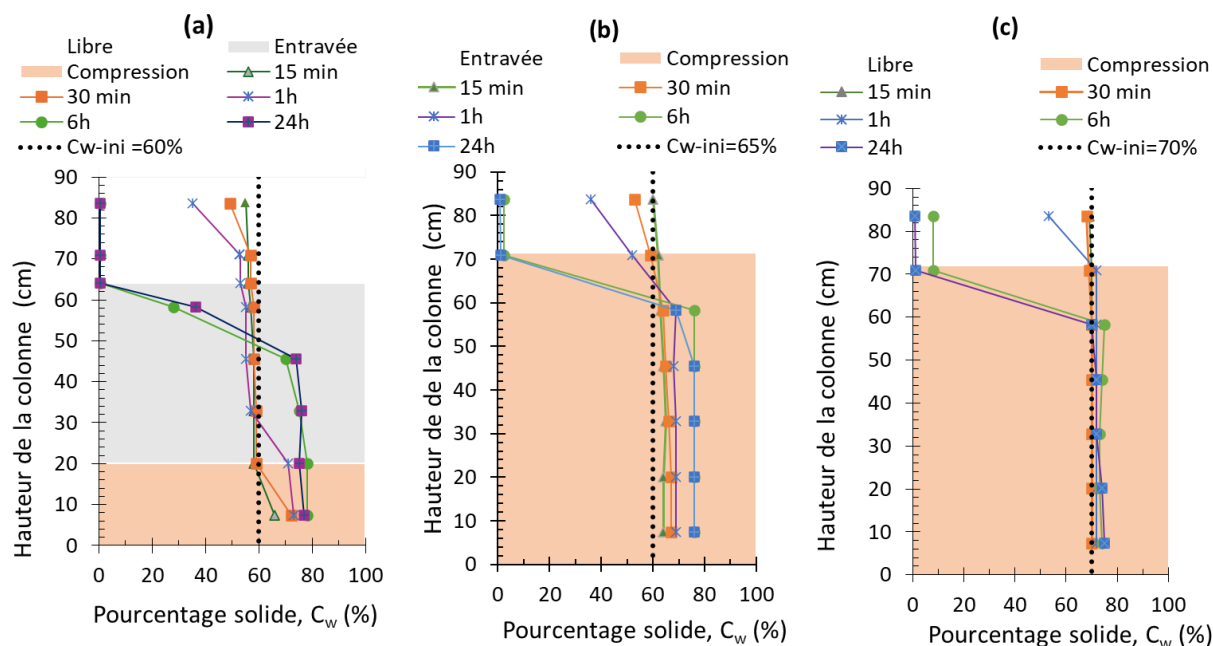


Figure 4.3 Profils de pourcentage solides des résidus le long de la hauteur de la colonne après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 6h et 24h pour des pourcentages solides de : a) $C_{w-ini} = 60\%$, b) $C_{w-ini} = 65\%$ et c) $C_{w-ini} = 70\%$.

4.3 Profils verticaux de la masse volumique

Les masses volumiques initiales des pulpes ($\rho_{p\text{-ini}}$) à des pourcentages solides de 60%, 65% et 70% sont respectivement de : 1,65; 1,77 et 1,80 g/cm³. La figure 4.4 montre l'évolution des profils verticaux de la masse volumique de la pulpe (ρ_p) le long de la hauteur de la colonne pour les trois pourcentages solides étudiés.

Pour les résidus avec un pourcentage solide $C_{w\text{-ini}}$ de 60% (figure 4.4a), une zone diluée riche en eau surnageant entre 65-90 cm dont la masse volumique est faible et comprise entre 1 et 1,3 g/cm³. Cette zone diluée est identifiée à partir du moment où la position de l'interface entre le fluide et le résidu marque le front de clarification c'est-à-dire la stabilisation de la sédimentation. Entre 65-40 cm, les profils deviennent inclinés et plus étalés, c'est-à-dire que le gradient vertical est visible, ce qui montre une sédimentation active avec des valeurs ρ_p compris entre 1,65 et 1,85 g/cm³ où a lieu une redistribution progressivement sous l'effet de la gravité des particules solides et la remontée d'eau. En dessous de 50 cm, les profils se rapprochent avec l'augmentation de la concentration en solide, la pulpe s'appauvrit en eau et devient plus pâteuse et la masse volumique atteint une valeur de 1,96g/cm³. Une réorganisation de la structure interne de la pulpe se produit, par exemple à 15-30 min, l'état d'équilibre se rompt progressivement sans affectée considérablement les valeurs de ρ_p . On constate à la base de la colonne, les valeurs croissent et vont au-delà de $\rho_{p\text{-ini}}$. Cela montre une ségrégation progressive dans le temps, car la zone supérieure se dilue avec la montée d'eau tandis que la zone inférieure se compacte.

Pour $C_{w\text{-ini}} = 65 \%$ (figure 4.4b), les variations des profils de distribution verticale de la masse volumique sont moins marquées que pour $C_{w\text{-ini}} = 60\%$. On observe une zone diluée dans la partie supérieure de 72 à 90 cm associée à la remontée progressive de l'eau. Toutefois, cette zone est plus limitée, lorsque la sédimentation atteint la zone critique, la limite de la zone diluée est définie par la position de l'interface entre le fluide et le résidu, c'est-à-dire la hauteur pour laquelle C_w est très faible ou encore lorsque l'interface évolue de manière à marquer le front de clarification déterminée soit à partir des courbes de sédimentation, soit à partir des profils C_w . La partie intermédiaire, comprise entre 40 et 70 cm, montre également un gradient vertical de la masse volumique, signe d'une sédimentation encore active. La zone en dessous de 72 cm montre que les profils verticaux qui ne changent pas avec la profondeur pour un temps de sédimentation donné. Plus le temps de sédimentation augmente, plus la masse volumique augmente et atteint une valeur maximale au fond

de la colonne $\rho_p = 1,96 \text{ g/cm}^3$ après 24h. Cette augmentation montre qu'il y a une forte concentration solide et une structuration continue du dépôt dans le temps. La ségrégation est moins marquée que celle de 60%.

Pour $C_{w\text{-ini}} = 70\%$ (figures 4.4.c), la zone libre située entre 70 et 90 cm dans la partie supérieure de la colonne était moins développer comparée à celle de 60% et 65%. En dessous, entre 0 et 70 cm les profils verticaux de ρ_p sont restés plus resserrés autour de la masse volumique de la pulpe initiale $\rho_p = 1,89 \text{ g/cm}^3$ sur toute la hauteur de la colonne. Les écarts par rapport à la valeur moyenne sont faibles, ce qui indique que la séparation des particules et de l'eau a été limitée par la forte concentration solide. La sédimentation est en compression et l'interaction entre les particules réduit la mobilité des phases et limite la ségrégation verticale.

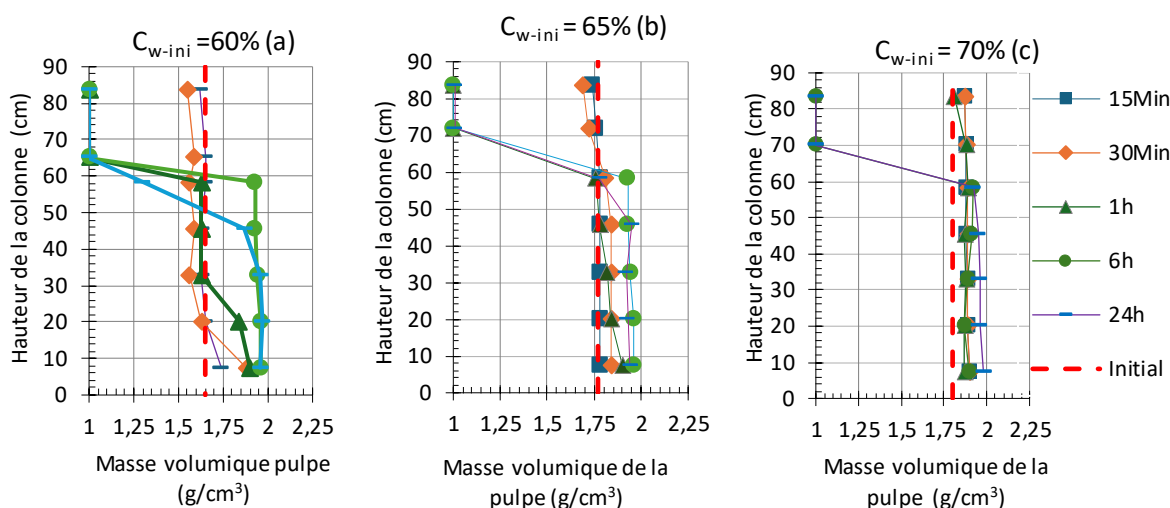


Figure 4.4 Profils des masses volumiques des pulpes échantillonnées le long de la hauteur de la colonne après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 6h, et 24h pour des teneurs en eau initiale de : a) $C_{w\text{-ini}} = 60\%$, b) $C_{w\text{-ini}} = 65\%$ et c) $C_{w\text{-ini}} = 70\%$

Jeeravipoolvarn et al., (2010) a montré que la ségrégation modifie la densité et la structure interne des résidus épaissis, influençant la consolidation à long terme. La distribution de ρ_p le long de la colonne constitue un indicateur direct de la redistribution solide/liquide et du degré de structuration interne du dépôt. Les zones diluées présentent des masses volumiques faibles (≈ 1 à $1,3 \text{ g/cm}^3$) par rapport à l'initiale, tandis que les zones compactes atteignent des valeurs élevées ($\approx 1,90$ à $1,96 \text{ g/cm}^3$) par rapport à l'initiale, témoignant d'une structuration interne avancée.

4.4 Profils verticaux de la taille des particules

Après avoir analysé l'influence de la masse volumique et du pourcentage solide sur la ségrégation verticale, il devient important de s'intéresser aux particules solides elles-mêmes. La masse volumique donne des indices sur la concentration globale. Cependant, elle ne permet pas de savoir quelles tailles de particules sont impliquées dans la ségrégation. L'étude granulométrique le long de la colonne de sédimentation permettrait de mieux identifier la fraction granulométrique affectée par la ségrégation.

Les distributions granulométriques (PSD) des échantillons prélevés à partir des PTE sont présentés à la figure 4.5 pour les trois pourcentages solides C_{w-ini} de 60%, 65% et 70% pour des temps de sédimentation de 0 min (initial) 15 min, 30 min, 1h, 6h et 24h et à différentes profondeurs le long de chaque colonne. Les résultats obtenus pour $C_{w-ini} = 60\%$ montrent des courbes PSD presque confondues sur toutes les profondeurs après des temps de sédimentation allant jusqu'à 30 min (figures 4.5a,b), mais qui s'écartent progressivement pour marquer une ségrégation granulométrique importante et progressive au fil du temps à partir de 1h (figures 4.5c-e). La répartition granulométrique est sélective et se matérialise par un tripartculaire caractérisant la ségrégation. La ségrégation est continue et visible à 6h, 24h, les courbes PTE1-3 montent par rapport à la courbe initiale contrairement aux courbes PTE4-7. La ségrégation granulométrique est donc permanente pour un essai à $C_{w-ini}=60\%$.

Les résultats obtenus pour $C_{w-ini} = 65\%$ montrent des courbes PSD presque identiques à celle des PSD à $C_{w-ini} = 60\%$, sans écart considérable entre 15 min jusqu'à 30 min de sédimentation. Entre 1h et 6h, une ségrégation apparaît mais l'écart entre les courbes demeure faible (figures 4.5 f-h) et parfois brusque (figure 4.5i) surtout à 6h. À 24h les courbes s'uniformisent, seule PTE1 s'écarte à cause de la dilution progressive constatée à PTE1 (Figure 4.5j). Cela montre une ségrégation modérée induite par l'augmentation du pourcentage solide initial qui tend à disparaître au bout de 24h.

Dans le cas d'une pulpe avec $C_{w-ini} = 70\%$, les courbes PSD sont très proches et toutes identiques, cela montre qu'il n'y a aucune ségrégation visible, la concentration en solide augmente et les particules en présence entrent en fortes interactions mutuelles. L'uniformité des courbes traduit l'absence de ségrégation notable (voir figures 4.5k, l, m, n, o). Toutes les courbes sont confondues à la courbe initiale excluant celle de la zone diluée (PTE1), enrichie en eau avec de très faibles

proportions de solides. De tout ce qui précède, il a été constaté une homogénéité de la distribution granulométrique dès les premiers instants de la sédimentation, les courbes qui passent au-dessus de la courbe initiale sont associées à la zone diluée dominée par les fines, contrairement aux courbes qui se situent en-dessous dominées par particules de plus grandes tailles. Ainsi, pour les résidus épaissis $C_{w-ini} = 60\%$ les particules se déplacent librement contrairement aux résidus épaissis $C_{w-ini} = 70\%$ qui tendent à limiter cette migration et empêcher la ségrégation à long terme (l'Annexe B présente les courbes de distribution granulométrique de tous les échantillons de résidus collectés à chaque temps pour pourcentage solide C_{w-ini}).

Bien que les courbes PSD présentées à la figure 4.5 donnent une vue générale de la redistribution des particules, elles ne permettent pas de mesurer l'ampleur de la ségrégation. La figure 4.6 montre l'évolution verticale des diamètres caractéristiques D_{50} , D_{60} et D_{90} des résidus ayant des pourcentages solides initiaux, $C_{w-ini} = 60\%$, 65% et 70% . L'évolution des diamètres des particules est comparée aux tailles initiales (D_{50} , D_{60} , D_{90}) mesurées dans la pulpe initiale (ligne en pointillé). Un seuil granulométrique (ligne noire) est également établi pour distinguer les zones enrichies en particules fines ($< 44\mu m$) et grossières ($> 44\mu m$).

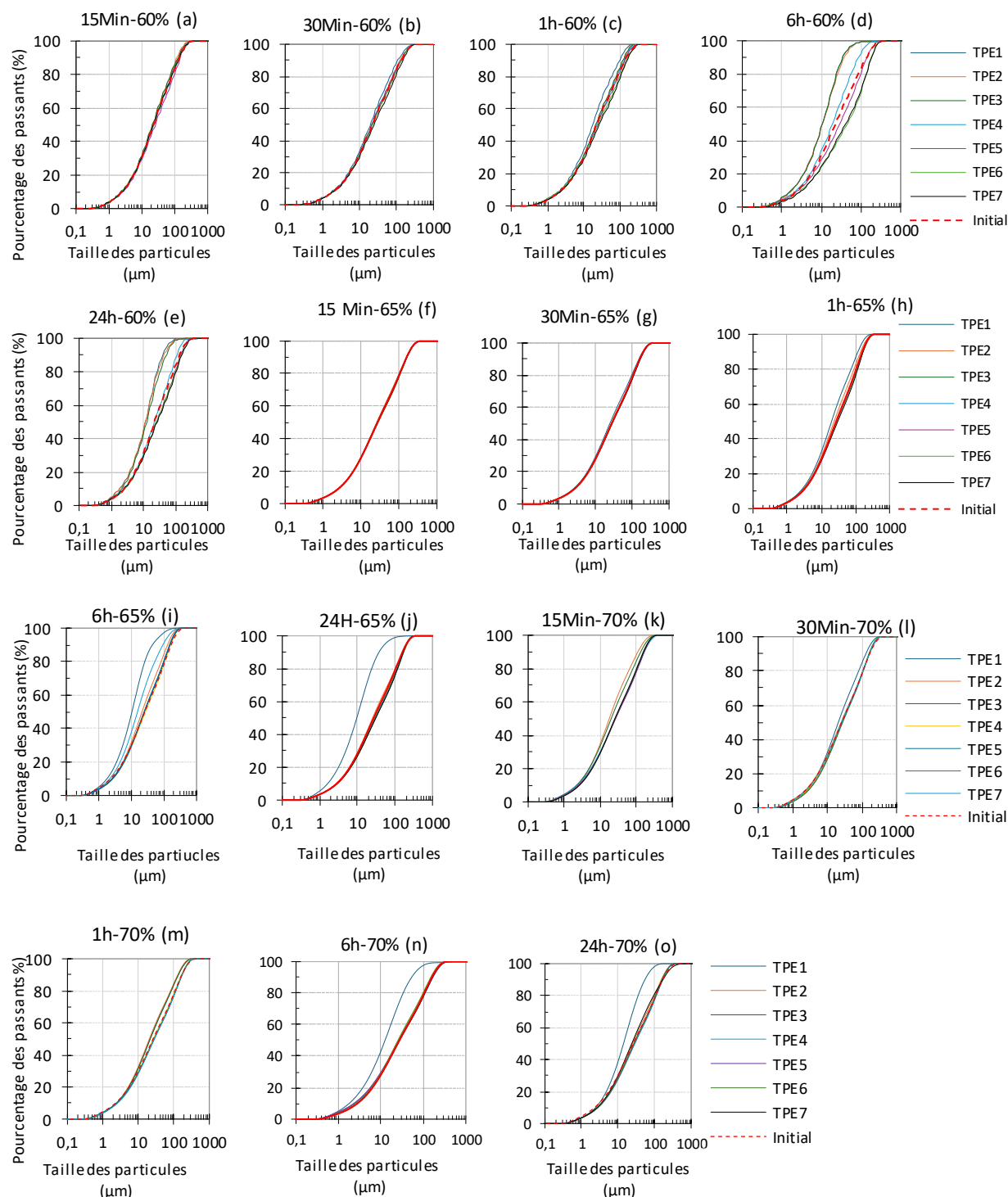


Figure 4.5 Distributions de la taille des particules échantillonnées le long de la hauteur de la colonne après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 6h et 24h pour des pourcentages solides initiaux de : $C_{w-ini} = 60\%$ (a, b, c, d, e,) ; $C_{w-ini} = 65\%$ (f, g, h, i, j) et $C_{w-ini} = 70\%$ (k, l, m, n, o).

Pour $C_{w-ini} = 60\%$ (figures 4.6a,b,c) les profils de D_{50} , D_{60} et D_{90} restent proches de l'état initial à 15 min et 30 min, 1h montrant un écart important de la distribution des particules, cette hétérogénéité de la distribution granulométrique montre l'évolution de la ségrégation produite dans le temps. À partir de 2h à 24h, cet écart devient très important. Dans la partie supérieure (50-90cm), D_{50} et D_{60} se déplacent vers des valeurs plus faibles ou supérieures à $44\text{ }\mu\text{m}$. Dans la partie inférieure de la colonne (0-30 cm), les valeurs D_{50} , D_{60} et surtout D_{90} augmentent au-dessus de $44\text{ }\mu\text{m}$ (figure 4.6c). Le fait que D_{90} soit le paramètre le plus affecté montre que la ségrégation est contrôlée par des fractions grossières. La mobilité différentielle des particules domine et favorise le tri granulométrique. Pour $C_{w-ini} = 65\%$, les profils montrent les mêmes tendances, mais avec une mobilité réduite. Les écarts entre les profils et la distribution initiale sont encore visibles et les variations D_{50} , D_{60} et D_{90} (figures 4.6d,e,f) par rapport à l'état initial sont modérées. La séparation entre les fractions fines et grossières demeure observable à travers le seuil de $44\text{ }\mu\text{m}$ sans qu'il y ait une très grande mobilité des particules, le tri granulométrique devient limité. Pour $C_{w-ini} = 70\%$ sur les profils de D_{50} , D_{60} et D_{90} restent confondus et proches de la distribution initiale (figure 4.6g,h,i). Les écarts deviennent très faibles sur toute la hauteur de la colonne, le seuil de $44\text{ }\mu\text{m}$ montre également la tendance des particules de plus gros diamètres à se retrouver à la base de la colonne. L'analyse de la figure 4.6 montre que l'intensité de la ségrégation granulométrique diminue quand le pourcentage solide initiale augmente, les interactions entre les particules limitent la séparation suivant la taille des particules. Cette tendance apparaît avec l'évolution de D_{90} dont la variation est forte, moyenne et inexistante respectivement pour $C_{w-ini} = 60\%, 65\%, 70\%$. Parmi les trois paramètres analysés (D_{50} , D_{60} and D_{90}); D_{90} apparaît être plus sensible à cette évolution, ce qui montre que la ségrégation est contrôlée par le comportement des fractions grossières.

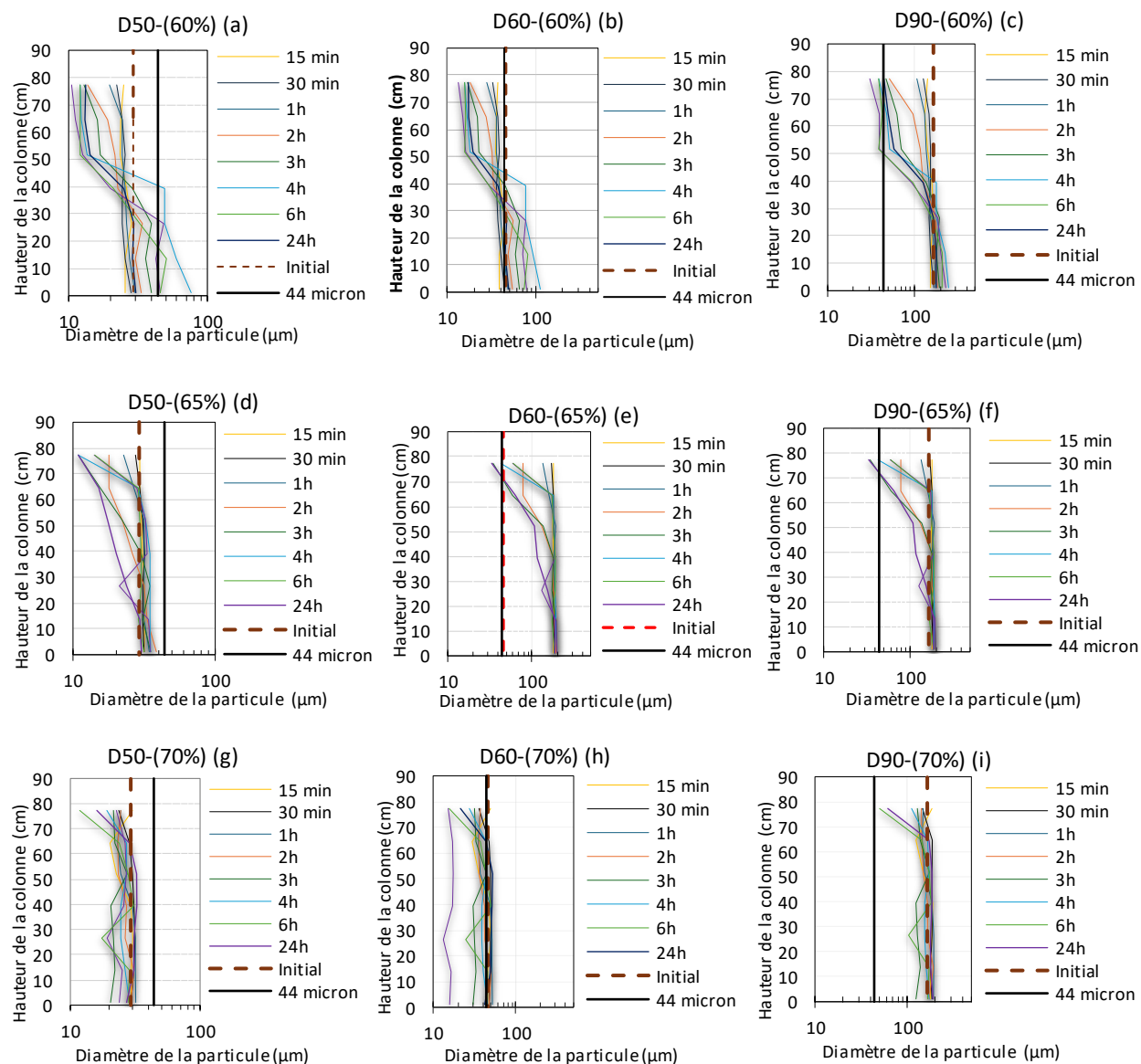


Figure 4.6 Évolutions des profils verticaux des diamètres D_{50} , D_{60} et D_{90} après des temps de sédimentation de : 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests réalisés avec des résidus contenant des pourcentages solides initiaux de : $C_{w\text{-ini}} = 60\%$ (a - c), 65% (d - f) et 70% (g - j).

4.5 Profils verticaux des propriétés rhéologiques

Les détails des résultats des analyses rhéologiques sont présentés en annexe C. La figure 4.7 présente les rhéogrammes et les courbes de viscosités dynamiques typiques des échantillons de résidus collectés aux sept profondeurs le long de la colonne pour une pulpe avec $C_{w\text{-ini}} = 65\%$ et

pour un temps de sédimentation de 6h. On observe que la contrainte de cisaillement et la viscosité mesurées augmentent quand on passe de PTE1 (proche de la surface) à PTE7 (proche du fond de la colonne) pour un taux de cisaillement donné. De plus, au fur et à mesure que le taux de cisaillement augmente, la contrainte de cisaillement augmente et la viscosité diminue pour un port d'échantillonnage donné. Ces tendances ont été observées pour les trois pourcentages solides initiaux C_{w-ini} et pour les autres temps de sédimentation. L'ajustement de ces courbes avec les modèles rhéologiques de Herschel-Bulkley (éq. 2.10) et de Cross (éq. 2.18) a permis de déterminer les propriétés rhéologiques des échantillons de résidus.

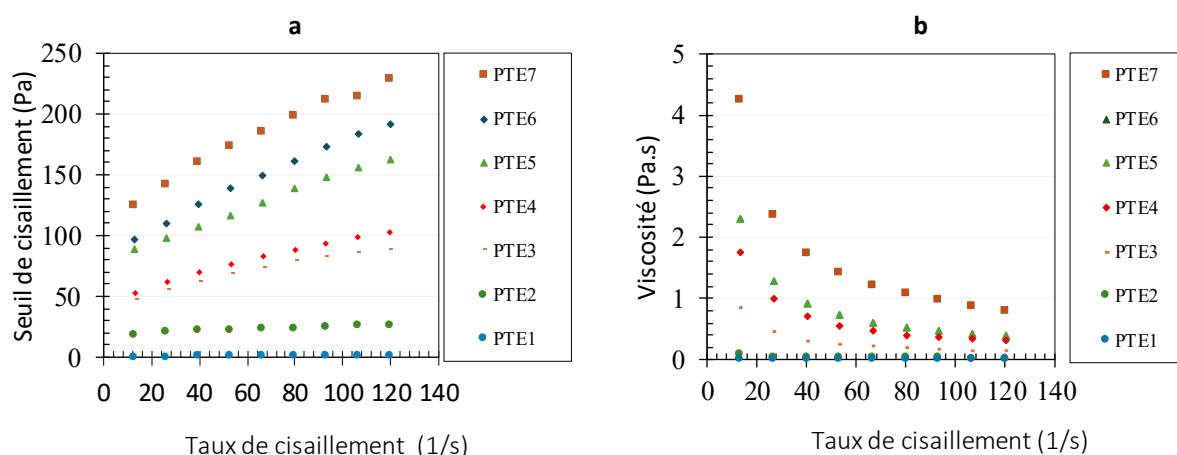


Figure 4.7 Rhéogramme typique (a) et courbe de viscosité (b) des échantillons prélevés à différentes profondeurs pour une pulpe avec $C_{w-ini} = 65\%$ après un temps de sédimentation de 6h.

Les valeurs initiales de τ_{0-HB} , K , n , η_{∞} et η_0 mesurées sur les pulpes testées sont présentées dans le tableau 4.1. Ces différentes valeurs initiales permettent d'établir une comparaison de la variation des paramètres rhéologique le long de la colonne et pour les différents temps de sédimentation, en réponse aux changements de C_w engendrés par la sédimentation.

Tableau 4.1 Paramètres rhéologiques initiaux mesurés

C_{w-ini} (%)	$\tau_{0-HB-ini}$ (Pa)	K_{ini} (Pa.s ⁿ)	n_{ini}	η_{0-ini} (Pa.s)	$\eta_{\infty-ini}$ (Pa.s)
60	4	0,001	0,90	1,094	0,020
65	7	0,025	0,91	$1,51 \times 10^5$	0,016
70	10	0,085	1,42	$5,75 \times 10^5$	0,011

Les figures 4.8, 4.9, et 4.10 présentent respectivement l'évolution temporelle des profils verticaux de la contrainte seuil (τ_{0-HB}), de l'indice d'écoulement (n) obtenu à partir du modèle de Herschel-Bulkley ainsi que la viscosité à taux cisaillement nul (η_0) et de la viscosité à cisaillement infini (η_∞) obtenu du modèle de Cross pour les résidus contenant 60%, 65% et 70% de solides et pour des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h. Il convient de mentionner que les axes de seuils de cisaillement τ_{0-HB} et de viscosités η_0 et η_∞ (figures 4.8, 4.9 et 4.10) sont présentés avec une échelle semi-logarithmique pour mieux visualiser les variations observées.

Les profils verticaux de l'indice de consistance (K) de Herschel-Bulkley ne sont pas présentés car ce paramètre n'est comparable que pour des fluides ayant le même indice d'écoulement n (Björn et al., 2012). La viscosité η_∞ est généralement utilisée pour expliquer le comportement des résidus sous forts taux de cisaillement et cette viscosité est un paramètre principal pour le contrôle des caractéristiques d'écoulements des matériaux lors du transport en pipeline (Pullum, 2007). L'utilisation de la viscosité η_∞ pour concevoir le transport de suspensions solides dans un pipeline, par exemple, est justifiée par les taux de cisaillement élevés sur la paroi du pipeline pendant le transport (Pullum 2007). Ainsi, dans les conditions de sédimentation statiques, la viscosité à cisaillement nul (η_0) pourrait être mieux appropriée en raison de faibles taux de cisaillement induits pas la sédimentation.

La figure 4.8 montre les profils verticaux des propriétés rhéologiques sélectionnées pour $C_{w-ini} = 60\%$. Les profils rhéologiques ($t = 15$ min, 30 min, 1h et 2h) montrent des valeurs faibles et homogènes du seuil de cisaillement τ_{0-HB} à partir de 50-90 cm de profondeur (figure 4.8a). La suspension reste encore homogène et proche de l'état initial. À ($t = 3$ h, 6h), on remarque entre 30-50 cm de profondeur, les valeurs tendent à s'éloigner de τ_{0-HB} initial avec une valeur maximale de 42,24 Pa. L'écart entre les contraintes seuils du bas (1,1 cm) où $\tau_{0-HB} = 73,69$ Pa, et du haut (77,3 cm) de la colonne devient important. Les valeurs de n (figure 4.8b), montrent que les résidus s'organisent et se structurent progressivement avec le temps, ce comportement est très favorable à la ségrégation, car la majorité des valeurs n sont inférieures à 1. Le matériau est rhéologiquement hétérogène et pseudoplastique. Certaines zones se comportent presque comme des fluides newtoniens, ce qui concorde avec la remontée d'eau observée dans les colonnes. La figure 4.8c montre qu'il y a un resserrement des valeurs correspondant physiquement à la réduction de la

mobilité des particules. En plus η_0 montre une dispersion importante en fonction de la profondeur. Les valeurs sont plus élevées dans la zone inférieure. Cette distribution montre une structuration hétérogène due à l'accumulation des particules à la base de la colonne. Les particules se rapprochent de manière que les contacts et les frottements entre elles deviennent suffisants, une conséquence directe de ce comportement est l'augmentation de η_0 (figure 4.8c). En comparant la valeur de la viscosité initiale ($\eta_\infty = 0,01992$), on constate que η_∞ à la base de la colonne est environ 100 à 300 fois plus élevée. Ce constat montre que les résidus passent d'un état fluide à un état plus dense et plus résistant à l'écoulement. Les profils indiquent une sédimentation entravée caractérisée par une forte augmentation de η_0 dans les couches inférieures de la colonne. La figure 4.8d montre également pour les mêmes hauteurs une hausse de la viscosité avec la profondeur de la colonne pour atteindre une valeur de 1,083 Pa, pour des échantillons prélevés après 24h au fond de la colonne de sédimentation. De façon générale, la colonne développe une ségrégation verticale, enrichie en solides, caractérisée par une augmentation simultanée de τ_{HB} et η_0 dans la région zone inférieure (plus rigide), signe d'un développement plus accru en pourcentage solide. À l'inverse, la zone supérieure est appauvrie en solides. La ségrégation est nette, et s'accompagne d'une stratification rhéologique marquée le long de la colonne. La figure 4.8d montre l'évolution de la viscosité infinie η_∞ le long de la colonne pour une suspension de 60% solide. La valeur initiale, tracée en pointillée en rouge, est de 0,02 à 0,03 Pa.s. Cette viscosité montre une suspension peu concentrée et très fluide à $t=0$. Entre 50-90 cm (zone supérieure de la colonne), η_∞ varie beaucoup, on trouve des valeurs de 0,03 Pa.s proche de la valeur initiale jusqu'à 1-2 Pa.s évoluant progressivement selon la durée de la mesure. La viscosité dans cette zone reste proche et supérieure à la valeur initiale. Les particules conservent une mobilité élevée avec des valeurs comprises entre 3 et 10 Pa.s. L'augmentation de ces valeurs de η_∞ reflète la compression du milieu sous l'effet de la sédimentation.

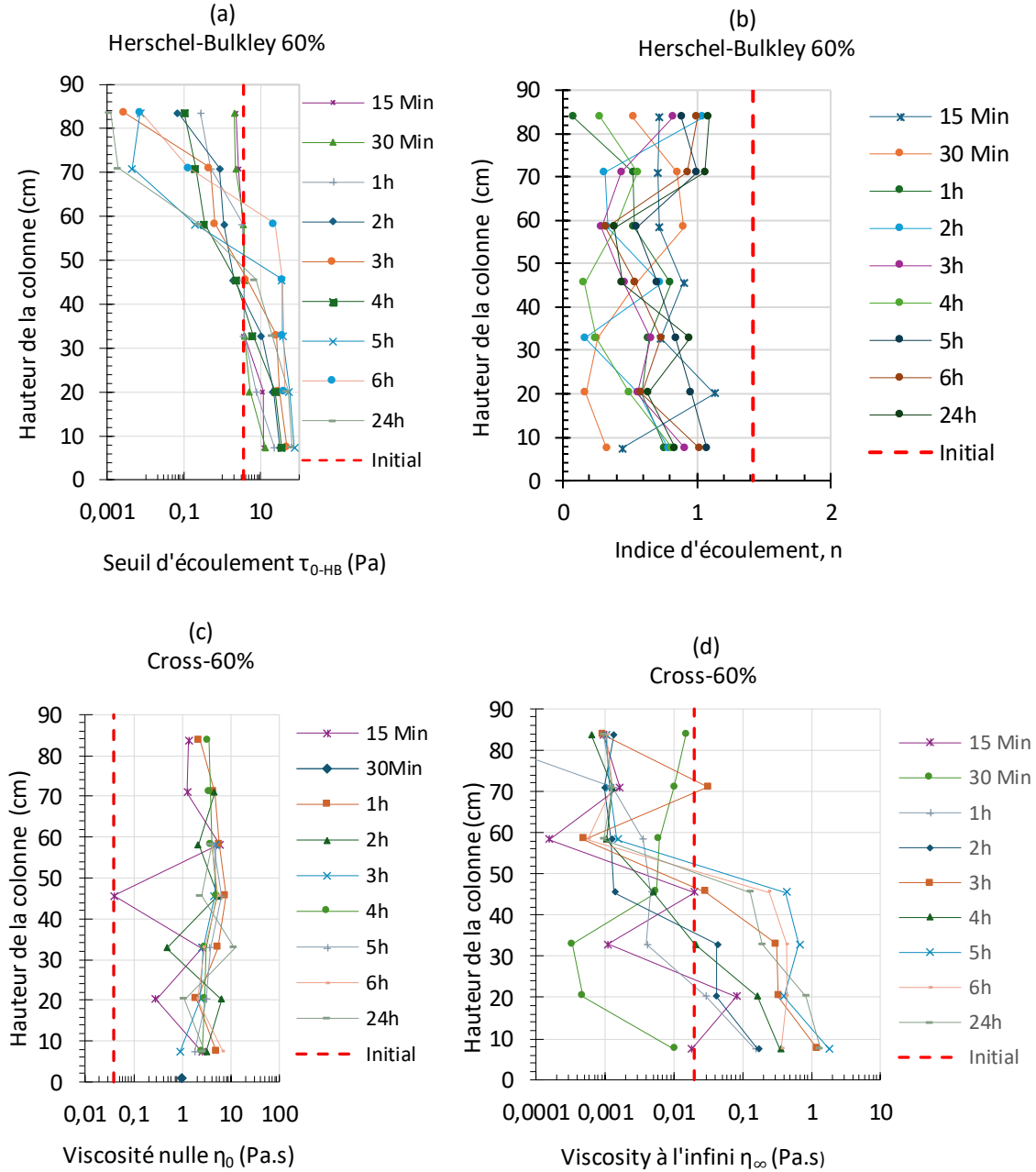


Figure 4.8 Évolutions des profils verticaux des propriétés rhéologiques après des temps de sédimentation de : 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests réalisés avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de 60%: (a) seuil de cisaillement τ_{0-HB} , (b) indice d'écoulement n , (c) Viscosité nulle η_0 et (d) Viscosité à l'infini η_∞ .

La figure 4.9 montre les profils verticaux des propriétés rhéologiques sélectionnées pour $C_{w-ini} = 65\%$. Les profils rhéologiques montrent des valeurs de τ_{0-HB} globalement plus élevée que celles

obtenues pour $C_{w\text{-ini}} = 60\%$ (figure 4.9a). Dès les premiers instants (15 min, 30 min, 1h), l'analyse de nos échantillons prélevés a montré des contraintes seuil faibles et inférieures à la valeur initiale de référence (7,316 Pa), ce qui reflète une zone supérieure diluée (comprise entre 60 et 90 cm), peu enrichie en solide. Pour une hauteur comprise entre 30 à 60 cm, l'évolution est nettement visible : les courbes se déplacent progressivement vers la droite, on observe une augmentation marquée de $\tau_{0\text{-HB}}$ qui passe de 7,316 Pa à 85,4 Pa après 24h. Dans la zone inférieure comprise entre 0 et 30 cm, $\tau_{0\text{-HB}}$ augmente davantage avec la profondeur. La contrainte seuil atteint $\approx 10,15$ Pa à 30 cm, puis croît fortement jusqu'à 134,5 Pa à 1,1 cm, cela montre qu'il y a une consolidation importante des résidus favorisés par l'accumulation des particules au fond de la colonne. Les valeurs de l'indice d'écoulement n (figure 4.9b) montrent le rapprochement des valeurs de n , caractérisées par une transition vers un comportement pseudoplastique modéré. Cela augmente les interactions interparticulaires forte mais modérée, car la majorité des valeurs n se rapprochent de 1 avec une diminution de la dispersion.

Dans la figure 4.9c, la viscosité au taux de cisaillement nul η_0 se resserre davantage avec la profondeur de la colonne. Dans la zone supérieure (60-90 cm), les valeurs restent très dispersées : η_0 varie de $3,2 \times 10^{-5}$ Pa.s à $3,2 \times 10^{-3}$ Pa.s, correspondant à un milieu encore peu compacté et très hétérogène. Dans la partie basse de la colonne (0 à 30 cm), la dispersion disparaît complètement, les valeurs se concentrent dans une bande étroite située entre 1 Pa.s et 10 Pa.s. L'augmentation de η_0 est visible et les valeurs passent de 10^{-4} Pa.s à 1×10^{-2} Pa.s, multipliant la valeur par 100. Cette augmentation montre que la viscosité est 20 à 50 fois plus élevée en bas qu'en haut de la colonne. Le résidu résiste beaucoup plus à l'écoulement. L'augmentation de η_0 dans les parties inférieures reste perceptible, mais l'écart avec la partie supérieure se réduit et la mobilité des particules diminue progressivement parce que les interactions interparticulaires limitent la séparation, c'est le signe d'une sédimentation entravée. Les profils de viscosité η_∞ (fig 4.9d) suivent la même tendance que η_0 , avec une stratification croissante du réseau particulaire, pour atteindre une viscosité maximale de 1,051 Pa.s après 24h. La présence de valeurs significatives de $\tau_{0\text{-B}}$ et de η_∞ , même dans la zone supérieure, montre que la ségrégation conduit à une hétérogénéité modérée à ce pourcentage solide de 65%.

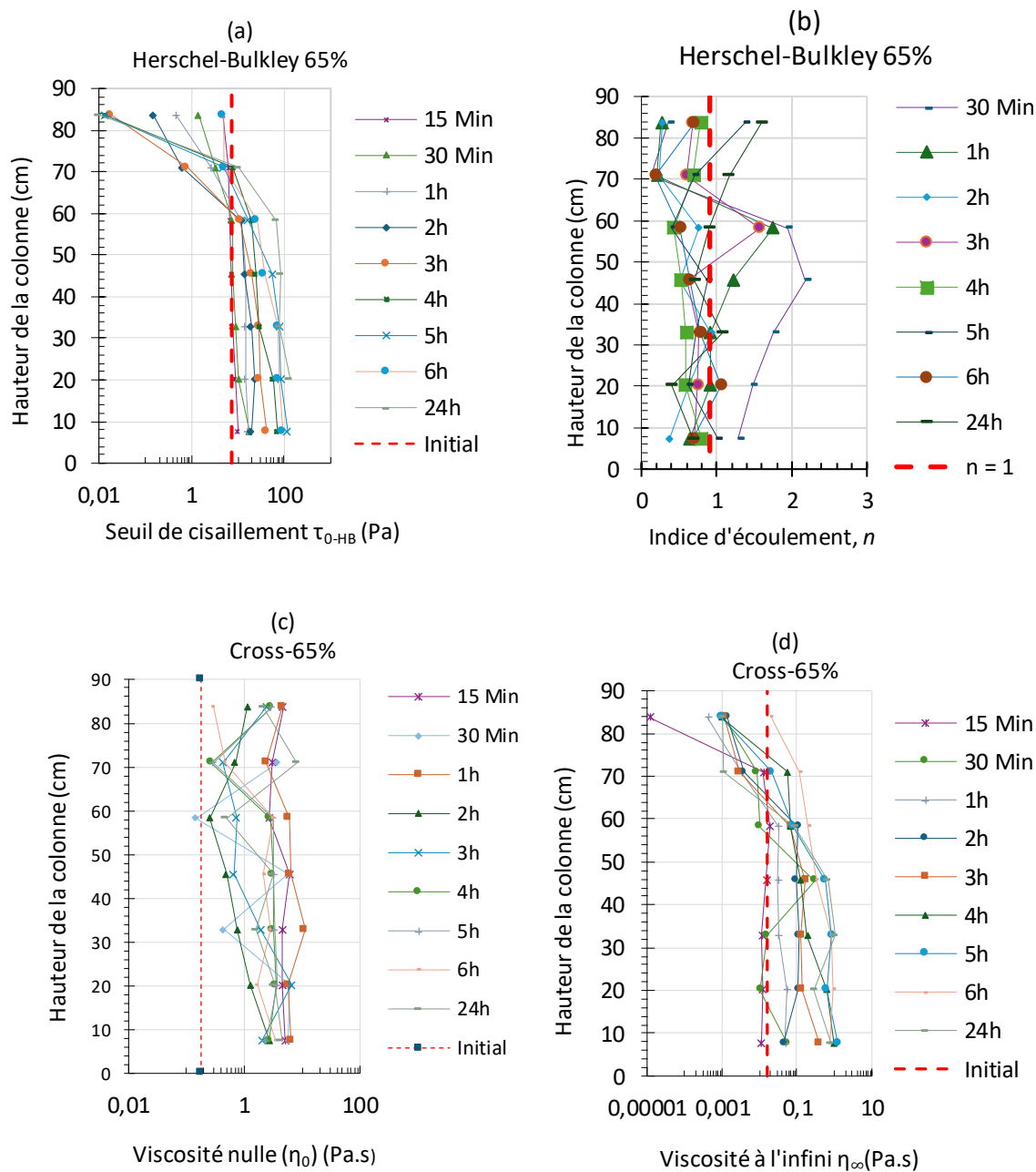


Figure 4.9 Évolutions des profils verticaux des propriétés rhéologiques après des temps de sédimentation de : 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests de sédimentation réalisés avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de 65%: seuil de cisaillement τ_{0-HB} (a), indice d'écoulement n (b), viscosité nulle η_0 (c) et viscosité à l'infini η_∞ (d).

La figure 4.10 montre les profils verticaux des propriétés rhéologiques sélectionnées pour $C_{w-ini} = 70\%$. Les profils montrent des valeurs élevées de τ_{0-HB} et η_∞ dès les premiers moments (15 min, 30

min, 1h et 2h) (figure 4.10a, d). Les profils montrent une évolution temporelle limitée contrairement aux résidus à $C_w = 60\%$ et 65% . La colonne ne présente plus de séparation nette, zone clarifiée et zone consolidée. Ainsi le résidu atteint un état proche d'une pâte concentrée, caractérisée par une structure capable de supporter une partie des contraintes gravitaires. La sédimentation est fortement inhibée et l'évolution correspond davantage à un réaménagement interne lent qu'à une véritable migration des particules. Notons que l'absence d'un gradient marqué ne signifie pas une homogénéité parfaite, mais une limitation des contrastes rhéologique identifiable à l'échelle des prélèvements.

La figure 4.10b montre que la plupart des valeurs de n inférieures ou proches de 1, et les valeurs de n varient peu. Ce comportement pseudo-plastique montre que le réseau particulaire est bien structuré. Le résidu se comporte de façon cohésive, la ségrégation est limitée verticalement, L'absence de variation importante avec la hauteur montre l'homogénéité du système.

Dans la figure 4.10c, la viscosité à taux de cisaillement nul (η_0) varie fortement dans la partie supérieure de la colonne, entre 60-90cm; les valeurs de la viscosité montrent une grande dispersion. Les valeurs de la viscosité s'étendent d'environ 0,2 Pa.s à 30-40 Pa.s, soit un écart de plus de 02 ordres de grandeur. Cette dispersion montre que le milieu reste peu compact. Le pourcentage solide locale varie fortement et les particules gardent une mobilité élevée. En descendant le long de la colonne, la dispersion diminue. Entre 0-30 cm, la plupart des valeurs se regroupent dans une plage plus étroite entre (3 à 10 Pa.s). L'écart entre le haut et le bas se réduit à un facteur d'environ 200 à 3. Cette diminution s'accompagne d'une hausse de η_0 dans les zones inférieures. Cette hausse de viscosité indique que le milieu se compacte localement, c'est-à-dire quand le pourcentage solide augmente, les interactions interparticulaires se renforcent, et limitent la capacité des particules de résidus à se déplacer et à se séparer. La mobilité individuelle et le mouvement deviennent collectifs et lents.

Les profils de η_∞ (figure 4.10d) sont homogènes sur toute la hauteur de la colonne et peu sensible au temps. L'homogénéité montre que le réseau structuré résiste aux contraintes gravitaires c'est ce qui empêche la migration différentielle des résidus. Les résidus se comportent comme une pâte cohésive non ségrégant.

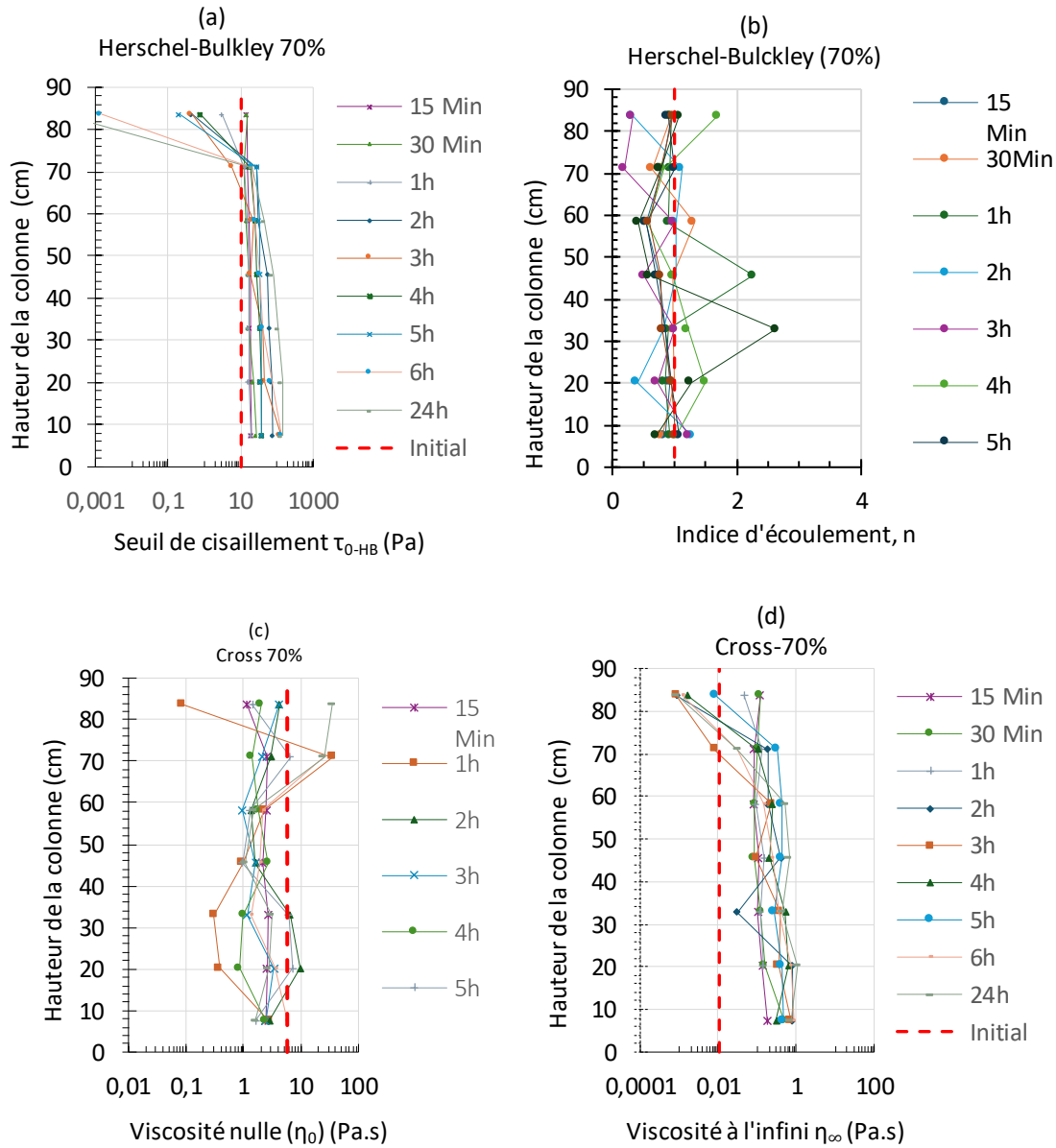


Figure 4.10 Évolutions des profils verticaux des propriétés rhéologiques après des temps de sédimentation de 0 min (initial), 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h et 24h pour des tests de sédimentation réalisés avec un pourcentage solide initial C_{w-ini} de 70%: (a) Seuil de cisaillement τ_{0-HB} , (b) indice d'écoulement n , (c) Viscosité nulle η_0 et (d) viscosité à l'infini η_∞ .

CHAPITRE 5 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce chapitre discute les résultats obtenus, en intégrant les propriétés physiques et rhéologiques des résidus influençant la ségrégation. Une approche de ségrégation uni-paramétrique est proposée en établissant les indices de ségrégation (IS) en fonction des propriétés (physique et rhéologique). Ce chapitre discute également de la nécessité de développer un critère multiparamétrique de ségrégation. La représentativité des tests de ségrégation est discutée par rapport aux tests d'écoulement en canal (*flume tests*).

5.1 Condition de non-ségrégation uniparamétrique

À l'aide de l'équation 2.33 de l'indice de ségrégation (IS), il est possible de calculer l'indice de ségrégation IS en utilisant les profils verticaux des pourcentages solides le long de la colonne pour chaque temps de sédimentation (0,25h, 0,5h, 1h, 2h, 3h, 4 h, 5h, 6h et 24h), (voir l'Annexe D, pour le calcul de IS). La figure 5.1 indique l'évolution de l'indice de ségrégation en fonction des temps de sédimentation. L'indice de ségrégation IS diminue avec l'augmentation du pourcentage solide initial des résidus ($C_{w-ini} = 60\%$, 65% , 70%) et le temps de sédimentation.

Pour $t = 24h$ les valeurs de IS se stabilisent pour $C_{w-ini} = 60\%$, 65% et 70% . Il existe un seuil de ségrégation $IS = 0,05$ en dessous duquel les résidus sont considérés comme étant non-ségrégant (Mihiretu, 2009). La courbe $IS(t)$ augmente et atteint une valeur maximale ($IS_{max} = 0,23$ à $t = 4h$ pour $C_{w-ini} = 60\%$, $IS_{max} = 0,175$ à $t = 3h$ pour $C_{w-ini} = 65\%$ et $IS_{max} = 0,07$ à $t = 1h$ pour $C_{w-ini} = 70\%$).

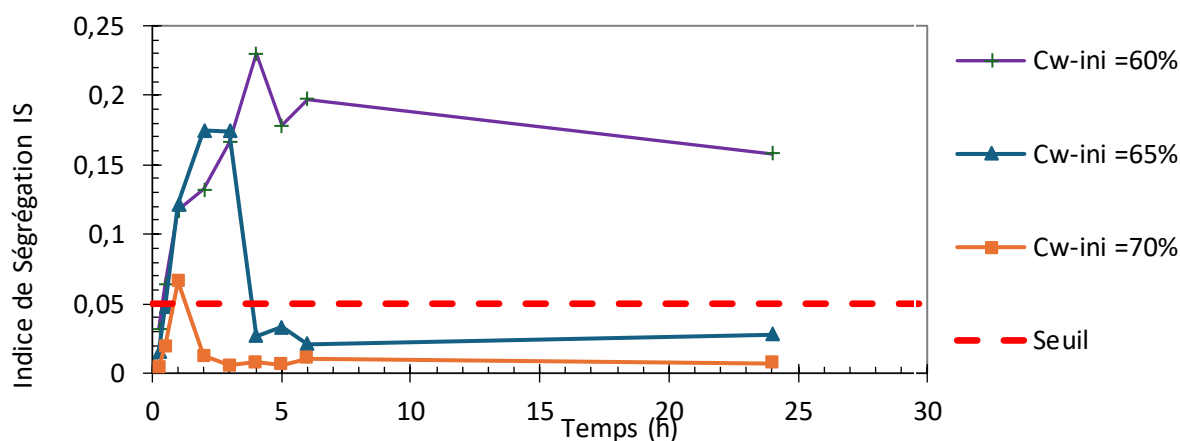


Figure 5.1 Évolution temporelle de l'indice de ségrégation (IS) pour différent pourcentage initial C_{w-ini} de : 60% , 65% et 70% avec un seuil d'indice de ségrégation $IS = 0,05$.

La courbe $IS(t)$ associé à $C_{w-ini} = 60\%$ se situe au-dessus de la valeur seuil $IS_{crit} = 0,05$ à partir de $t = 0,25h$ et demeure jusqu'à la fin des essais au-dessus de cette valeur critique. Ces résidus restent ségrégant. Pour $C_{w-ini} = 65\%$, $IS(t)$ montre un comportement transitoire entre 1-3h, suivie d'une stabilisation en dessous du seuil de IS à partir de 4 h, cela correspondrait à une ségrégation modérée. Pour $C_{w-ini} = 70\%$, les valeurs de IS restent en dessous du seuil de 0,05 (au-delà de 1,25 h), ce qui correspondrait à une condition de non-ségrégation.

Pour chaque temps de sédimentation, il est possible d'évaluer l'influence du pourcentage solide initial C_{w-ini} sur l'indice de ségrégation IS . Dans le cadre de cette étude, les valeurs IS_{24h} après 24h de sédimentation vont être considérées comme stables c'est-à-dire que le processus de sédimentation est terminé.

La figure 5.2a montre comment IS_{24h} varie en fonction de C_{w-ini} (en décimal et non en %). IS_{24h} diminue exponentiellement avec l'augmentation de C_{w-ini} avec coefficient de détermination R^2 très élevé (voir éq. 5.1), valable dans le domaine des valeurs C_{w-ini} étudié). Le seuil critique apparaît $IS = 0,05$ est atteint pour une valeur de C_{w-ini} de 63,5%. Autrement dit, les résidus testés seraient non-ségrégant ($IS_{24h} < 0,05$) lorsque son pourcentage solide initial est supérieur à 63%.

$$IS_{24h} = 2 \times 10^7 \times e^{-31,17 C_{w-ini}} \quad (5.1)$$

La figure 5.2b, montre la relation entre l'indice de non-ségrégation IS en fonction de la masse volumique ρ_p . L'équation (5.2) établit la relation exponentielle entre IS et ρ_p . La condition de non-ségrégation IS inférieur à 0,05 est satisfaite pour ρ_p supérieure à 1,72 g.cm³.

$$IS_{24h} = 2 \times 10^9 \times e^{-14,18 \rho_p} \quad (5.2)$$

La Fig. 5.2c montre également une relation exponentielle avec la contrainte seuil (τ_{0-HB}) et l'indice de ségrégation. L'équation (5.3) établit la relation exponentielle entre IS et τ_{0-HB} . Avec un excellent ajustement ($R^2 = 0,9959$), la courbe montre que l'augmentation de τ_{0-HB} réduit la ségrégation des résidus, en atteignant un seuil de cisaillement supérieur à 6,85 Pa, les résidus deviennent non-ségrégant.

$$IS_{24h} = 0,3497 \times e^{-0,298 \tau_{0-HB}} \quad (5.3)$$

La viscosité nulle (η_0), représente la résistance initiale développée par le fluide au repos (figure. 5.2d). La viscosité nulle montre une relation exponentielle entre IS et η_0 (eq. 5.3) pour des valeurs η_0 supérieure à 3,2 Pa.s. La faible corrélation obtenue ($R^2 = 0,371$), montre une limitation liée au

rhéomètre qui a du mal mesurer la viscosité à de très faibles taux de cisaillement. L'augmentation du pourcentage solide augmente la consistance des résidus (C_w), c'est ce qui limite l'action de la ségrégation par migration particulières. Le seuil $IS = 0,05$ est atteint pour une viscosité $\approx 3,5$ voire 4 Pa.s. En dépassant par auto-consolidation des résidus dans la colonne, les forces visqueuses arrivent à dominer le système et imposer la stabilité des résidus.

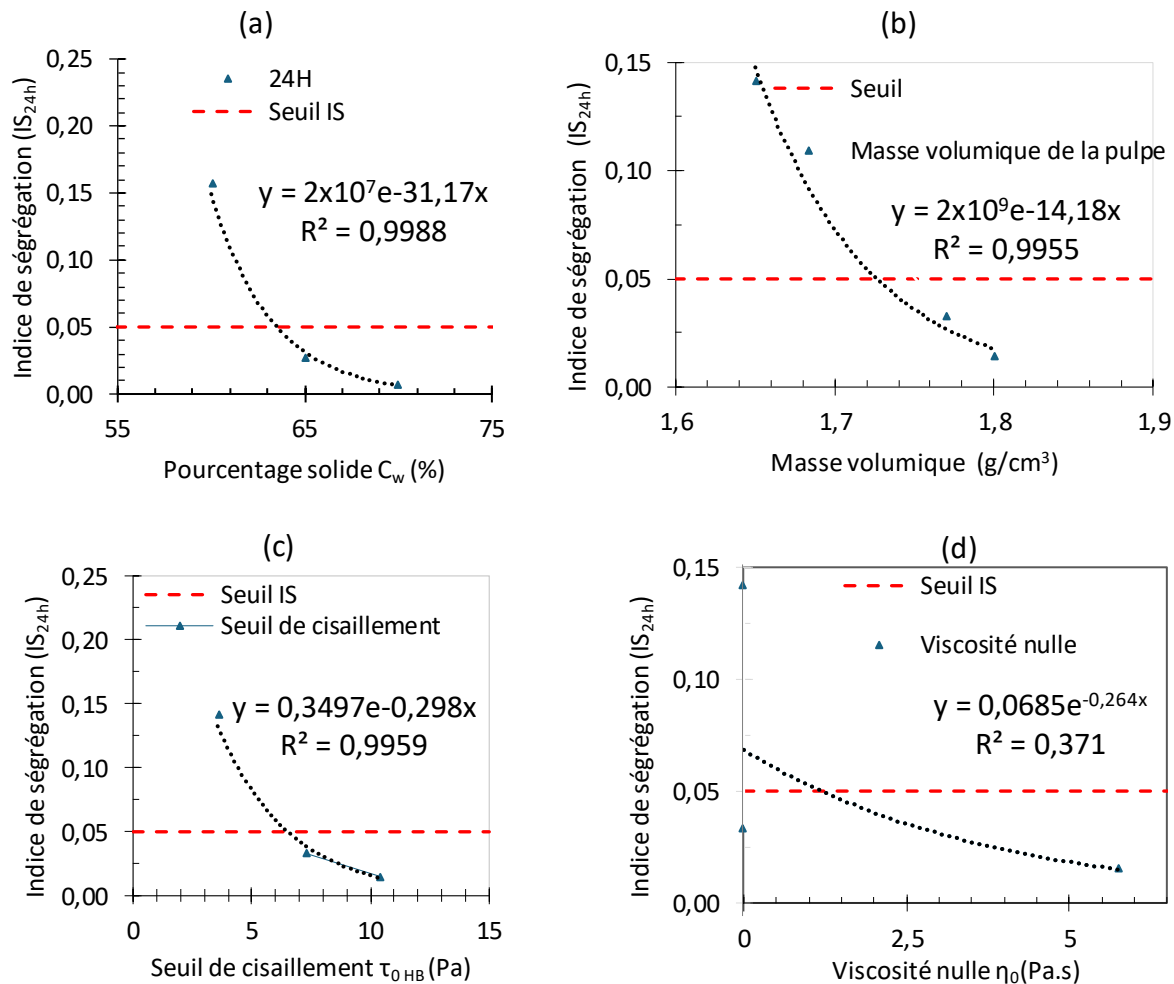


Figure 5.2 Variations de l'indice de ségrégation après 24h de sédimentation (IS_{24h}) en fonction des propriétés initiales de la pulpe : (a) pourcentage solide; (b) Masse volumique et (c) seuil de cisaillement (d) viscosité nulle.

5.2 Approche pour la détermination d'un critère de ségrégation multiparamétrique

L'approche présentée ci-dessus montre que pour un type de résidus miniers donnés, il est possible de définir un critère de non-ségrégation statique pour chacun des paramètres caractéristiques de ces résidus dans un domaine précis de valeurs de pourcentages solides. Ce type de critère pourrait être développé pour une vaste gamme de résidus ayant des granulométries, des densités relatives des grains solides, et des compositions minéralogiques différentes. Pour chaque résidu, les essais de sédimentation seraient réalisés en variant le pourcentage solide. Des relations $IS = f(\xi_i)$ pourraient être développées pour chaque résidu, où ξ_i désigne un des n paramètres d'influence de la ségrégation statique (par exemple : le pourcentage solide, le seuil de cisaillement et la viscosité). À l'aide des données obtenues sur plusieurs types de résidus, une régression multiple pourrait être utilisée pour développer une relation multiparamétrique de type $IS = g(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n)$. Le critère de non-ségrégation généralisé deviendrait alors $g(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n) \leq 0,05$. Dans ce cas, les caractéristiques de la distribution granulométrique et la densité relative des grains solides des résidus vont être ajoutés aux paramètres ξ_i . Ce critère pourrait être utile lors des phases de design des épaisseurs et systèmes de filtration pour viser des résidus avec des caractéristiques les rendant non-ségrégant sans devoir faire des essais de sédimentation et quelques caractérisations préliminaires seraient seulement requises.

5.3 Tests de sédimentation vs tests d'écoulement

Les critères de non-ségrégation développés pour les conditions statiques ne seraient applicables que lors de la sédimentation des résidus. Avant d'atteindre la phase de repos, des ségrégations latérales et verticales surviennent simultanément durant le transport des résidus. L'essai de sédimentation en colonne est non représentatif de la ségrégation durant l'écoulement dynamique, contrairement aux tests d'écoulement en canal (ou flume test) ou à grande échelle sur le terrain. Malheureusement, les essais d'écoulement en canal visent souvent à prédire la pente de la plage (pente de dépôt des résidus) (Pirouz et al., 2013, 2014). Quelques tests d'écoulement ont aussi permis d'étudier la ségrégation des suspensions au laboratoire (Mihiretu, 2009; Fourie & Gawu, 2010; Seddon et al., 2015; Furtado et al., 2023) et sur le terrain (El Hamidi et al., 2025).

Parallèlement à cette étude sur la sédimentation statique, des essais en canal d'écoulement ont été réalisés dans un canal de 14,6 m de long en utilisant de résidus à 3 pourcentages solides. Des pentes du canal de 0,5% et de 1% ont été testées. Les échantillons de résidus collectés le long du canal durant l'écoulement ont fait l'objet de caractérisation physique (pourcentage solide, distribution granulométrique, masse volumique et propriétés rhéologiques). Des critères de non-ségrégation uniparamétriques ont aussi été proposés à partir de l'indice de ségrégation (résultats non encore publiés). Pour établir un critère de non-ségrégation multiparamétrique fondé sur les propriétés physiques et rhéologiques, une analyse dimensionnelle faisant intervenir le théorème π de Buckingham va être utilisée en combinaison avec des algorithmes numériques.

Comme pour les essais de sédimentation statique réalisés dans cette étude, d'autres travaux restent requis pour développer un critère qui inclurait les paramètres liés à la variabilité des caractéristiques des résidus (granulométrie, densité relative des grains solides, etc.).

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

L'objectif principal de ce travail était de proposer, à titre préliminaire, un critère de non-ségrégation des résidus miniers à partir d'essais de sédimentation statique réalisés en laboratoire. L'étude de la ségrégation a montré que les propriétés physiques et rhéologiques initiales (C_{w-ini} ou ρ_p-ini et τ_{0-ini}) influencent le comportement des résidus. Pour des essais de sédimentation réalisés à des pourcentages solides $C_{w-ini} = 60\%$ et $C_{w-ini} = 70\%$, les résultats ont montré que l'augmentation du pourcentage entraîne une réduction de la mobilité des particules dans la pulpe c'est-à-dire que la vitesse de sédimentation baisse avec l'augmentation du pourcentage solide. Plus la pulpe est consistante et enrichie en solide, plus l'entrave des particules est forte et tend à limiter la ségrégation des particules. Une ségrégation apparaît et devient plus intense pour $C_{w-ini} = 60\%$, modérée pour $C_{w-ini} = 65\%$ et absente pour $C_{w-ini} = 70\%$. La vitesse de sédimentation diminue lorsque le pourcentage solide C_{w-ini} augmente et finit par devenir négligeable, à partir d'un certain temps critique de sédimentation (12h à 24h). Les résultats de l'analyse granulométrique ont également montré une forte et faible hétérogénéité de la distribution granulométrique pour $C_{w-ini} = 60\%$ et $C_{w-ini} = 65\%$. Pour $C_{w-ini} = 70\%$ l'homogénéité de la distribution est conservée sur la hauteur des colonnes (PTE 2 à 7). Les résultats obtenus à partir des profils verticaux de la masse volumique montrent également cette tendance de ségrégation particulièrement pour granulométrique pour $C_{w-ini} = 60\%$ et $C_{w-ini} = 65\%$.

La caractérisation rhéologique effectuée sur les échantillons prélevés sur la colonne révèle un comportement non-newtonien pseudo-plastique avec un seuil de cisaillement croissant avec l'augmentation du pourcentage solide. Le modèle de Herschel-Bulkley, utilisé à cet effet, a également montré des seuils de cisaillement croissants avec la profondeur de la colonne. Les viscosités à des taux de cisaillement proche de zéro η_0 , et très élevés η_∞ du modèle de Cross a également révélé des écarts visibles entre des échantillons de la zone diluée et de la zone compacte. Bien que η_0 soit le paramètre le plus adapté pour une sédimentation statique, elle peut présenter des limites soit à l'instabilité ou la perte de sensibilité du rhéomètre, l'instabilité des résidus à très faible cisaillement peut s'expliquer par la sédimentation dans la coupelle.

Il ressort de nos résultats qu'une interprétation de la capacité ségréguant de résidus ne peut être seulement liée au pourcentage solide. L'indice de ségrégation proposée jadis sur base du

pourcentage solide seul, dans la littérature, devrait tenir compte des paramètres physiques et rhéologiques : C_w, τ_{0-HB} ; ρ_p, η_0 impliqués dans la ségrégation. Autrement dit, il serait possible de proposer un critère préliminaire de non-ségrégation statique basé sur l'indice de ségrégation (IS) tenant compte des propriétés physiques et rhéologiques. En effet, à partir des relations obtenues entre l'indice de ségrégation après 24 h de sédimentation IS_{24h} et les paramètres physiques et rhéologiques des résidus, il est proposé de retenir les critères uni-paramétriques suivants pour le type de résidus étudiés pour satisfaire la condition $IS_{24h} < 0,05$: $C_{w-ini} \geq 63,5\%$ ou une masse volumique initiale $\rho_p \geq 1,72 \text{ g.cm}^3$ et un seuil de cisaillement initial $\tau_{0-HB} \geq 6,85 \text{ Pa}$. Ainsi, les résultats présentés montrent que l'objectif principal a été atteint que l'hypothèse selon laquelle des critères de non-ségrégation statique des résidus peuvent être définis à partir des profils verticaux des propriétés physico-rhéologiques obtenues lors des tests de sédimentation en colonne est vérifiée. . En réalisant des tests de sédimentation sur plusieurs types de résidus, il serait alors possible de développer un critère de non-ségrégation multi-paramétrique généralisé qui incluent les propriétés physiques et rhéologiques.

6.2 Recommandations

Les travaux réalisés dans cette étude ont jeté les bases pour le développement de critères de non-ségrégation de résidus miniers. Les recommandations formulées ci-dessous visent à pousser plus loin les études afin d'améliorer la compréhension du phénomène de ségrégation et fournir des outils pour le contrôle du phénomène lors de la gestion des résidus sur le terrain.

- Il faudrait réaliser des essais de sédimentation statique sur d'autres types de résidus dans le but de pouvoir développer un critère de non-ségrégation multi-paramétrique. Les résidus à tester devraient montrer des différences en termes de distributions granulométriques, densités relatives des drains solides et de composition minéralogie.
- La ségrégation verticale statique n'est pas représentative de la ségrégation qui a lieu durant la déposition des résidus. Des essais au laboratoire en canal d'écoulement (flume tests) ou des essais in situ seront nécessaires pour compléter cette étude. Des essais d'écoulement en canal préliminaires ont été réalisés avec un seul type de résidus à différents pourcentages solides. Des critères de non-ségrégation uni-paramètres ainsi qu'un critère multi-paramétrique pour ces résidus ont été proposés (Davarpanah et al. 2026). Ces essais devraient aussi porter sur

différents types de résidus dans le but de développer un critère multi-paramétrique généralisé.

- Les travaux futurs pourraient aussi porter sur la modélisation numérique pour développer une approche prédictive de non-ségrégation, qui intégrerait les paramètres rhéologiques, hydrauliques et physiques.

RÉFÉRENCES

- Acevedo Valle, M. E. (2017). *Influencia de la compacidad relativa en el coeficiente de permeabilidad de jales* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México).
- Alderman, N. (1997). *Non-Newtonian Fluids: Guide to Classification and Characteristics* London: ESDU.
- Antunes, M., & Medronho, R. A. (1992). Bradley Hydrocyclones: Design and Performance Analysis. Dans L. Svarovsky & M. T. Thew (édit.), *Hydrocyclones: Analysis and Applications* (p. 3-13). Springer Netherlands. 10.1007/978-94-015-7981-0_1
- ASTM. (2017). *Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering*. <https://www.astm.org/b0822-17.html>
- ASTM D2216, A. T. &. (3 janvier 2022). ASTM D2216 - Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock. *Applied Testing & Geosciences*. <https://www.appliedtesting.com/standards/astm-d2216-laboratory-determination-of-water-moisture-content-of-soil-and-rock-by-mass>
- ASTM D4380. (2020). *Standard Test Method for Determining Density of Construction Slurries*. <https://www.astm.org/d4380-20.html>
- ASTM-D2487. (2017). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International. 10.1520/D2487-17
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazou, M., & Li, L. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. *Congrès annuel de la Société Canadienne de génie civil*, 5-8.
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., & Chapuis, R. P. (2013). Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers: Partie I Mise en contexte et caractéristiques générales. *Environnement, Ingénierie & Développement*, N°64-Juin 2013, 7839. 10.4267/dechets-sciences-techniques.2292
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Maqsoud, A. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites miniers d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA, In *Symposium 2015 sur l'Environnement et les Mines*.
- Barbour, S. L., Wilson, G.W, & St-Arnaud, L. C. (1993). Evaluation of the saturated-unsaturated groundwater conditions of a thickened tailings deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 935-946.
- Barnes, H. A. (2000). *A handbook of elementary rheology*. University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.
- Been, K., & Sills, G. C. (1981). Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. *Géotechnique*, 31(4), 519-535. 10.1680/geot.1981.31.4.519
- Belem, T., & Benzaazoua, M. (2003). Utilisation du remblai en pate comme support de terrain. partiel : de sa fabrication à sa mise en place sous terre.

- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Plante, B., Pepin, G., Aubertin, M., ... Laflamme, D. (2013). Comportement géochimique et hydrogéologique des stériles de la mine Lac Tio. *Environnement, Ingénierie & Développement*, N°64-Juin 2013, 7837. 10.4267/dechets-sciences-techniques.2238
- Benzaazoua, M., Belem, T., Serge, O., & Fall, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement a court, a moyen et a long terme.
- Björn, A., La Monja, P. S. D., Karlsson, A., Ejlertsson, J., & H., B. (2012). Rheological Characterization. Dans S. Kumar (édit.), *Biogas*. InTech. 10.5772/32596
- Blazy, P., Jdid, E.-A., & Bersillon, J.-L. (1999). Décantation - Équipements et procédés. *Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique*. 10.51257/a-v1-j3451
- Blight, (2009). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. CRC Press.
- Blight, G. E. (1983). The behaviour of mine tailings during hydraulic deposition. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 14.
- Boger, D., Scales, P. J., & Sofra, F. (2006). Rheological concepts. *Paste and thickened tailings-A guide*, 25-37.
- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052. 10.1139/T07-040
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. W., & Chapuis, R. P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G. J., & Potvin, R. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées, 29.
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2020a). *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press.
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2020b). *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press.
- Cacciuttolo, C., & Valenzuela, F. (2022). Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining. *Water*, 14(11), 1741. 10.3390/w14111741
- Chalaturnyk, R. J., Don Scott, J., & Özü, B. (2002). MANAGEMENT OF OIL SANDS TAILINGS. *Petroleum Science and Technology*, 20(9-10), 1025-1046. 10.1081/LFT-120003695
- Cho, H. (2001). *Development of a three-segment hydraulic model for cuttings transport in horizontal and deviated wells* [University of Oklahoma].
- Chryss, A., & Pullum, L. (2007). *A new viscometric technique to successfully measure shear thickening behaviour, if and when it occurs*. Hydrotransport 17 - The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids (p. 15-27).
- Cross, M. M. (1965). Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. *Journal of Colloid Science*, 20(5), 417-437. 10.1016/0095-8522(65)90022-X

- Crowder, J. J. (2004). Deposition, Consolidation, And Strength Of A Non-Plastic Tailings Paste For Surface Disposal, 175.
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 2006(2), 405-420.
- Davarpanah, S. M., Mbonimpa, M., Belem, T., Maqsoud, A., Dima, A.D., & Danni Saadou, O. (2026). *Development of Precursory non-segregation criteria for hard rock mine tailings slurries: Integration of flume testing and Buckingham π dimensional analysis*. Preprints. <https://doi:10.20944/preprints202605.1132.v1>
- Darby, R. (2001). *Chemical engineering fluid mechanics* (2. ed., rev.expanded). Dekker.
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Aubertin, M. (2009). Les effets d'amendements alcalins sur des résidus miniers sulfureux entreposés en surface : Cas des dépôts en pâte. *Environnement, Ingénierie & Développement*, N°54-Avril-Mai-Juin 2009, 7905. 10.4267/dechets-sciences-techniques.1235
- de Silva, S. R., Dyrøy, A., & Enstad, G. G. (2000). *Segregation Mechanisms and Their Quantification Using Segregation Testers*. A. D. Rosato & D. L. Blackmore (édit.), Dordrecht (p. 11-29). Springer Netherlands. 10.1007/978-94-015-9498-1_2
- Dixon-Hardy, D., & Engels, J. (2007). Methods for the disposal and storage of mine tailings. *Land Contamination & Reclamation*, 15, 301-317. 10.2462/09670513.832
- Donahue, R., Sego, D., Burke, B., Kung, J., Krahn, A., & Islam, N. (2008). The impact of ion exchange reactions on the sedimentation behaviour of clay sand slurries. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21161786>
- Driouky, Z. (2020). *Étude de l'impact de la ségrégation hydraulique des résidus miniers sur la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée*, Mémoire de maîtrise, IRME, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Drissa Ouattara. (2011). *Étude des propriétés rhéologiques de résidus miniers densifiés*, Mémoire de maîtrise, IRME, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- El Hamidi, M. J., Maqsoud, A., Belem, T., & Viger, M.-E. (2025). Three-Dimensional Groundwater and Geochemical Reactive Transport Modeling to Assess Reclamation Techniques at the Quémont 2 Mine, Rouyn-Noranda, Canada. *Water*, 17(8), 1191. 10.3390/w17081191
- Eltilib, R., Al-Kayiem, H., & Jaafar, A. (2011). Investigation on The Particle Settling Velocity in Non-Newtonian Fluids. *Journal of Applied Sciences*, 11. 10.3923/jas.2011.1528.1535
- Ethier, M.-P., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsoud, A., Demers, I., & Broda, S. (2018). In situ evaluation of performance of reclamation measures implemented on abandoned reactive tailings disposal site. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(12), 1742-1755.
- Fester, V., Slatter, P., & Alderm, N. (2012). Resistance Coefficients for Non-Newtonian Flows in Pipe Fittings. Dans J. De Vicente (édit.), *Rheology*. InTech. 10.5772/34199
- Fitton, T. (2018). *Some comments on thickened tailings and beach slopes*. 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings (p. 91-102). 10.36487/ACG_rep/1805_07_Fitton

- Fourie, A. B., & Gawu, S. K. Y. (2010). *The validity of laboratory flume data for predicting beach slopes of thickened tailings deposits* (p. 241-253). Australian Centre for Geomechanics. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1063_21_Fourie/
- Furtado, R. M., Chaves, A. P., Testa, F. G., & de Paula, P. T. (2023). Feasibility of high-density and non-segregable niobium ore tailings. *Minerals*, 13(6), 820.
- Gao, Y.-F., Zhang, Y., Zhou, Y., & Li, D. (2016). Effects of Column Diameter on Setting Behavior of Dredged Slurry in Sedimentation Experiments. *Marine Georesources & Geotechnology*, 34(5), 431-439. 10.1080/1064119X.2015.1020975
- Gowan, M. J., & Williams, D. A. (2002). *Benefits of Utilising an Increased Tailings Slurry Density*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series (p. 209-220).
- Gray, J. M. N. T., & Ancey, C. (2011). Multi-component particle-size segregation in shallow granular avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*, 678, 535-588. 10.1017/jfm.2011.138
- Gray, J. M. N. T., & Ancey, C. (2015). Particle-size and -density segregation in granular free-surface flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 779, 622-668. 10.1017/jfm.2015.438
- Hannah, R. R., & Harrington, L. J. (1981). Measurement of Dynamic Proppant Fall Rates in Fracturing Gels Using a Concentric Cylinder Tester (includes associated paper 9970). *Journal of Petroleum Technology*, 33(05), 909-913. 10.2118/7571-PA
- Herbolzheimer, E., & Acrivos, A. (1981). Enhanced sedimentation in narrow tilted channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 108, 485-499. 10.1017/S0022112081002231
- Hill, K. B. (1996). *Pipelines flow of coarse particles in fluids with yield stresses*, Doctoral dissertation, University of Saskatchewan.
- Imai, G. (1980). Settling Behavior of Clay Suspension. *Soils and Foundations*, 20(2), 61-77. 10.3208/sandf1972.20.2_61
- Jeeravipoolvarn, S., Scott, J. D., & Chalaturnyk, R. J. (2010). Simulation of oil sands in-line thickened tailings disposition.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of The Total Environment*, 338(1-2), 3-14.
- Jossic, L., & Magnin, A. (2001). Drag and stability of objects in a yield stress fluid. *AIChE Journal*, 47(12), 2666-2672. 10.1002/aic.690471206
- Khelifi, S. (2018). *Étude du comportement hydrodynamique de suspensions concentrées de particules d'hématite: sédimentation, comportement rhéologique et écoulement forcé dans une cellule inclinée* [Université de Lorraine].
- Kissiovo, M. (2020). *Gestion des résidus miniers, des stériles et de l'eau :pourquoi en parler? (Conférence)*. Centre E4M, Université Laval, Québec, Qc, Canada. <https://classevirtuelle.ulaval.ca/midi-conference-e4m/>
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245. 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

- Kynch, G. J. (1952). A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, 48(0), 166-176. 10.1039/TF9524800166
- Lapierre, J. (2014). *Étude expérimentale du comportement en cisaillement de résidus miniers épais*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke
- Larson, R. G., & Wei, Y. (2019). A review of thixotropy and its rheological modeling. *Journal of Rheology*, 63(3), 477-501. 10.1122/1.5055031
- L'Ecuyer, M., Chapuis, R. P., & Aubertin, M. (1993). *Field and laboratory investigations of hydraulic conductivity of acid producing mine tailings* (p. 213-213). American Society of Civil Engineers.
- Li, Y. (2023). *Segregation and hindered settling behavior of mine tailings suspension*. Doctoral dissertation, University of British Columbia. <https://hdl.handle.net/2429/85394>
- Li, Y., & Van Zyl, D. (2022). Hindered settling of flocculated multi-sized particle suspension, part I: Segregation mechanism of non-flocculated particles. *Powder Technology*, 407, 117683. 10.1016/j.powtec.2022.117683
- Li, Y., & Van Zyl, D. (2023). Hindered settling of flocculated multi-sized particle suspension, part II: Experimental study of particle segregation based on copper tailings suspension. *Powder Technology*, 415, 118154. 10.1016/j.powtec.2022.118154
- Li, Y., & Van Zyl, D. (2024). Experimental study on the overall settling behavior of copper tailings suspension. *Minerals Engineering*, 208, 108580. 10.1016/j.mineng.2024.108580
- Li, Y., & van Zyl, D. (2022). Hindered settling of flocculated multi-sized particle suspension, part I: Segregation mechanism of non-flocculated particles. *Powder Technology*, 407, 117683. 10.1016/j.powtec.2022.117683
- Lighthall, P. C., Watts, B. D., & Rice, S. (1989). Deposition methods for construction of hydraulic fill tailings dams. *Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage*.
- Martin, V., McMullen, J., & Aubertin, M. (mai 2005). Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur. [Communication écrite]. Dans *2^e symposium sur l'environnement et les mines*, Rouyn-noranda, QC, Canada. <https://publications.polymtl.ca/23880/>
- Mbonimpa, M., Awoh, A. S., Beaud, V., Bussière, B., & Leclerc, J. (2008, September). Spatial water quality distribution in the water cover used to limit acid mine drainage generation at the Don Rouyn site (Qc, Canada). In *Proceedings of the 61st Canadian Geotechnical Conference and the 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference* (pp. 21-24).
- McRoberts, E. C., & Nixon, J. F. (1976). A theory of soil sedimentation. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(3), 294-310. 10.1139/t76-031
- MEND. (1996). *Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings*. Report No. 2.17.1, p. 22.
- Mewis, J., & Wagner, N. J. (2009). Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 147-148, 214-227. 10.1016/j.cis.2008.09.005
- Mihiretu, Y. T. (2009). *Fundamentals of Segregation*. Ph.D. thesis, University of Alberta.

- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1995). Fundamentals of fluid mechanics. *Oceanographic Literature Review*, 10(42), 831.
- Nakamura, H. & Kuroda, K. (1937). La cause de l'accélération de la vitesse de sédimentation des suspensions dans les récipients inclinés. *Keijo Journal of Medicine*, 8, 256-296.
- Nehdi, M., & Rahman, M.-A. (2004). Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 1993-2007. 10.1016/j.cemconres.2004.02.020
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. J. (2007). Predicting the performance of an elevated water table for preventing acid mine drainage. In *Proceedings: 60th Canadian Geotechnical Conference and 8th Joint CGS-IAH-CNC Groundwater Conference*, CD-ROM.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. J. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1312-1323.
- Ouattara, D. (2011). *Étude des propriétés rhéologiques de résidus miniers densifiés* [Mémoire, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue]. <https://publications.polymtl.ca/560/>
- Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Aubertin, M. (2006). Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 19(5), 407-419. 10.1016/j.mineng.2005.10.006
- PADET, J. (1991). *Fluides en écoulement: méthodes et modèles*. Masson, Paris.
- Paterson, A. (2006). *Rheology Control of Thickened Tailings and Paste Pumping Systems*. Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings (p. 47-56). 10.36487/ACG_repo/663_5
- Paterson, A. J. C. (2006). *Rheology Control of Thickened Tailings and Paste Pumping Systems* (R. Jewell, S. Lawson et P. Newman, sous la direction de, p. 47-56). Communication présentée au Paste 2006: Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2006 3-7 April, Limerick, Australian Centre for Geomechanics. 10.36487/ACG_repo/663_5
- Pirouz, B., Javadi, S., Seddon, K. D., & Williams, M. P. A. (2014). Modified beach slope prediction model for non-segregating thickened tailings. In *Proceedings of the 17th International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (pp. 31-46). Vancouver, Canada: InfoMine Inc.
- Pirouz, B., Seddon, K., Pavissich, C., Williams, P., & Echevarria, J. (2013). *Flow through tilt flume testing for beach slope evaluation at Chuquicamata Mine Codelco, Chile* (R. Jewell, A. B. Fourie, J. Caldwell et J. Pimenta, sous la direction de, p. 457-472). Communication présentée au Paste 2013: 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2013 17-20 June, Brazil, Australian Centre for Geomechanics. 10.36487/ACG_rep/1363_35_Pirouz
- Pirouz, Behnam, Kavianpour, M. R., & Williams, P. (2008). Sheared and un-sheared segregation and settling behavior of fine sand particles in hyperconcentrated homogeneous sand-water mixture flows. *Journal of Hydraulic Research*, 46(sup1), 105-111. 10.1080/00221686.2008.9521945

- Ponder, E. (1925), On sedimentation and rouleaux formation-I. *Quartely Journal of Experimental Physiology: Translation and Integration*, 15(3),235-252.
[https://doi: 10.1113/expphysiol.1925.sp000356](https://doi.org/10.1113/expphysiol.1925.sp000356).
- Pullum, L. (2007a). *Pipelining Tailings, Pastes and Backfill* (R. Jewell et A. B. Fourie, sous la direction de, p. 113-127). Communication présentée au Paste 2007: Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2007 13-15 March, Perth, Australian Centre for Geomechanics. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/702_12_Pullum/
- Pullum, L. (2007b). *Pipelining Tailings, Pastes and Backfill* (R. Jewell et A. B. Fourie, sous la direction de, p. 113-127). Communication présentée au Paste 2007: Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2007 13-15 March, Perth, Australian Centre for Geomechanics. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/702_12_Pullum/
- Pullum, Lionel, Boger, D. V., & Sofra, F. (2018). Hydraulic Mineral Waste Transport and Storage. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 50(1), 157-185. 10.1146/annurev-fluid-122316-045027
- Reid, D., & Fourie, A. (2015). *The influence of slurry density on in situ density*. 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings (p. 95-106). 10.36487/ACG_rep/1504_05_Reid
- Richardson, J. F., & Zaki, W. N. (1954). The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow. *Chemical Engineering Science*, 3(2), 65-73. 10.1016/0009-2509(54)85015-9
- Robertson, S., & Kirsten. (1987). The Influence of Depositional Methods on the Engineering Properties of Tailings Deposits, 9.
- Roitto, V. (2014). *Slurry flows in metallurgical process engineering: Development of tools and guidelines*. Master's thesis, Aalto University, School of Chemical Technology.
- Saak, A. W., Jennings, H. M., & Shah, S. P. (2001). New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete. *Materials Journal*, 98(6), 429-439. 10.14359/10841
- Sahi, A., El Mahboub, K., Belem, T., Maqsoud, A., & Mbonimpa, M. (2019). Dewatering of Mine Tailings Slurries Using Superabsorbent Polymers (SAPs) Reclaimed from Industrial Reject of Baby Diapers: A Preliminary Study. *Minerals*, 9(12), 785. 10.3390/min9120785
- Saint-Michel, B., Georgelin, M., Deville, S., & Pocheau, A. (2018). Wall friction and Janssen effect in the solidification of suspensions. *Soft Matter*, 14(46), 9498-9510. 10.1039/C8SM01572D
- Seddon, K. D., Pirouz, B., & Fitton, T. G. (2015). *Stochastic beach profile modelling* (R. Jewell et A. B. Fourie, sous la direction de, p. 455-465). Communication présentée au Paste 2015: 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2015 5-7 April, Perth, Australian Centre for Geomechanics. 10.36487/ACG_rep/1504_35_Seddon
- Shammas, N. K., Kumar, I. J., Chang, S.-Y., & Hung, Y.-T. (2005). Sedimentation. Dans L. K. Wang, Y.-T. Hung, & N. K. Shammas (édit.), *Physicochemical Treatment Processes* (p. 379-429). Humana Press. 10.1385/1-59259-820-x:379
- Sharma, A., & Goel, P. (2022). Rheological Properties of Tailings Materials. *International Journal of Engineering Research*, 11(07).

- Shields, D. H. (1975). Innovations in Tailings Disposal. *Canadian Geotechnical Journal*, 12(3), 320-325. 10.1139/t75-036
- Sills, G. (1998). Development of Structure in Sedimenting Soils. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1747), 2515-2534.
- Simms, P. (2017). 2013 Colloquium of the Canadian Geotechnical Society: Geotechnical and geoenvironmental behaviour of high-density tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(4), 455-468. 10.1139/cgj-2015-0533
- Sofrá, F., & Boger, D. V. (2002). Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. *Chemical Engineering Journal*, 86(3), 319-330. 10.1016/S1385-8947(01)00225-X
- Sorta, A. R. (2015). *Centrifugal Modelling of Oil Sands Tailings Consolidation*. Doctoral dissertation, University of Alberta.
- Spelay, R. B. (2007). *Solids Transport in Laminar, Open Channel Flow of Non-Newtonian Slurries* [University of Saskatchewan].
- Spiers, J. (2010). Rheological and Geotechnical Characteristics. *Methods for treatment of mine tailings*, 16-7.
- Spitz, K., & Trudinger, J. (2019). *Mining and the Environment: From Ore to Metal* (2^e éd.). CRC Press. 10.1201/9781351183666
- Stokes, G. G. (1851). On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. (p. 99).
- Talmon, & Huisman. (2005). Fall velocity of particles in shear flow of drilling fluids. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(2), 193-201.
- Temgoua, M. D. (2021). Evaluation de la segregation dans deux parcs a residus inactifs situes en Abitibi. Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal] PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/9053/>
- Theriault, J. A., Frostiak, J., & Welch, D. (2003). Surface Disposal of Past Tailings at the Bulyanhulu Gold Mine. In *Proceedings of the 2nd mining environment conference*, Sudbury, Ontario, p1-8
- Thomas, A. D. (1976). Scale-up methods for pipeline transport of slurries. *International Journal of Mineral Processing*, 3(1), 51-69. 10.1016/0301-7516(76)90015-6
- Tia, M., & Ruth, B. E. (1987). Basic rheology and rheological concepts established by H. E. Schwyer. *Asphalt rheology: Relationship to mixture*, 118-145.
- USEPA (1994). *Design and evaluation of tailings dams (Technical report*, Office of Solid Waste, Special waste Branch.
- Van Kesteren, W. G. M., Talmon, A.M., Pennekamp, J.G., Costello, M.J., & Flynn, W.A. (2007). Dredged material placement under non-segregating conditions. In *Wodcon XVIII* (pp. 1559-1570).

- Van Rhee, C. (2002). *On the sedimentation process in a Trailing Suction Hopper Dredger* (Doctoral dissertation, Delft university of Technology). <https://resolver.tudelft.nl/uuid:c16d25e7-7b02-43ff-8ec8-e6069f8a1ce2>
- Vick, S. G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. BiTech Publishers Ltd.
- Wang, B., Xiong, T., Gao, L., Chai, Y., Cui, X., & Ding, W. (2019). Effects of Tailings Gradation on Rheological Properties of Filling Slurry. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-11. 10.1155/2019/6873840
- Wang, Y., Wu, A., Zhang, L., Wang, H., & Jin, F. (2018). Investigation of the Sedimentation Property of Backfill Material on the Basis of Rheological Test: A Case Study of Iron Tailings. *Journal of Chemistry*, 2018, 1-9. 10.1155/2018/9530767
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Butterworth-Heinemann.
- Wolkersdorfer, C., & Bowell, R. (2004). Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 1. *Mine Water and the Environment*, 23(4), 162-182. 10.1007/s10230-004-0060-0
- XianJun, J., Ying, L., WenHao, C., XiaoKang, S., & Peng, S. (2022). Determination of Static and Dynamic Yield Stress of Chengdu Clay Slurry. *Frontiers in Physics*, 10. 10.3389/fphy.2022.849633
- Xu, S., Sun, R., Cai, Y., & Sun, H. (2017). Study of sedimentation of non-cohesive particles via CFD–DEM simulations. *Granular Matter*, 20(1), 4. 10.1007/s10035-017-0769-7
- Zhang, X. (2020). Direct numerical simulation of the sedimentation of a particle pair in a shear-thinning fluid. *Physical Review Fluids*, 5(1). 10.1103/PhysRevFluids.5.014304

ANNEXE A MINÉRALOGIE DES RÉSIDUS

Tableau A.1 Résultats XRF

CERTIFICATE OF ANALYSIS Final Report

Analysis	1: Analysis Start Date	2: Analysis Start Time	3: Analysis Completed Date	4: Analysis Completed Time	5: U132493
Sample Date & Time					NA
SiO ₂ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	60.4
Al ₂ O ₃ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	15.4
Fe ₂ O ₃ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	6.06
MgO [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	3.20
CaO [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	5.07
Na ₂ O [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	4.56
K ₂ O [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	1.16
TiO ₂ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	0.53
P ₂ O ₅ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	0.12
MnO [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	0.09
Cr ₂ O ₃ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	0.02
V ₂ O ₅ [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	0.03
LOI [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	2.55
Sum [%]	26-Mar-25	09:08	01-Apr-25	06:44	99.2

Tableau A.2 Résultats de l'analyse DRX

Minéral/Compound	APR4502-1 (wt %)
Quartz	21,1
Albite	45,5
Chlorite	6,3
Calcite	2,7
Muscovite	8,2
Biotite	3,5
Ankérite	0,1
Actinolite	10,0
Orthoclase	0,2
Fluorapatite	0,3
Pyrite	0,2
Magnétite	1,0
Diopside	1,1
TOTAL	100

The weight percent quantities indicated have been normalized to a sum of 100%. The quantity of amorphous material has not been determined.

Tableau A.3 Formules chimiques des minéraux identifiés par diffraction aux rayons DRX

Mineral/Compound	Formula
Quartz	SiO ₂
Albite	NaAlSi ₃ O ₈
Chlorite	(Fe,(Mg,Mn) ₅ ,Al)(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈
Calcite	CaCO ₃
Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
Biotite	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
Ankérite	CaFe(CO ₃) ₂
Actinolite	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈
Fluorapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F
Pyrite	FeS ₂
Magnétite	Fe ₃ O ₄
Diopside	CaMgSi ₂ O ₆

ANNEXE B DISTRIBUTIONS GRANULOMÉTRIQUES

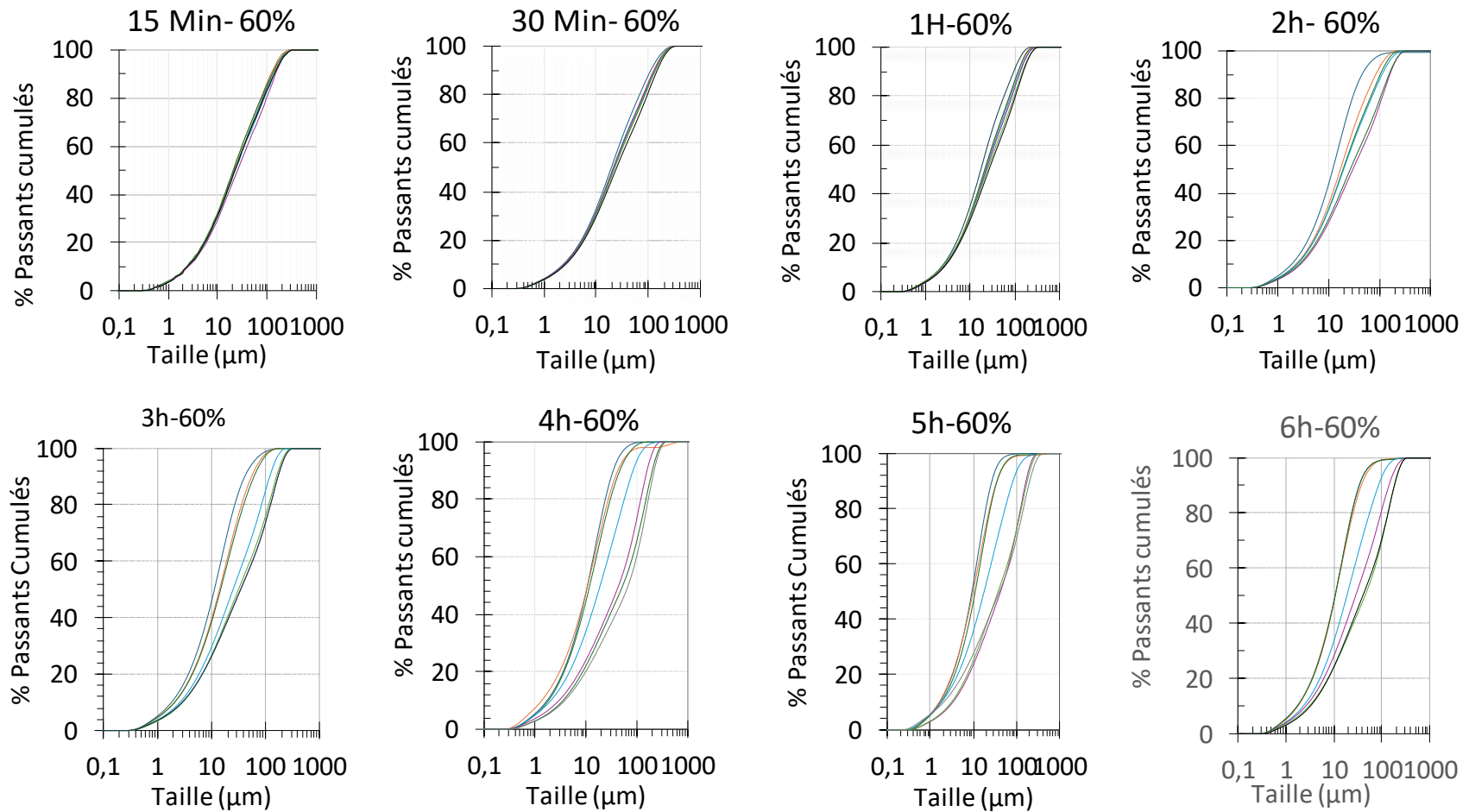


Figure B.1 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 60\%$ (15min,30min,1h,2h, 3h, 4h, 5h et 6h)

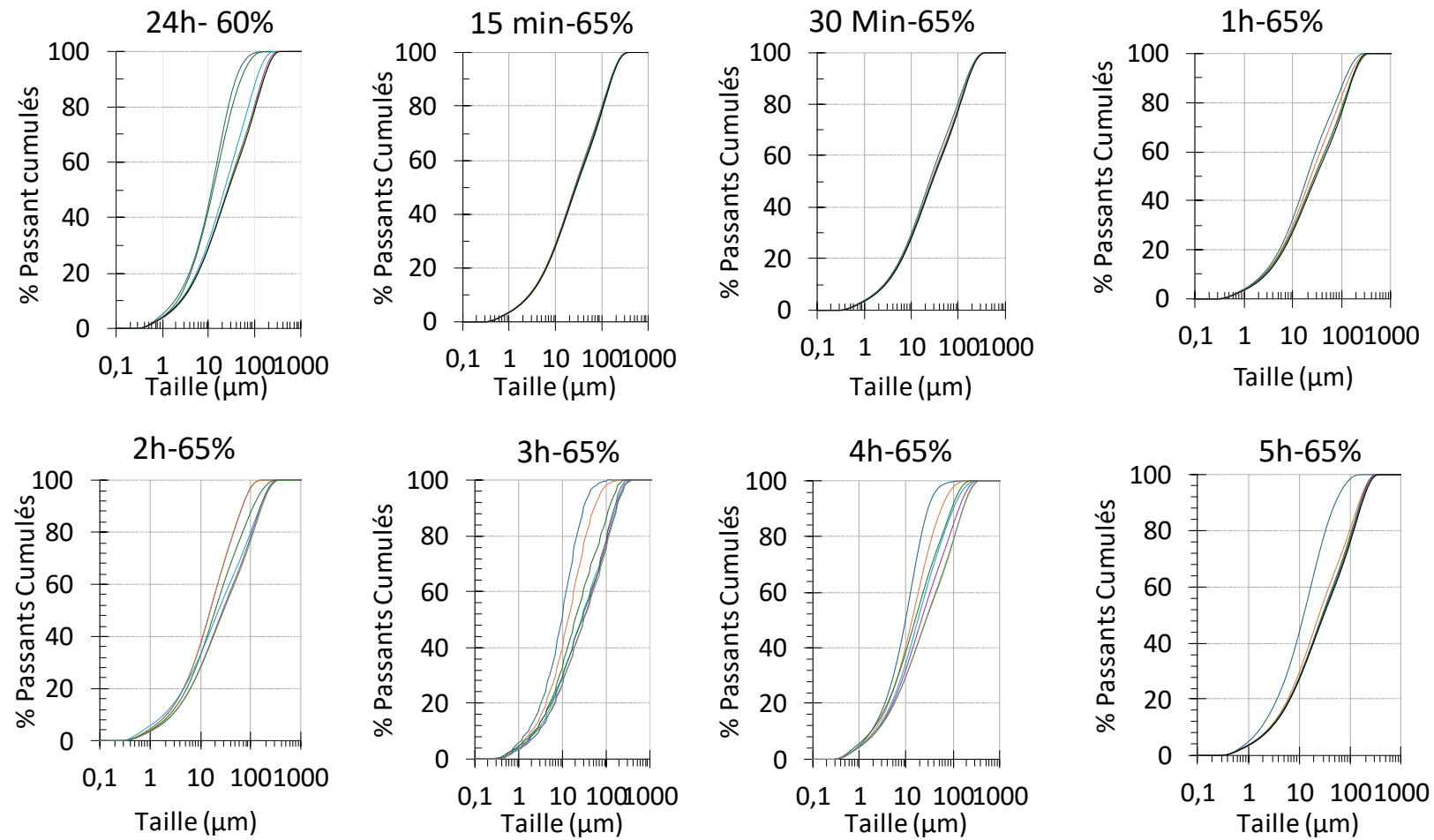


Figure B.2 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 60\%$ (24h) et $C_{w-ini} = 65\%$ (15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h et 5h)

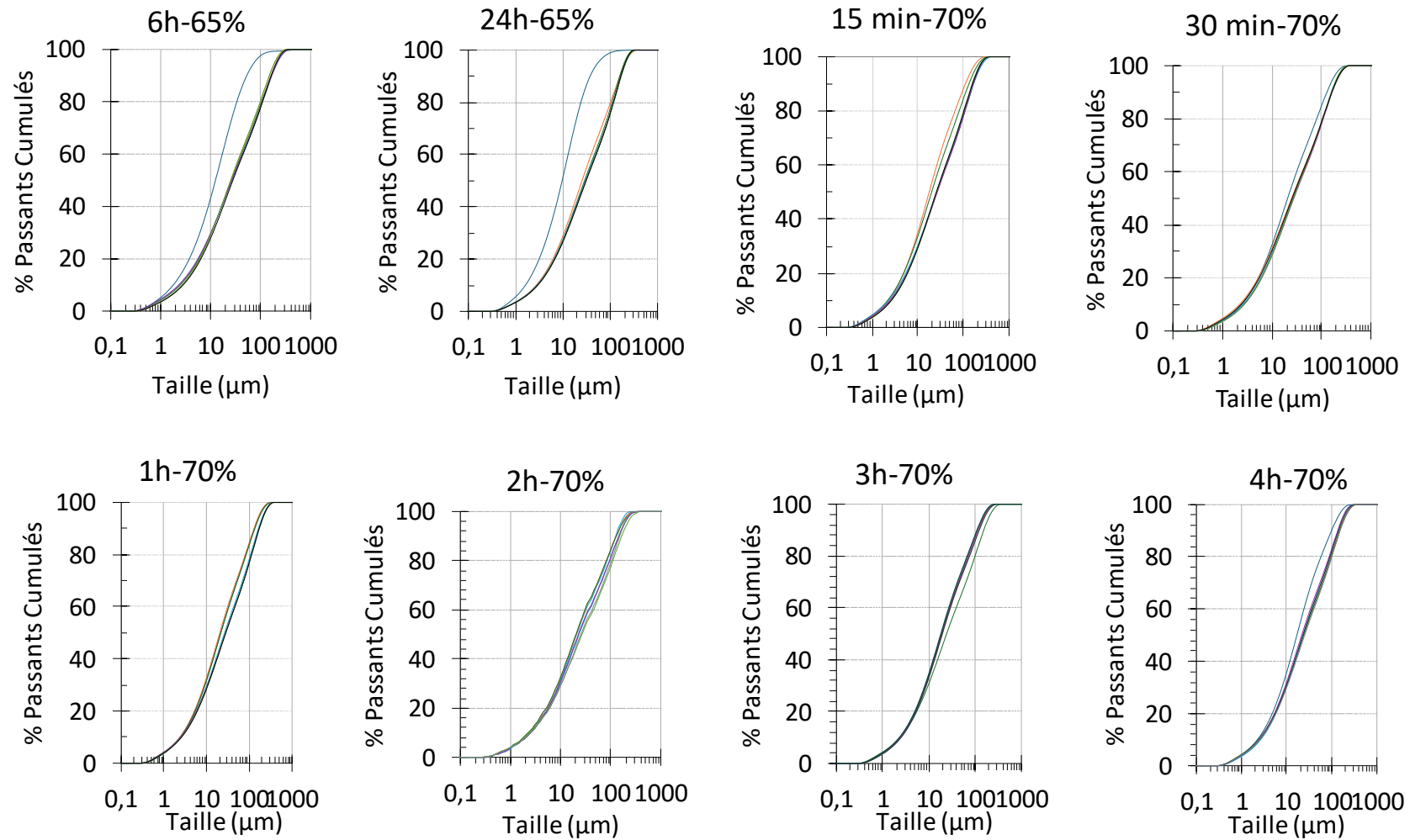


Figure B.3 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w\text{-ini}} = 65\%$ (6h et 24h) et $C_{w\text{-ini}} = 70\%$ (15min, 30min, 1h, 2h, 3h et 4h)

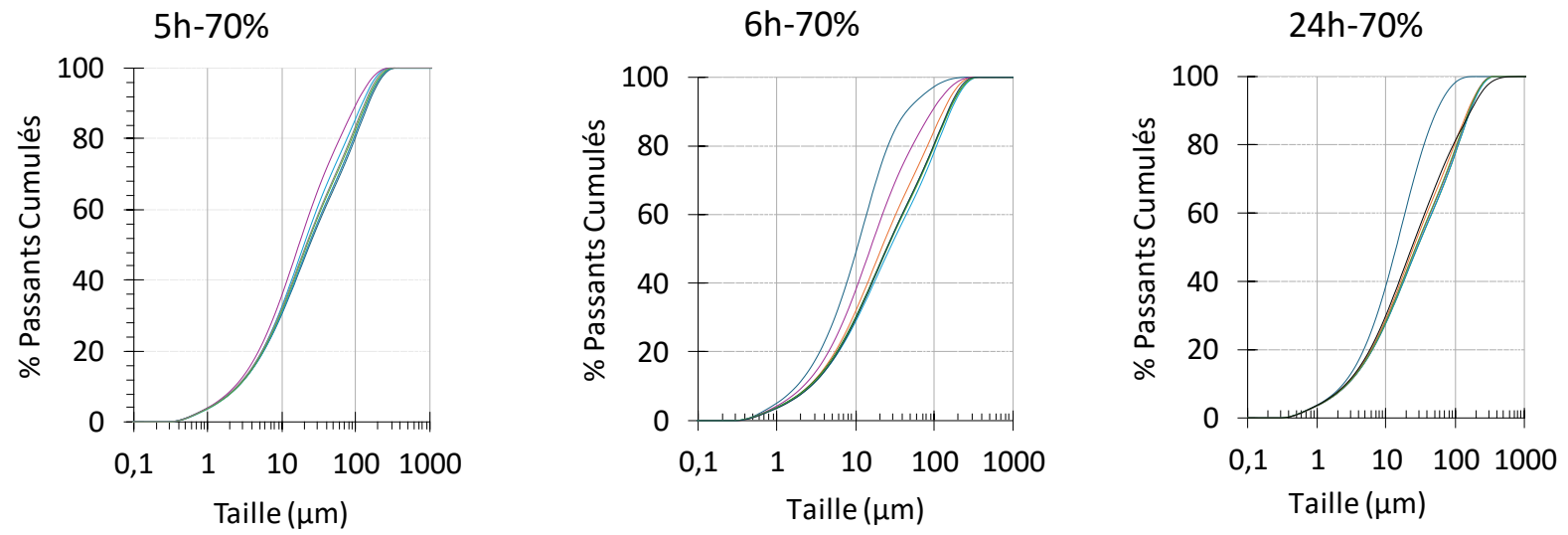


Figure B.4 Courbes granulométriques des différents échantillons prélevés pour chaque essai et temps de sédimentation $C_{w-ini} = 70\%$ (5h, 6h et 24h)

ANNEXE C PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES

Tableau C.1 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini}=60\%$ (15min, 30min, 1h)

$C_{w-ini}=60\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (%)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (%)
15 Min	PTE1	83,65	2,266	6,37E-01	0,7176	2,107	24,53	9,58E-04	9,308	0,9539	1,407
	PTE2	70,95	2,683	5,49E-01	0,7079	4,261	18,66	1,62E-03	6,099	0,9595	2,425
	PTE3	58,25	3,406	1,73E-01	0,7165	14,9	7,46E+05	1,56E-04	2,35E+05	0,9898	2,263
	PTE4	45,55	3,56	2,03E-02	8,99E-01	9,524	1,09E+00	1,99E-02	0,1913	1,217	4,372
	PTE5	32,85	3,623	2,19E-01	0,7266	1,309	366,4	1,10E-03	111,1	0,9716	0,8271
	PTE6	20,15	11,56	1,57E-02	1,131	14,92	1,925	0,08118	0,09053	1,496	3,148
	PTE7	7,45	11,73	0,1143	4,39E-01	22,1	3,99E+02	0,01784	2,29E+01	3,148	2,474
30min	PTE1	83,65	2,032	1,06E-01	0,5241	13,53	0,4677	1,50E-02	0,1133	1,32	4,765
	PTE2	70,95	2,205	9,72E-03	0,8554	11,33	6,01E-01	0,01022	0,1649	1,253	4,526
	PTE3	58,25	3,666	2,69E-04	0,9026	6,099	1,68E+00	6,12E-03	3,17E-01	1,148	1,97
	PTE4	45,55	3,738	0,02526	0,5405	17,83	1,39E+02	5,59E-03	2,61E+01	1,054	1,742
	PTE5	32,85	3,844	9,99E-02	2,58E-01	26,75	1,16E+06	3,38E-04	3,24E+05	0,9917	4,072
	PTE6	20,15	5,25	2,12E-01	0,1718	13,5	5,45E+05	4,81E-04	1,08E+05	0,9928	2,005
	PTE7	7,45	13,19	0,7076	0,3281	11,73	9,37E+05	0,01014	82120	0,9812	1,986
1h	PTE1	83,65	0,2687	2,56E+00	0,08237	2,755	2,09E+02	1,00E-05	105,2	0,9242	1,668
	PTE2	70,95	0,4941	2,06E-02	0,5254	10,69	45440	1,31E-03	1,16E+05	0,9744	2,095
	PTE3	58,25	3,311	4,54E-02	0,533	13,56	6,92E+05	3,53E-03	2,24E+05	0,9926	2,468
	PTE4	45,55	3,575	0,01134	0,8072	10,65	1,02E+08	4,66E-03	3,06E+08	1	1,789
	PTE5	32,85	3,706	2,66E-02	0,6409	10,03	4,00E+05	4,08E-03	1,12E+05	0,996	1,833
	PTE6	20,15	7,766	4,91E-01	0,588	17,64	1,06E+02	0,02963	16,63	0,9254	11,67
	PTE7	7,45	22,44	5,18E-01	0,7621	5,568	1,53E+05	0,1518	7,76E+04	0,9847	2,088

Tableau C.2 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 60\%$ (2h,3h,4h)

$C_{w-ini} = 60\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (%)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (%)
2h	PTE1	83,65	0,07021	8,61E-04	1,044	15,29	0,01045	1,33E-03	0,07377	1,516	5,923
	PTE2	70,95	0,862	0,07096	0,31114	7,714	52210	9,85E-04	72930	0,9747	1,688
	PTE3	58,25	1,086	0,1525	0,3356	2,489	136,3	1,25E-03	174,3	0,9218	1,775
	PTE4	45,55	1,946	4,99E-03	0,7274	14,51	3,58E+05	1,36E-03	1,83E+05	0,9997	2,316
	PTE5	32,85	10,52	2,48E-01	0,1654	16,11	3,019	0,04282	0,1631	1,327	1,895
	PTE6	20,15	21,02	0,4291	0,5682	13,74	3,26E+06	0,0416	1,73E+05	0,9884	2,885
	PTE7	7,45	31,04	0,5965	0,7867	0,6521	1519	0,1661	63,03	0,9513	0,9762
3h	PTE1	83,65	2,80E-03	2,94E-03	8,24E-01	1,993	3,89E-03	9,46E-04	0,1512	0,6878	6,801
	PTE2	70,95	0,4852	0,03164	0,4359	12,55	0,4852	3,16E-02	0,4359	0,4359	12,55
	PTE3	58,25	0,6575	0,04923	0,28809	15,09	75750	4,96E-04	1,36E+05	0,979	2,26
	PTE4	45,55	4,267	0,6818	0,4618	12,54	48160	0,02945	18000	0,9313	1,887
	PTE5	32,85	25,88	2,864	0,6568	3,599	451,8	3,13E-01	33,34	0,8211	3,542
	PTE6	20,15	29,58	6,957	0,5616	2,056	238,5	0,3378	14,44	0,7685	1,848
	PTE7	7,45	47,82	1,55	0,9125	10,56	8,001	1,231	0,07189	1,555	5,479
4h	PTE1	83,65	0,1013	0,008235	0,2798	11,08	3295,5	0,000638	24805	0,47445	2,085
	PTE2	70,95	0,2026	0,01647	0,5596	22,16	6591	1,28E-03	49610	0,9489	4,17
	PTE3	58,25	0,3335	0,03848	0,3891	14,23	10970	1,04E-03	44730	0,9578	3,685
	PTE4	45,55	2,264	4,53	0,1616	9,661	1,44E+05	5,02E-03	69320	0,8924	2,139
	PTE5	32,85	6,13	17,77	0,245	9,156	1169	0,02045	131,7	0,8002	6,525
	PTE6	20,15	23,47	4,614	0,4991	5,117	851,3	0,162	69,58	0,8328	4,901
	PTE7	7,45	34,68	1,009	0,8185	3,434	395,8	0,3487	14,1	0,9382	2,927

Tableau C.3 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 60\%$ (5h,6h,24h)

$C_{w-ini} = 60\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (%)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (%)
5h	PTE1	83,65	7,38E-03	1,68E-03	8,90E-01	22,33	1,96E-03	1,04E-03	2,123	2,123	40,34
	PTE2	70,95	4,54E-03	1,11E-03	1	14,38	1,40E-03	1,16E-03	0,02963	5,205	51,95
	PTE3	58,25	0,1947	0,01744	0,5484	9,299	17830	1,50E-03	1,37E+05	0,9549	3,778
	PTE4	45,55	36,06	1,934	0,7077	4,607	2,94E+06	4,26E-01	1,10E+05	0,9665	2,561
	PTE5	32,85	37,89	1,626	0,8443	2,382	5525	0,6619	250,6	0,9157	3,031
	PTE6	20,15	55,79	1,383	0,95965	3,457	1593	0,3955	46,16	0,9723	3,398
	PTE7	7,45	73,69	1,14	1,075	4,532	63,6	1,816	0,5978	1,158	5,185
6h	PTE1	83,65	7,83E-03	1,03E-03	1,01E+00	18,24	1,70E-03	1,08E-03	0,03641	2,15	14,89
	PTE2	70,95	3,66E-04	1,49E-03	0,9309	13,8	0,08464	1,27E-03	1,818	5,479	30,39
	PTE3	58,25	0,1338	0,03658	0,3202	35,12	11940	5,65E-04	1,51E+05	0,9393	8,053
	PTE4	45,55	23,16	2,985	0,5426	7,55	3,34E+05	2,44E-01	22350	0,9381	3,316
	PTE5	32,85	37,05	2,153	0,7358	3,849	699,9	0,4382	29,71	0,88	3,646
	PTE6	20,15	38,54	6,271	0,5882	9,203	117,6	0,4357	3,53	0,8293	8,154
	PTE7	7,45	42,24	0,3068	1,02	16,02	8,34E+06	0,3695	1,72E+05	1,012	3,182
24h	PTE1	83,65	1,25E-03	6,77E-04	1,093	29,19	1,99E-02	9,76E-04	0,6874	9,453	40,89
	PTE2	70,95	1,95E-03	7,57E-04	1,06E+00	40,15	3,55E-08	1,28E-03	1,00E+35	0,01518	368,7
	PTE3	58,25	0,2473	0,03788	0,3848	11,18	10950	9,62E-04	66730	0,9465	3,091
	PTE4	45,55	7,307	11,69	0,4462	5,279	2,97E+02	0,1305	7,10E+01	0,6587	6,971
	PTE5	32,85	19,84	0,2481	0,9455	7,25	1,15E+12	1,95E-01	5,68E+10	1	1,721
	PTE6	20,15	49,75	4,988	0,6344	7,921	13,23	0,8401	0,1095	1,242	2,578
	PTE7	7,45	65,19	3,128	0,8381	14,2	721,6	1,365	10,68	0,9752	16,58

Tableau C.4 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 65\%$ (15min, 30 min, 1h)

$C_{w-ini} = 65\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (%)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (%)
15 Min	PTE1	83,65	4,727	9,65E-03	6,50E-01	3,501	2,02E-05	1,21E-05	20,41	1,004	0,9152
	PTE2	70,95	6,197	3,58E-05	8,07E-01	8,488	1185	0,01281	168,5	1,022	1,138
	PTE3	58,25	6,733	8,23E-05	0,911,7	6,429	491,6	0,01897	57,81	1,042	0,7136
	PTE4	45,55	7,345	2,02E-02	0,9454	7,052	1,11E+06	0,01538	1,52E+05	0,992	1,172
	PTE5	32,85	7,59	6,02E-06	0,9102	11,55	36110	0,01149	4318	1,012	0,8989
	PTE6	20,15	8,672	2,53E-06	1,02	13,93	41120	0,01194	4254	1,013	0,6745
	PTE7	7,45	10,15	0,01824	8,78E-01	10,28	1,34E+05	0,01093	1,10E+04	1,001	1,621
30min	PTE1	83,65	1,43	6,72E-04	0,3575	19	5532	1,14E-03	3414	1,014	2,188
	PTE2	70,95	3,251	1,05	0,1266	9,007	1,40E+00	8,61E-03	2,22E-01	1,228	3,047
	PTE3	58,25	7,496	7,30E-05	1,942	20,48	7,38E+05	0,01016	85260	1,013	2,062
	PTE4	45,55	7,433	4,20E-05	2,18E+00	4,682	2,734	0,2963	0,2395	1,225	2,452
	PTE5	32,85	9,186	3,27E-04	1,752	18,48	1,21E+06	0,01566	1,15E+05	1,012	2,171
	PTE6	20,15	10,42	8,53E-04	1,472	11,41	5,75E+05	0,01064	51830	1,006	1,405
	PTE7	7,45	17,86	0,01147	1,289	15,31	91560	0,05482	4665	1,012	1,712
1h	PTE1	83,65	0,4585	4,80E-02	0,2668	28,78	33800	4,13E-04	89090	0,9732	5,058
	PTE2	70,95	2,663	0,5663	0,2041	10,21	2,46E+02	3,32E-03	51,96	1,07	1258
	PTE3	58,25	11,76	7,57E-04	1,748	14,32	9,18E+05	0,03212	66420	1,016	1,005
	PTE4	45,55	14,3	9,08E-03	1,21	14,65	2,13E+06	0,03016	1,36E+05	1,008	1,957
	PTE5	32,85	14,53	4,68E-02	0,9147	10,06	2,26E+11	0,03198	1,54E+10	1	1,767
	PTE6	20,15	14,24	7,24E-02	0,9128	24,26	6,70E+05	0,05386	43980	1,006	4,075
	PTE7	7,45	16,85	3,14E-01	0,6377	15,11	2,96E+06	0,04724	1,93E+05	0,9895	3,266

Tableau C.5 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 65\%$ (2h,3h,4h)

$C_{w-ini} = 65\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (%)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (%)
2h	PTE1	83,65	0,1493	7,30E-02	0,2707	7,373	0,07134	1,40E-03	0,1575	1,168	1,212
	PTE2	70,95	0,6212	0,1447	0,2352	11,22	0,2027	3,71E-03	0,1399	1,258	3,407
	PTE3	58,25	12,1	2,37E-06	0,76	7,634	1,791	0,1057	0,08092	1,701	2,499
	PTE4	45,55	13,89	0,6469	0,5032	12,89	3,054	0,09451	0,1093	1,346	2,973
	PTE5	32,85	19,64	0,1008	0,9254	6,893	5,857	0,1146	0,1843	1,229	1,2
	PTE6	20,15	23,02	0,8266	0,6275	3,636	18,64	0,1079	0,6229	1,017	1,298
	PTE7	7,45	19,34	3,948	0,372	1,686	5,17E+02	0,04347	36,52	0,8829	1,57
3h	PTE1	83,65	0,01862	4,56E-03	6,80E-01	31,54	3,48E-03	1,17E-03	0,03403	2,496	20,47
	PTE2	70,95	0,8138	0,01602	0,6005	4,848	0,3742	2,89E-03	0,3073	1,119	0,6734
	PTE3	58,25	11,14	2,46E-03	1,575	5,581	5,589	0,06761	0,3347	1,207	3,274
	PTE4	45,55	19,75	0,8446	0,6102	10,46	4,632	0,1684	0,1173	1,3	2,498
	PTE5	32,85	29,04	0,5035	0,7681	3,759	81,11	1,31E-01	2,785	0,9749	2,388
	PTE6	20,15	29,47	0,4819	0,7444	23,64	4,00E+06	0,1342	1,39E+05	0,9953	5,369
	PTE7	7,45	41,86	2,088	0,7008	12,87	112,4	0,4038	2,482	0,9625	11,46
4h	PTE1	83,65	0,01344	1,57E-04	7,91E-01	10,71	1,03E-03	9,91E-04	1,00E+35	0,03714	396,8
	PTE2	70,95	7,844	0,1574	0,6881	9,786	1,856	0,0541	0,1289	1,29*5	1,25
	PTE3	58,25	19,88	3,58	0,4307	1,672	590,3	0,06601	46,95	0,8648	1,593
	PTE4	45,55	23,76	2,796	0,5271	3,579	1296	0,1214	103,6	0,8652	3,849
	PTE5	32,85	29,16	2,618	0,59	2,128	1481	0,1821	99,34	0,8668	2,325
	PTE6	20,15	56,11	8,843	0,5795	13,62	3660	0,6052	152,4	0,8291	12
	PTE7	7,45	71,5	2,953	0,7966	12,89	492,9	0,9781	7,263	0,9543	12,79

Tableau C.6 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 65\%$ (5h,6h et 24h)

$C_{w-ini} = 65\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (‰)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (‰)
5h	PTE1	83,65	0,01344	1,57E-04	1,38E+00	20,71	1,03E-03	9,91E-04	1,00E+35	0,03714	396,8
	PTE2	70,95	4,931	0,06445	0,7038	7,041	1,968	0,02097	0,2609	1,146	2,683
	PTE3	58,25	16,92	6,188	0,4044	4,434	1370	0,08029	173,6	0,8131	4,158
	PTE4	45,55	55,7	1,162	0,875	4,102	1602	5,75E-01	33,6	0,9636	3,792
	PTE5	32,85	78,02	4,425	0,7185	8,409	2240	0,8404	43,04	0,9036	9,545
	PTE6	20,15	86,37	6,357	0,6228	6,973	5419	0,6065	111,7	0,8873	7,351
	PTE7	7,45	119,2	1,144	1,009	4,667	229,9	1,243	1,676	1,034	4,287
6h	PTE1	83,65	4,931	0,06445	0,7038	7,041	1,968	0,02097	0,2609	1,146	2,683
	PTE2	70,95	5,119	8,269	0,1833	14,91	2,909	0,1187	0,08745	1,39	3,77
	PTE3	58,25	25,58	5,545	0,5162	4,088	1433	0,2006	143,8	0,8031	4,314
	PTE4	45,55	36,66	3,016	0,6458	2,447	144,4	0,3332	4,803	2,849	2,847
	PTE5	32,85	74,14	2,821	0,7841	4,364	695,8	7,97E-01	11,8	0,9254	5,316
	PTE6	20,15	76,99	0,5792	1,062	5,591	46,16	0,9207	0,4225	1,141	4,442
	PTE7	7,45	93,13	5,112	0,69	3,904	3114	0,7352	63,86	0,8877	4,053
24h	PTE1	83,65	1,04E-02	6,75E-05	1,60E+00	10,4	6,82E-03	1,04E-03	1,165	6,2285	12,43
	PTE2	70,95	2,21E-04	5,21E-04	1,169	16,38	8,28E-09	1,11E-03	0,1204	1,536	93,3
	PTE3	58,25	10,54	0,1103	0,9037	6,336	3,128	0,09111	0,1792	1,223	1,46
	PTE4	45,55	68,71	3,925	0,7056	6,891	1382	0,6728	29,65	0,8998	7,432
	PTE5	32,85	85,4	0,5927	1,08	7,036	43,29	1,051	0,3454	1,168	5,435
	PTE6	20,15	79,46	14,84	0,4042	23,36	2138	2,86E-01	34,73	0,8928	17,42
	PTE7	7,45	134,5	0,5692	0,692	2,234	30900	0,7983	209,3	1,013	1,631

Tableau C.7 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 70\%$ (15min, 30min, 1h)

$C_{w-ini} = 70\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (‰)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (‰)
15 Min	PTE1	83,65	15,06	2,58E-02	9,50E-01	0,9766	1,41E+01	1,18E-01	0,6911	1,126	0,9697
	PTE2	70,95	15,78	2,65E-01	7,91E-01	8,844	402,5	0,08118	28,65	0,9695	6,252
	PTE3	58,25	16,76	1,424	5,44E-01	14,17	3,16E+02	0,08034	2,57E+01	0,9031	10,32
	PTE4	45,55	18,25	4,38E-01	7,53E-01	13,37	130,5	0,1093	7,561	0,966	9,623
	PTE5	32,85	18,8	3,83E-02	8,50E-01	2,607	482,3	0,1051	19,91	1,052	1,175
	PTE6	20,15	19,51	6,81E-02	9,20E-01	3,214	3,69E+02	0,1364	1,49E+01	1,052	1,796
	PTE7	7,45	19,93	1,06E-02	8,40E-01	16,82	270,2	0,1813	9,61	1,078	11,52
30min	PTE1	83,65	15,06	2,58E-02	9,50E-01	0,9766	1,41E+01	1,18E-01	0,6911	1,126	0,9697
	PTE2	70,95	12,36	8,46E-01	6,41E-01	18,81	423,8	0,105	46,25	0,9173	16,09
	PTE3	58,25	14,32	0,01391	1,32	1,546	3,12E+01	8,51E-02	1,70E+00	1,084	0,8581
	PTE4	45,55	16,38	0,08621	0,9857	4,681	5,24E+02	8,38E-02	3,01E+01	1,01	3,256
	PTE5	32,85	16,91	1,17E-01	0,985	15,25	1,47E+04	0,122	641,1	1,033	10,66
	PTE6	20,15	21,92	1,36E-01	0,9902	3,597	1,21E+01	0,1572	0,3957	1,117	1,758
	PTE7	7,45	27,39	0,04501	0,799	11,69	3,477	0,4839	0,06699	1,907	6,036
1h	PTE1	83,65	3,075	2,52E-02	0,95	4,494	1,222	4,59E-02	0,2592	0,2592	3,474
	PTE2	70,95	13,22	1,90E-03	0,93	5,555	1,00E+35	1,45E-03	1,00E+35	0,5325	138,8
	PTE3	58,25	16,18	2,50E-02	0,91	3,43	1,78E+02	0,1279	8,039	1,079	2,7
	PTE4	45,55	16,4	1,11E-04	2,263	4,515	9,31E+00	0,0891	3,69E-01	1,222	2,216
	PTE5	32,85	16,3	2,45E-08	0,8911	12,44	2,03E+00	0,1496	0,0662	1,892	1,15
	PTE6	20,15	16,371	3,36E-12	0,85	10,92	2,38E+00	0,1191	7,73E-02	1,67	5,866
	PTE7	7,45	19,38	0,1688	0,9289	10,13	6,68E+02	1,41E-01	23,68	1,06	0,3296

Tableau C.8 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 70\%$ (2h,3h,4h)

$C_{w-ini} = 70\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (%)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (%)
2h	PTE1	83,65	0,4606	5,13E-02	0,3304	16,17	14380	8,36E-04	39730	0,9649	2,917
	PTE2	70,95	28,06	0,08845	1,121	11,81	1088	0,1836	30,96	1,041	7,448
	PTE3	58,25	30,02	0,1458	1,018	2,09	23,17	0,1901	0,5885	1,088	1,022
	PTE4	45,55	55,08	0,3251	1,012	3,232	39,97	0,4002	0,5499	1,089	1,771
	PTE5	32,85	63,08	0,8319	0,8308	1,99	2,36E+06	0,03067	1,19E+06	0,7895	12,23
	PTE6	20,15	72,68	1,071	0,4	5,55	4,63E+09	0,8032	6,05E+07	1,001	5,071
	PTE7	7,45	76,77	0,1659	1,282	4,488	598,1	0,8015	5,144	1,144	1,764
3h	PTE1	83,65	0,4606	5,13E-02	0,3304	16,17	14380	8,36E-04	39730	0,9649	2,917
	PTE2	70,95	5,919	7,453	0,1937	6,849	121,3	8,32E-03	12,21	0,8799	4,644
	PTE3	58,25	22,72	0,2036	0,9911	10,59	8,959	0,2369	2,58E-01	1,174	8,475
	PTE4	45,55	19,36	2,055	0,5136	5,66	40,14	0,09358	1,951	0,9142	4,282
	PTE5	32,85	40,71	0,292	1,009	4,156	14,82	0,3869	0,2351	1,192	1,098
	PTE6	20,15	46	1,909	0,7229	1,93	2279	0,3471	80,7	0,9075	2,169
	PTE7	7,45	131	0,195	1,226	1,123	243,6	0,7326	1,495	1,072	0,8361
4h	PTE1	83,65	0,7773	4,51E-05	1,69E+00	15,66	103	1,62E-03	117,1	1,021	2,707
	PTE2	70,95	18,79	0,2717	0,8156	3,091	24,83	0,1024	1,15	1,011	2,15
	PTE3	58,25	25,36	4,06	0,5706	11,85	58,7	0,2436	2,448	0,8387	11,66
	PTE4	45,55	27,86	0,2267	0,9792	4,723	471,1	0,205	16,57	1,002	3,488
	PTE5	32,85	34,67	0,1445	1,212	2,476	9,549	0,5333	0,1653	1,353	0,6386
	PTE6	20,15	36,14	0,03936	1,5	2,854	7,174	0,6267	0,1128	1,626	0,9834
	PTE7	7,45	37,5	0,2466	1,033	1,374	239,3	0,3027	5,822	1,021	1,002

Tableau C.9 Données de caractérisation rhéologiques obtenues $C_{w-ini} = 70\%$ (5h,6h et 24h)

$C_{w-ini} = 70\%$											
	Echan.	Hauteur (cm)	Herschel-Buckley				Cross				
			τ_{HB} (Pa)	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	n_{HB}	SE (‰)	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	k_c (s)	$m\alpha$	SE (‰)
5h	PTE1	83,65	0,2084	4,06E-02	7,25E-01	31,09	27,25	8,57E-03	179,4	0,8781	6,608
	PTE2	70,95	28,87	0,7665	0,8265	9,247	3,53E+06	0,3268	1,35E+05	0,9879	3,049
	PTE3	58,25	33,44	0,267	1,063	2,751	19,75	0,4218	0,4116	1,141	2,342
	PTE4	45,55	34,73	0,1504	1,147	4,524	9,31	0,422	0,1609	1,315	1,503
	PTE5	32,85	36,35	0,4998	0,864	0,864	1,06E+06	0,2635	29310	0,9971	3,036
	PTE6	20,15	37,09	0,9436	0,8317	19,53	1,50E+07	4,32E-01	4,15E+05	0,9949	4,973
	PTE7	7,45	37,75	0,2485	1,101	6,245	40,45	0,4721	0,7927	1,115	5,035
6h	PTE1	83,65	1,48E-03	1,27E-03	9,82E-01	35,01	0,02075	1,20E-03	0,9343	7,783	29,96
	PTE2	70,95	21,64	0,09135	0,7701	16,21	5,40E+24	0,03156	2,47E+23	1	2,78
	PTE3	58,25	25,42	1,961	0,5994	2,969	156,1	0,1496	8,008	0,8861	2,216
	PTE4	45,55	34,09	0,8424	0,7864	1,755	93,56	0,2413	2,829	0,95223	0,9223
	PTE5	32,85	41,48	0,8863	0,8127	3,415	22,99	3,58E-01	0,3926	1,072	1,388
	PTE6	20,15	73,49	0,9011	0,9542	3,79	3727	0,7129	51,12	0,9958	3,148
	PTE7	7,45	135,1	0,7872	1,018	2,929	5,50E+05	0,879	3810	1,007	2,349
24h	PTE1	83,65	1,10E-04	7,06E-04	1,08E+00	18,02	1,00E+35	8,94E-04	1,00E+35	0,6589	78,77
	PTE2	70,95	21,64	0,09135	0,7701	16,21	5,40E+24	0,03156	2,47E+23	1	2,78
	PTE3	58,25	46,79	16,87	0,4202	5,816	32,96	0,5264	0,2933	0,9853	3,793
	PTE4	45,55	79,34	1,998	0,5997	41,72	11,78	0,6612	0,07033	1,594	23,89
	PTE5	32,85	112	1,05E-04	2,629	21,86	1165	0,442	6,425	1,116	12,62
	PTE6	20,15	140,6	0,2425	1,267	2,044	541,9	1,083	2,963	1,081	1,289
	PTE7	7,45	145,4	8,11E-13	6,707	6,935	43,36	7,40E-01	0,174	1,358	4,36

ANNEXE D CALCUL DE L'INDICE DE SÉGRÉGATION

Tableau D.1 Exemple de calcul de l'indice de ségrégation IS-65% référence tirée de l'équation (2.33).

		Hauteur (cm)	w (%)	H _i (cm)	C _{wi}	(C _{wi} - C _{wmoy}) ²	H _i *(C _{wi} -C _{wmoy}) ²
15 Min	PTE1	83,65	0,68	12,7	0,60	0,001261033	0,016015119
	PTE2	70,95	0,60	12,7	0,62	5,47124E-05	0,000694847
	PTE3	58,25	0,58	12,7	0,63	9,51521E-07	1,20843E-05
	PTE4	45,55	0,57	12,7	0,64	1,66202E-05	0,000211077
	PTE5	32,85	0,55	12,7	0,65	0,000230979	0,002933437
	PTE6	20,15	0,56	12,7	0,64	9,3196E-05	0,001183589
	PTE7	7,45	0,55	12,7	0,64	0,000169098	0,002147539
				ΣH _i	88,9		
				C _{wmoy}	0,63		
						ΣH _i *(C _{wi} -C _{wmoy}) ²	0,023198
				IS	0,016154		

Tableau D.2 Valeurs obtenues des calculs des indices de ségrégations pour chaque C_{w-ini}

Temps	$IS-C_{w-ini}=60\%$	$IS-C_{w-ini}=65\%$	$IS-C_{w-ini}=70\%$
15 min	0,032	0,016	0,04
30 min	0,064	0,048	0,019
1h	0,117	0,122	0,066
2h	0,132	0,175	0,012
3h	0,166	0,174	0,005
4h	0,230	0,027	0,008
5h	0,178	0,033	0,006
6h	0,197	0,021	0,011
24h	0,158	0,028	0,007