



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 l'auteur 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'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

**Étude expérimentale des conditions physico-rhéologiques du
phénomène de ségrégation lors du dépôt hydraulique des résidus
miniers dans les parcs à résidus**

SAADOU OUMAROU DANNI

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie minéral

Décembre 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

**Étude expérimentale des conditions physico-rhéologiques du
phénomène de ségrégation lors du dépôt hydraulique des résidus
miniers dans les parcs à résidus**

présenté par **Saadou OUMAROU DANNI**

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

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

Faneva RARISON, président

Tikou BELEM, membre et directeur de recherche

Mamert MBONIMPA, membre et codirecteur de recherche

Abdelkabir MAQSOUD, membre et codirecteur de recherche

Benoît COURCELLES, membre externe

DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui m'ont appris une science utile dans ma vie, à commencer par **ma mère** et **mon père**, pour leur éducation hors pair.*

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire est l'aboutissement d'un projet de recherche exigeant dont la portée et la qualité ont été considérablement enrichies par un soutien institutionnel et humain constant. Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes et entités qui, par leur contribution directe ou indirecte, ont permis de mener à bien ce parcours académique.

Mon premier devoir est de remercier sincèrement mon directeur de recherche, le Professeur Tikou Belem, pour la confiance qu'il m'a accordée, son encadrement rigoureux et la précieuse richesse de ses conseils prodigués à chaque étape de cette recherche. Son expertise reconnue et sa disponibilité constante ont été des atouts majeurs et déterminants pour l'aboutissement de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à mes codirecteurs, le Professeur Mamert Mbonimpa et le Professeur Abdelkabir Maqsoud, dont l'accompagnement scientifique et les suggestions constructives ont grandement enrichi la perspective et la portée de ce mémoire. Leurs regards complémentaires ont été essentiels à l'approfondissement de la thématique.

Je suis redevable à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), à l'Institut de recherche en mines et environnement (IRME) et à l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) pour avoir mis à ma disposition les ressources humaines, matérielles et financières nécessaires à la conduite de cette étude dans d'excellentes conditions.

Je tiens en particulier à souligner l'appui financier crucial qui a rendu ce projet possible, notamment celui octroyé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Cet appui a été dispensé à travers les subventions de recherche et développement coopérative (RDC), dans le cadre du projet conjointement dirigé par les Professeurs Mbonimpa et Belem.

J'exprime ma reconnaissance à mes collègues de laboratoire, aux techniciens et au personnel administratif de l'IRME, dont la collaboration active et la richesse des échanges quotidiens ont créé un environnement de travail stimulant.

Enfin, je ne saurais clore ces remerciements sans mentionner l'appui indéfectible de ma famille et de mes proches. Leur patience, leurs encouragements constants et leur soutien moral profond ont été la source de persévérance essentielle à l'achèvement de cette démarche académique.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

RÉSUMÉ

Cette recherche s'inscrit dans une démarche visant à caractériser expérimentalement la ségrégation granulométrique observée lors du dépôt hydraulique des résidus miniers en pulpe. L'approche adoptée combine l'analyse des propriétés physiques et rhéologiques des résidus, à la fois en conditions d'écoulement dans un parc à résidus et dans un canal d'écoulement expérimental.

Les essais rhéologiques réalisés sur les échantillons de résidus miniers ont mis en évidence un comportement non newtonien de type pseudo-plastique, marqué par un faible seuil de cisaillement correspondant à la contrainte minimale nécessaire pour initier le mouvement. Le modèle décrivant cet écoulement se situe entre les modèles de Herschel-Bulkley et de Bingham, traduisant une diminution progressive de la viscosité sous l'effet du taux de cisaillement appliqué.

Bien qu'aucune tendance claire ne se dégage de l'analyse des échantillons prélevés directement dans les résidus en écoulement au sein du parc à résidus, les observations issues des essais en canal, réalisés pour une concentration massique de 62% et une pente de 0,5%, confirment l'existence d'une ségrégation granulométrique progressive. L'écoulement, quasi laminaire et stable, favorise la séparation naturelle des particules selon leur taille et leur densité : les particules fines sont transportées vers l'aval, tandis que les particules plus grossières se déposent rapidement en amont. Cette dynamique induit une évolution marquée des propriétés physiques du dépôt, notamment des variations significatives de la granulométrie, de la concentration en solides et de la densité relative.

Ces modifications influencent directement les propriétés rhéologiques de la pulpe en aval, qui devient progressivement plus homogène, moins dense et moins visqueuse, avec une diminution notable du seuil de cisaillement. Un résultat déterminant concerne ainsi l'hétérogénéité spatiale des propriétés mesurées lors des essais en canal : la viscosité apparente et le seuil de cisaillement diminuent régulièrement avec la distance au point de déversement. Cette tendance est attribuée à la décantation rapide des particules grossières et denses en amont, entraînant une fluidification graduelle de la pulpe au cours de son écoulement.

Les résultats obtenus apportent un éclairage essentiel sur les mécanismes de ségrégation granulométrique en contexte réel et soulignent l'importance d'une maîtrise fine de ces phénomènes pour optimiser la gestion durable des résidus miniers, notamment dans la perspective du contrôle de la nappe phréatique surélevée (NPS) au sein des parcs à résidus.

ABSTRACT

This research aims to experimentally characterize the granulometric segregation observed during the hydraulic deposition of mine tailings in slurry form. The adopted approach combines the analysis of the physical and rheological properties of tailings under flow conditions, both within a tailings storage facility (TSF) and in an experimental flume.

Rheological tests conducted on tailings samples highlight a non-Newtonian, shear-thinning behavior characterized by the presence of a low shear yield stress, indicating the minimum stress required to initiate motion. The flow model falls between the Herschel–Bulkley and Bingham models, reflecting a progressive decrease in viscosity with increasing applied shear rate.

Although no clear trend emerges from the analysis of samples collected directly from flowing tailings within the TSF, observations from flume tests conducted at a solids mass concentration of 62% and a slope of 0.5% confirm the existence of progressive granulometric segregation. The flow, which is quasi-laminar and remarkably stable, promotes the natural separation of particles according to their size and density: finer particles are transported downstream, while coarser particles rapidly settle upstream. This process leads to a marked evolution of the physical properties of the deposit, including significant variations in particle size distribution, solids concentration, and relative density.

These changes directly affect the downstream rheological properties of the slurry, which becomes progressively more homogeneous, less dense, and less viscous, accompanied by a notable reduction in yield stress. A key finding concerns the spatial heterogeneity of the measured properties during the flume tests, as both apparent viscosity and yield stress decrease consistently with increasing distance from the discharge point. This trend is attributed to the rapid settling of coarse and dense particles upstream, resulting in a gradual fluidization of the slurry as it flows.

The results provide essential insight into the mechanisms governing granulometric segregation under realistic conditions and highlight the importance of accurately controlling these processes to optimize the sustainable management of mine tailings, particularly with respect to controlling the elevated water table with monolayer covers (EWT) within tailings storage facilities.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVI
LISTE DES ANNEXES	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	19
1.1 Contexte de l'étude.....	19
1.2 Problématique.....	21
1.3 Objectifs du projet	21
1.4 Hypothèse de recherche	21
1.5 Structure du mémoire	22
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	23
2.1 Caractéristiques physiques et hydrogéotechniques des résidus miniers	23
2.2 Méthodes de dépôt des résidus miniers.....	26
2.2.1 Méthode conventionnelle de gestion des résidus miniers	26
2.2.1.1 Types de digue de retenue.....	27
2.2.1.2 Instabilité et rupture des digues.....	32
2.2.1.3 Méthodes alternatives de gestion : résidus densifiés.....	34
2.2.1.3.1 Résidus épaisse.....	34

2.2.1.3.2 Résidus en pâte.....	35
2.2.1.3.3 Résidus asséchés par filtrage.....	37
2.2.2 Drainage minier contaminé	37
2.2.2.1 Production du drainage minier acide.....	38
2.2.2.2 Production du drainage neutre contaminé	40
2.2.2.3 Techniques de prévention du drainage minier acide	40
2.3 Ségrégation hydraulique des suspensions solides-liquide.....	45
2.3.1 Généralités.....	45
2.3.2 Théorie de la ségrégation particulaire	45
2.3.3 Propriétés des suspensions solides-liquide.....	46
2.3.3.1 Pourcentage ou concentration en solides	47
2.3.3.2 Granulométrie.....	48
2.3.3.3 Dynamique de la suspension solides-liquide	49
2.3.4 Théorie de la sédimentation des suspensions solides-liquide	50
2.3.5 Caractéristiques de la ségrégation et l'écoulement granulaire	52
2.4 Rhéologie des suspensions solides-liquide	53
2.4.1 Types de fluide	53
2.4.2 Détermination des caractéristiques rhéologiques des fluides.....	57
2.4.2.1 Types de rhéomètres.....	57
2.4.2.2 Méthodes d'estimation indirecte des paramètres rhéologiques.....	58
2.5 Corrélation entre la rhéologie et la ségrégation hydraulique	58
2.6 Essais d'écoulements en canal (<i>flume test</i>)	59
CHAPITRE 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	61
3.1 Approches expérimentales	61

3.2	Échantillonnage des résidus miniers	64
3.3	Essais d'écoulement en canal (<i>Flume tests</i>).....	67
3.3.1	Dispositif expérimental	67
3.4	Caractérisation physique des résidus miniers.....	72
3.4.1	Teneur en eau massique	73
3.4.2	Distribution granulométrique	74
3.4.3	Densité relative.....	76
3.5	Caractérisation minéralogique.....	77
3.6	Analyse géochimique du surnageant.....	78
3.7	Essais rhéologiques	78
	CHAPITRE 4 RÉSULTATS	80
4.1	Écoulement à surface libre dans le parc à résidus de la mine MCM	80
4.1.1	Concentration massique en solides (C_w)	80
4.1.2	Distributions granulométriques	81
4.1.3	Évolution des paramètres granulométriques en fonction de la distance d'échantillonnage	85
4.1.4	Densité relative des grains solides	86
4.1.5	Analyses minéralogiques.....	87
4.1.6	Paramètres physico-chimiques de l'eau surnageante	88
4.1.7	Essais rhéologiques	92
4.1.7.1	Procédure expérimentale appliquée	92
4.1.7.2	Variation des propriétés rhéologiques en fonction de la position des points d'échantillonnage dans le parc à résidus	93
4.2	Essais d'écoulement en canal avec les résidus de la mine Goldex	97

4.2.1	Analyse de l'évolution spatiale de la vitesse lors de l'essai d'écoulement en canal	97
4.2.2	Évolution de la granulométrie en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal	98
4.2.3	Évolution de la concentration massique en solides et de la densité relative des grains solides le long du canal	100
4.2.4	Évolution des propriétés rhéologiques en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal	101
4.2.5	Synthèse des phénomènes observés lors de l'essai d'écoulement en canal	103
CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		105
5.1	Conclusions	105
5.2	Recommandations	106
RÉFÉRENCES		108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Comparaison de certaines propriétés physiques et hydrogéotechniques de résidus miniers provenant de mines du Québec et du Canada en général (Bussière, 2007)	25
Tableau 2.2 Classification des principaux incidents selon les causes probables (adapté des données de la CIGB, (2001) par Aubertin et al., 2002d).....	33
Tableau 2.3 Types de drainage minier et leurs caractéristiques (tiré d'Aubertin et al. (2002a))..	38
Tableau 2.4 Comparaison des trois principales techniques de restauration des sites miniers (inspiré d'(Awoh et al., 2013; Bussière & Guittonny, 2020; Kachhwal, 2011).....	44
Tableau 3.1 Principaux équipements et matériels utilisés pour les essais d'écoulement en canal	69
Tableau 4.1 Teneur en eau massique et concentration massique en solides des échantillons de résidus miniers en écoulement (ST1 à ST14) du parc à résidus MCM.....	81
Tableau 4.2 Paramètres caractéristiques de la distribution granulométrique des échantillons de résidus miniers de la MCM.	84
Tableau 4.3 Densité relative des grains solides des résidus miniers en écoulement de MCM.	86
Tableau 4.4 Pourcentages des différents minéraux composant les échantillons.....	87
Tableau 4.5 Analyse physico-chimique de l'eau surnageante des résidus de la MCM.	89
Tableau 4.6 Propriétés rhéologiques déterminées.....	94
Tableau 4.7 Synthèse des variations des propriétés granulométriques, densimétriques et rhéologiques des résidus lors de l'essai d'écoulement en canal.....	104
Tableau A. 5.1 Données des tests rhéologiques réalisés sur les différents échantillons.	145

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Distribution granulométrique de résidus miniers prélevés dans des mines de roche dure canadiennes avant leur dépôt dans le parc à résidus (Bussière, 2007)	24
Figure 2.2 Entreposage des résidus miniers sous forme hydraulique (Aubertin et al., 2002a).....	26
Figure 2.3 Barrage de type à retenue d'eau pour le stockage des résidus miniers (Vick, 1990) ..	28
Figure 2.4 Construction d'une digue par la méthode amont : montée des digues par la méthode hydraulique (Aubertin et al., 2002a)	29
Figure 2.5 Construction d'une digue par la méthode aval au moyen d'hydrocyclones (EPA, 1995)	30
Figure 2.6 Construction d'une digue par la méthode d'axe central (Vick, 1990) : a) digue d'amorçage, b) 1 ^{er} rehaussement, c) 2 ^e rehaussement, d) 3 ^e rehaussement	31
Figure 2.7 Entreposage de résidus miniers sous forme épaisse dans un parc à résidus (ministère des Mines du Chili, 2021).	35
Figure 2.8 Résidus en pâte de surface du site minier de Bulyanhulu, Tanzanie (Belem, 2023)...	36
Figure 2.9 Exemple de résidus asséchés et transportés par convoyeur (Cavali, 2017).....	37
Figure 2.10 Zonation granulométrique créée par la ségrégation hydraulique des résidus miniers au cours de leur dépôt; zone 1 est la zone de la plage, zone 2 est la zone intermédiaire et zone 3 est celle de la décantation des particules fines en suspension (MEND, 2001).	46
Figure 2.11 Différentes géométries des particules (Coussot, 2017)	49
Figure 2.12 Forces appliquées sur une particule sphérique dans un liquide.	51
Figure 2.13 Représentation schématique d'un écoulement unidirectionnel cisaillé.....	54
Figure 2.14 Courbes d'écoulement (rhéogrammes) des principaux comportements rhéologiques de fluides non-newtoniens indépendants du temps.....	56
Figure 3.1 Organigramme des travaux à entreprendre au laboratoire.....	63

Figure 3.2 Localisation des mines (Canadian Malartic et Goldex) et emplacements physiques de prélèvement des échantillons de résidus miniers en écoulement dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic (MCM).....	65
Figure 3.3 Campagne d'échantillonnage et de mesure sur le parc à résidus de la mine Canadian Malartic (MCM) : a) Ordinateur et Data logger, b) vélocimètre, c) mesures des vitesses, d) points d'échantillonnage, e) bouteille d'échantillonnage verticale, f) bouteille d'échantillonnage horizontale.	66
Figure 3.4 Vue schématique et image réelle du canal (après installation complète) avec les distances d'échantillonnage.	68
Figure 3.5 Illustration des différentes étapes de l'essai d'écoulement en canal, allant de la préparation de la pulpe aux prélèvements des échantillons.	72
Figure 3.6 Étapes de préparation des échantillons au laboratoire.	73
Figure 3.7 Granulomètre laser Mastersizer 3000 de Malvern Panalytical utilisé.	75
Figure 3.8 Pycnomètre à hélium utilisé.....	76
Figure 3.9 Sonde de mesure du potentiel redox.....	78
Figure 3.10 Rhéomètre AR2000 de l'URSTM.....	79
Figure 4.1 Juxtaposition des courbes de distribution granulométrique des différents échantillons de résidus miniers MCM : A) échantillons du 1 ^{er} jour de la campagne d'échantillonnage (écoulement le long de la digue); B) échantillons du 2 ^e jour de la campagne d'échantillonnage (écoulement dans la direction normale à celle du 1 ^{er} jour).	83
Figure 4.2 Évolution des paramètres granulométriques en fonction de la distance d'échantillonnage	86
Figure 4.3 Évolution des phases minérales dominantes dans les échantillons de résidus miniers de la MCM (échantillons récoltés lors du premier jour de la campagne).....	88
Figure 4.4 Comparaison des valeurs de température mesurées dans les échantillons de résidus miniers MCM.	89

Figure 4.5 Comparaison des valeurs de pH mesurées dans les échantillons de résidus miniers MCM.	90
.....
Figure 4.6 Comparaison des valeurs de conductivité électrique mesurées dans les échantillons de résidus miniers de la MCM.	91
Figure 4.7 Comparaison des valeurs de potentiel redox mesurées dans les échantillons de résidus miniers de la MCM.	91
Figure 4.8 Rhéogrammes (colonne de gauche) et courbes de viscosité (colonne de droite) illustrant la variation des propriétés rhéologiques des résidus en fonction du point d'échantillonnage.	95
.....
Figure 4.9 variation du seuil de cisaillement en fonction de la position des points d'échantillonnage.	96
.....
Figure 4.10 Évolution des paramètres rhéologiques en fonction de la distance d'échantillonnage.	97
.....
Figure 4.11 Profil des vitesses d'écoulement le long du canal lors de l'essai d'écoulement.....	98
Figure 4.12 Courbes granulométriques cumulées des échantillons en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal.....	99
Figure 4.13 Variation des diamètres caractéristiques (D_{10} , D_{20} , D_{50} , D_{80}) et du coefficient d'uniformité (C_U) selon la distance d'échantillonnage.	100
Figure 4.14 Évolution de la concentration massique en solides (C_w) et de la densité relative des grains solides (G_s) selon la distance dans le canal.	101
Figure 4.15 Évolution du seuil de cisaillement de Bingham (τ_B) en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal.....	102
Figure 4.16 Évolution de la viscosité dynamique de Sisko à taux de cisaillement infini en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal.	103
Figure A.5.1 Courbes de distribution granulométrique des 14 échantillons de résidus miniers de la MCM.	117

Figure A.5.2 Comparaison des courbes granulométriques des échantillons testés à l'état humide et à l'état sec.	124
--	-----

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEV	Valeur d'Entrée d'Air
C_c	Coefficient de courbure
CE	Commission Européenne
CEBC	Couverture avec Effet de Barrière Capillaire
CIGB	Commission Internationale des Grands Barrages
CRE	Capacité de Rétention d'eau
C_u	Coefficient d'uniformité
C_w	Pourcentage solide massique
D_{10}	Diamètre correspondant au 10% du passant cumulé
D_{30}	Diamètre correspondant au 30% du passant cumulé
D_{50}	Diamètre correspondant au 50% du passant cumulé, également appelé médian
D_{60}	Diamètre correspondant au 60% du passant cumulé
D_{90}	Diamètre correspondant au 90% du passant cumulé
DMA	Drainage Minier Acide
DNA	Drainage Neutre Contaminé
DRX	Diffractométrie de Rayons X
EC	Conductivité électrique
Eh	Potentiel redox
GPS	Global Positioning System
Gs ou Dr	Densité des grains solides
K	Coefficient de consistance
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée
MCM	Mine Canadian Malartic

n	Indice d'écoulement
NPS	Nappe Phréatique Surélevée
$P_{20\mu\text{m}}$	Pourcentage de particules inférieures à $20\mu\text{m}$
$P_{80\mu\text{m}}$	Pourcentage de particules inférieures à $80\mu\text{m}$
pH	Potentiel hydrogène
R_e	Nombre de Reynolds
S_t	Nombre de Stockes
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale
USCS	Unified Soil Classification System
w	Teneur en eau
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement
τ	Contrainte de cisaillement
τ_0	Seuil de cisaillement
μ ou η	Viscosité dynamique
ρ	Masse volumique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A COURBES GRANULOMÉTRIQUES.....	116
5.2.1 A1. Effet de l'état des échantillons de résidus (sec ou humide) sur les résultats du test granulométrique	122
ANNEXE B DIFFRACTOGRAMME OBTENUS AU DRX	125
ANNEXE C RHÉOGRAMMES OBTENUS	129

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

Pendant le processus d'extraction de minerai, l'industrie minière ne produit pas que des minéraux utiles au développement socio-économique et technologique de la société. En effet, l'exploitation minière est également synonyme de génération de millions de tonnes de rejets solides (Aubertin et al., 2002d; Bussière, 2007). Les principaux rejets miniers solides générés par l'exploitation minière sont :

- Le mort-terrain qui résulte du décapage du sol;
- Les stériles miniers issus des opérations d'extraction;
- Les rejets de concentrateurs produits lors du traitement minéralurgique;
- Les boues provenant du traitement chimique des eaux minières.

Cependant, les stériles miniers (roches sans valeur économique à extraire pour accéder au gisement) et les rejets de concentrateur (minerai extrait du gisement, concassé et broyé afin d'en extraire les valeurs économiques) constituent les deux principaux rejets solides de l'industrie minière (Aubertin et al., 2002a; Aznar-Sánchez et al., 2018; Hudson-Edwards & Dold, 2015; ICOLD, 1996).

Depuis les années 30, l'industrie minière a développé des méthodes de stockage dites conventionnelles pour la gestion des résidus miniers (Bussière, 2007). Ainsi, les rejets de concentrateurs sont souvent transportés par pompage et entreposés sous forme de pulpe dans des aires d'accumulation appelées parcs à résidus. Les roches stériles, composées en grande partie de roches de granulométrie assez grossière, sont stockées en surface sous forme d'empilements appelés haldes (Aubertin et al., 2002a).

Toutefois, au fil du temps, de nombreux problèmes de stabilité physique et chimique ont été observés dans la gestion de ces résidus avec l'application de ces méthodes conventionnelles. Ces problèmes concernent principalement la gestion des rejets de concentrateur en raison des propriétés

hydrogéotechniques et minéralogiques particulières qu'ils possèdent. En effet, l'exposition à l'eau (H_2O) et à l'air (O_2) des rejets miniers contenant des sulfures métalliques favorise leur oxydation. En l'absence de minéraux acidovores, tels que les carbonates, capables de neutraliser l'acidité, un drainage minier acide (DMA) peut être généré (Moncur et al., 2009; Moses et al., 1987; Nicholson et al., 1988). Sans son traitement, le DMA pourrait contaminer les effluents miniers, entraînant ainsi des conséquences désastreuses pour l'environnement (Aubertin et al., 2002b). Pour être conforme aux réglementations environnementales en vigueur, l'opérateur minier a l'obligation de restaurer son site avant la fermeture. Ainsi, pour optimiser la gestion des rejets potentiellement producteurs d'acidité, de nouvelles méthodes d'entreposage en surface, considérées comme alternatives aux méthodes conventionnelles, ont été développées. Ces méthodes, telles que la densification des résidus ou encore l'introduction de roches stériles comme inclusions dans les parcs à résidus, visent à améliorer la stabilité physique et chimique des rejets de concentrateur ou résidus miniers.

De nos jours, plusieurs méthodes de restauration permettant de prévenir la formation du DMA sont utilisées. Ces mesures de prévention visent à constituer une barrière à la production du DMA en inhibant les réactions d'oxydation des sulfures. Ceci est possible en excluant un ou plusieurs éléments réactifs (minéraux sulfureux, H_2O , O_2) nécessaires à la production du DMA.

Il faut noter que le dépôt hydraulique des résidus miniers dans les parcs sous forme de pulpe (pourcentage de solides $C_w \leq 45\%$) peut être suivi d'une ségrégation matérialisée par une variabilité granulométrique à travers le parc à résidus (Blight & Bentel, 1983; Blight & Steffen, 1979). Une telle ségrégation des particules de résidus miniers peut s'expliquer par la dynamique d'écoulement : les matériaux fins sont transportés beaucoup plus loin par l'eau que les matériaux grossiers. Plus l'on est proche du point de déversement, plus l'on aura des grains grossiers, plus l'on va vers l'aval du point de déversement, plus l'on aura des matériaux fins.

Cette ségrégation des particules de résidus miniers, si elle a lieu, pourrait avoir un impact sur certaines propriétés, notamment la conductivité hydraulique et la capacité de rétention d'eau des résidus, ainsi que sur la position dynamique de la nappe phréatique. En effet, les matériaux fins ont une conductivité hydraulique faible (meilleure capacité de rétention d'eau) à l'inverse des matériaux grossiers qui ont une conductivité hydraulique plus élevée et une capacité de rétention d'eau plus faible. Cette hétérogénéité spatiale provoquée par la ségrégation par dépôt hydraulique

peut être néfaste car elle pourra influer sur l'écoulement, la diffusion des gaz et le comportement géochimique des résidus miniers en place.

1.2 Problématique

Le dépôt hydraulique en surface des résidus miniers en pulpe ($C_w \leq 45\%$) est souvent accompagné d'une ségrégation des particules; ce qui influencera les propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers en place. Ces propriétés des résidus miniers incluent la distribution spatiale de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}), la capacité de rétention d'eau (CRE) et le niveau de la surface phréatique dans un parc à résidus. Ces propriétés sont principalement liées aux processus d'écoulement et de dépôt, lesquels dépendent étroitement des propriétés rhéologiques et physiques des résidus miniers.

Par conséquent, l'absence d'approches alternatives permettant une mise en place des résidus miniers fondée sur des propriétés physiques et rhéologiques bien maîtrisées peut conduire à une ségrégation granulométrique non contrôlée, entraînant une diminution de l'efficacité de certaines techniques de restauration des parcs à résidus, telles que les systèmes de recouvrement avec nappe phréatique surélevée (NPS) et une couverture monocouche. L'enjeu principal réside ainsi dans la capacité à déposer des résidus miniers présentant un comportement non ségrégant.

1.3 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet de recherche est de comprendre l'influence des propriétés physiques et rhéologiques sur le phénomène de ségrégation des résidus miniers lors de leur dépôt hydraulique dans un parc à résidus. La question de recherche associée est la suivante : « comment les propriétés physiques et rhéologiques contrôlent-elles la ségrégation granulométrique lors du dépôt hydraulique des résidus miniers? »

L'objectif spécifique est d'évaluer l'impact de la distance d'écoulement sur les propriétés physiques et rhéologiques des résidus miniers en écoulement, à la fois dans un parc à résidus et dans un canal d'écoulement expérimental (*flume test*).

1.4 Hypothèse de recherche

Pour atteindre les objectifs de ce projet, l'hypothèse suivante est formulée :

- La ségrégation granulométrique des résidus miniers en pulpe déposés hydrauliquement est influencée par leurs propriétés physico-rhéologiques ainsi que par les conditions de dépôt.

1.5 Structure du mémoire

Le présent mémoire est structuré en cinq chapitres.

Le premier chapitre (Introduction) présente le contexte de l'étude, la problématique, les objectifs du projet ainsi que l'hypothèse principale de recherche.

Le deuxième chapitre est consacré à la revue de littérature et aborde les concepts pertinents et nécessaires à la compréhension et à l'exécution du projet de recherche. Ces concepts portent principalement sur les méthodes de gestion des résidus miniers, le drainage minier contaminé (qui inclut le drainage acide et le drainage neutre contaminé), la ségrégation granulométrique par dépôt hydraulique des suspensions solides-liquide, la rhéologie des suspensions solides-liquide, ainsi que leur corrélation avec la ségrégation granulométrique lors du dépôt hydraulique.

Le troisième chapitre, consacré à l'approche méthodologique, décrit la démarche adoptée pour la réalisation de l'étude. Il présente la localisation des sites miniers où les campagnes d'échantillonnage des résidus miniers ont été menées, les emplacements physiques de prélèvement ainsi que les types d'échantillons collectés. Il expose également les différents essais et caractérisations réalisés au laboratoire, de même que le matériel et les équipements utilisés.

Le quatrième chapitre présente et analyse l'ensemble des résultats obtenus.

Enfin, le septième chapitre est consacré à la conclusion du mémoire ainsi qu'aux recommandations.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Caractéristiques physiques et hydrogéotechniques des résidus miniers

Les rejets de concentrateur ou résidus miniers sont susceptibles de présenter, d'un point de vue géotechnique, les plus grands risques d'instabilité lors de leur entreposage pendant le cycle de vie de la mine. Ces résidus sont issus du minerai finement broyé, dont les minéraux d'intérêt économique ont été extraits. Il faut noter que ces résidus miniers peuvent parfois contenir des produits chimiques résiduels du traitement minéralurgique, des métaux ou encore des minéraux non récupérés au cours du processus de concentration du minerai. Leur pourcentage en particules fines (passant la maille du tamis 80 μm) est généralement élevé ($\geq 85\%$) et ils sont habituellement transportés et déposés sous forme de pulpe dans des aires des parcs à résidus (Aubertin et al., 2002a).

La caractérisation physique des résidus miniers permet de connaître leurs différentes propriétés afin d'essayer de prédire leur comportement une fois qu'ils seront exposés aux conditions atmosphériques. Cette caractérisation, combinée aux autres analyses, notamment chimiques et minéralogiques, constitue un outil prévisionnel essentiel pour le choix d'un mode de gestion approprié des résidus miniers.

La connaissance des caractéristiques des résidus miniers inclut leur distribution granulométrique, leur teneur en eau massique ou pondérale (w), la densité relative de leurs grains solides (G_s ou D_R), leur densité de pulpe ou pourcentage massique de solides (C_w), la composition chimique de leur eau surnageante, leur indice des vides (e) ou la porosité (n), leur angle naturel au repos après le dépôt (θ), leur coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique saturée (k_{sat}), leurs propriétés de consolidation unidimensionnelle et leur résistance au cisaillement, etc. Cependant, du fait de la complexité et de la variabilité au cours du temps de leurs caractéristiques hydrogéotechniques, l'analyse du comportement des résidus miniers demeure difficile à prédire (Aubertin et al., 2003; Grimard et al., 2017).

Une vue d'ensemble des principales propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers de roches dures montre qu'ils sont généralement composés de fines particules de sable ou de silt (Bussière, (2007). La Figure 2.1 présente la distribution granulométrique de neuf échantillons de résidus issus

de mines canadiennes de roches dures (Bussière, 2007). Ces échantillons ont été prélevés au bout du tuyau avant leur dépôt dans le parc à résidus. Pour ces résidus miniers, le D_{10} varie entre 1 μm et 4 μm , tandis que le D_{60} varie entre 10 μm et 50 μm . Le coefficient d'uniformité C_U ($= D_{60}/D_{10}$) varie entre 8 et 18. Les pourcentages de passant à travers les mailles de 0,002 mm (2 μm) et de 0,08 mm (80 μm) sont respectivement compris entre 5% et 14%, et entre 70% et 97%. Ces données sont similaires à celles d'autres travaux antérieurs (Aubertin et al., 2002a; Benzaazoua et al., 2003; Vick, 1990). Selon le Système unifié de classification des sols (USCS, *Unified Soil Classification System*), ces résidus miniers sont classés avant leur dépôt comme des silts sableux de faible plasticité (ML).

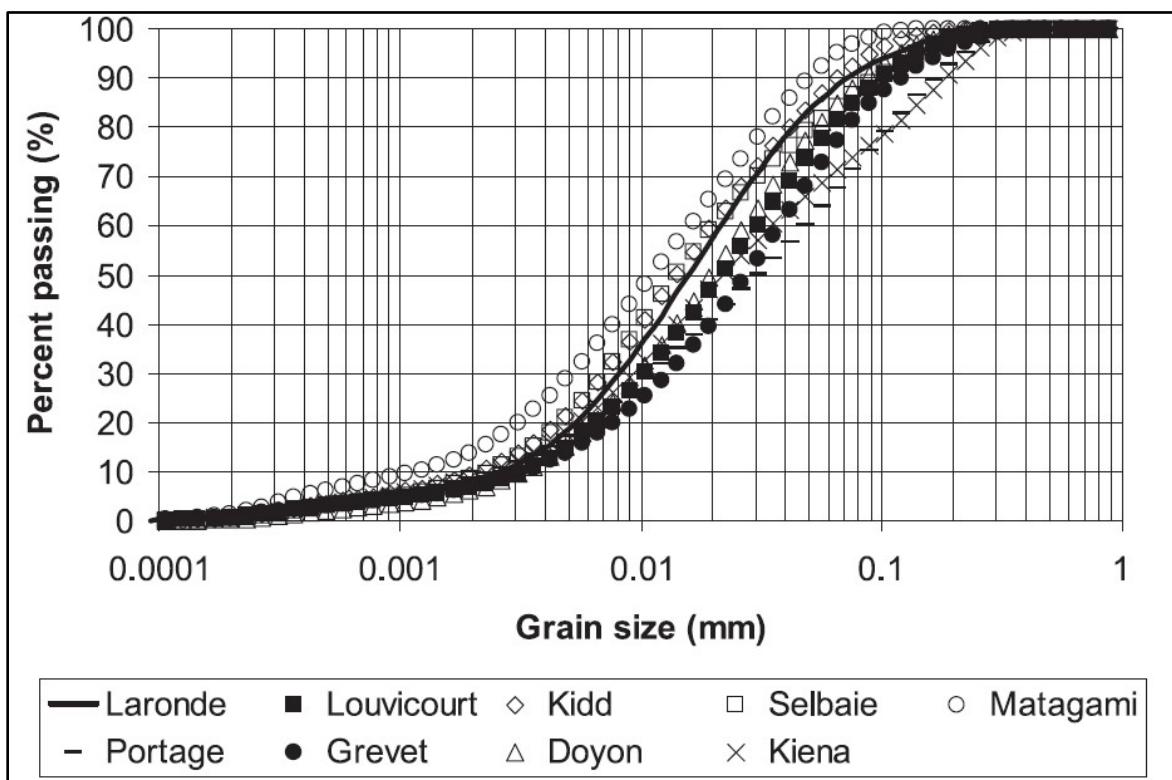


Figure 2.1 Distribution granulométrique de résidus miniers prélevés dans des mines de roche dure canadiennes avant leur dépôt dans le parc à résidus (Bussière, 2007)

Pour les mines qui exploitent en roches dures (cas des mines du Québec), la densité relative des grains solides (D_R ou G_s) des résidus miniers, qui dépend fortement de la minéralogie de la roche mère, peut varier de 2,6 à 4,0 (Aubertin et al., 2002a). Pour les mines d'or, du fait que les résidus sont principalement composés de quartz, le D_R se situe entre 2,6 et 2,9 (Bussière, 2007). Il est cependant important de noter qu'il existe également des résidus issus de gisements polymétalliques

dont la D_R est supérieure à 3 (ex. résidus des mines LaRonde, Goldex, Westwood, Casa Berardi, etc.). Le poids volumique sec des résidus miniers (γ_d) peut varier de 11,5 à 18 kN/m³ (Opris, 2017). Le coefficient de perméabilité (k_{sat}), qui dépend de la valeur de l'indice des vides (e) ou de la porosité (n), est très variable. Il peut passer de 10⁻⁵ m/s et plus pour la fraction grossière à moins de 10⁻⁸ m/s pour la fraction fine (Aubertin et al., 1996). Selon la composition minéralogique, l'indice de plasticité (I_p = limite de liquidité w_L – limite de plasticité w_p) des résidus miniers de mines de roches dures est généralement inférieur à 10%. Le Tableau 2.1 résume les plages de variation des différentes propriétés physiques et hydrogéotechniques des résidus miniers de mines du Canada et du Québec.

Tableau 2.1 Comparaison de certaines propriétés physiques et hydrogéotechniques de résidus miniers provenant de mines du Québec et du Canada en général (Bussière, 2007)

Paramètres physiques	Canada	Québec
D_{10} (μm)	1 à 4	1 à 6
D_{60} (μm)	10 à 50	10 à 80
C_U (D_{60}/D_{10})	8 à 18	10 à 30
Passant 2 μm (%)	5 à 14	4 à 20
Passant 80 μm (%)	70 à 97	60 à 100
Teneur en eau optimale w_{opt} (%)	10 à 20	
γ_{d-max} (kN/m ³)	14,6 à 20,1	
Limite de liquidité, w_L (%)	< 40	
Limite de plasticité, w_p (%)	0 à 15	
Classification USCS	ML	ML ou SM
D_R ou G_s	2,6 à 2,9 (minéral des veines de quartz) 2,9 à > 4,5 (résidus sulfureux)	
Paramètres géotechniques	Résidus ML	Résidus SP
Cc (indice de compression)	0,05 à 0,3	0,05 à 0,3
Coefficient de consolidation 1D c_v (cm ² /s)	0,001 à 0,1	0,1 à 100
k_{sat} (m/s)	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁸	10 ⁻⁴ à 10 ⁻⁶
Pression d'entrée d'air ou AEV Ψ_a (kPa)	10 à 70	5 à 12,5
Succion résiduelle Ψ_r (kPa)	550 à 800	< 300
Cohésion effective c' (kPa)	0	0
Angle de frottement effectif ϕ' (°)	30 à 42	30 à 42
Cohésion non drainée c (kPa)	0 à 100	0 à 100
Angle de frottement total ϕ (°)	14 à 25	14 à 25

2.2 Méthodes de dépôt des résidus miniers

La gestion des résidus miniers représente un des plus importants défis que doit relever l'industrie minière. De nombreuses problématiques géoenvironnementales liées à la gestion des résidus miniers ont été mises en évidence à travers le temps (Aubertin et al., 2002d). Il s'agit principalement des problèmes liés à la stabilité physique des parcs à résidus ou encore de ceux liés à la stabilité géochimique des rejets (solides et liquides) susceptibles de contaminer ou même de polluer l'environnement.

D'une manière générale, les résidus miniers sont transportés par pipeline et déposés en surface dans les parcs à résidus ceinturés de digues de retenue selon différents modes de décharge (Figure 2.2). Le système de déversement des résidus dans le parc à résidus peut prendre des formes diverses. Néanmoins, il est plus souhaitable d'opter pour une méthode contrôlée (CE, 2009). Ce dépôt peut intégrer les systèmes de déversement par ligne, par périmètre ou l'utilisation des hydrocyclones (Ritcey, 2005).

Cette section abordera les approches conventionnelles et alternatives de gestion des résidus miniers ainsi que certains des défis qui leur sont associés.

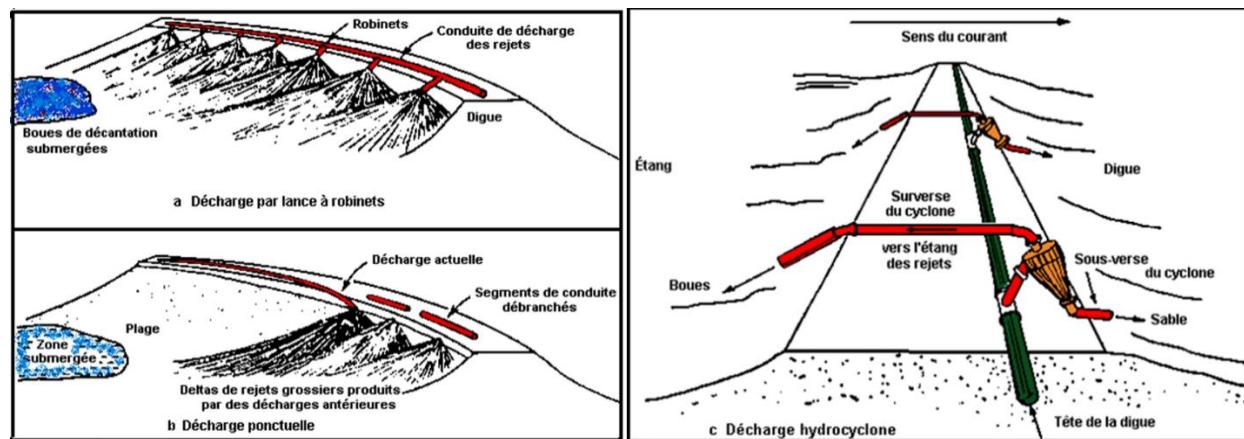


Figure 2.2 Entreposage des résidus miniers sous forme hydraulique (Aubertin et al., 2002a)

2.2.1 Méthode conventionnelle de gestion des résidus miniers

Dans la plupart des cas, les résidus miniers sont transportés et entreposés hydrauliquement sous forme de pulpe (pourcentage de solides $C_w \leq 45\%$) dans un parc à résidus comme l'illustre la figure 2.2 (Aubertin et al., 2002a).

2.2.1.1 Types de digue de retenue

Après le choix du site d’entreposage des résidus miniers, on définit le type d’ouvrage de retenue le mieux adapté. Les sites d’entreposage des résidus miniers sont le plus souvent ceinturés par des digues de confinement (Aubertin et al., 2002c). Les méthodes et les matériaux de construction utilisés pour ériger une digue peuvent varier selon la disponibilité des matériaux, les besoins particuliers du site ainsi que des politiques économiques et d’exploitation de la mine (CE, 2009).

En général, une digue type de retenue d’eau utilisée pour le stockage des résidus miniers (Figure 2.3) est constituée de trois parties (Boussicault, 2007; CE, 2009) :

- Une partie amont munie d’un enrochement (*riprap*) et jouant le rôle de rétention des résidus (tailings) et de l’eau de l’étang (*pond water*) sans pénétration ou érosion excessive par ces derniers (par exemple du sable compacté);
- Une partie intermédiaire, ou noyau imperméable (*impervious core*) qui doit rester intact ; il ne doit ni s’effondrer ni être colmaté par les particules fines (roches ou pierre à filtre concassée);
- Une partie aval construite de façon à laisser passer les eaux de percolation, de manière contrôlée, à travers le filtre (*filter*) et la zone de drainage (*drainage zone*). Cette partie aval assure la stabilité et la solidité du pied de la digue. Elle se doit de rester autant que possible sèche en toutes circonstances (par exemple du sable compacté à haute densité). Dans certaines situations, l’incorporation de membranes artificielles entre les principales parties de la digue s’avère nécessaire (situation de forte percolation ou de déplacement des particules fines).

La construction des digues de confinement peut se réaliser avec des matériaux d’emprunt naturels (argile, silt, sable, gravier) ou avec les résidus miniers eux-mêmes (Aubertin et al., 2002a). Dans le premier cas, il est possible de s’appuyer sur les principes bien connus du génie civil pour la conception de ces types de digues dits classiques (Figure 2.3).

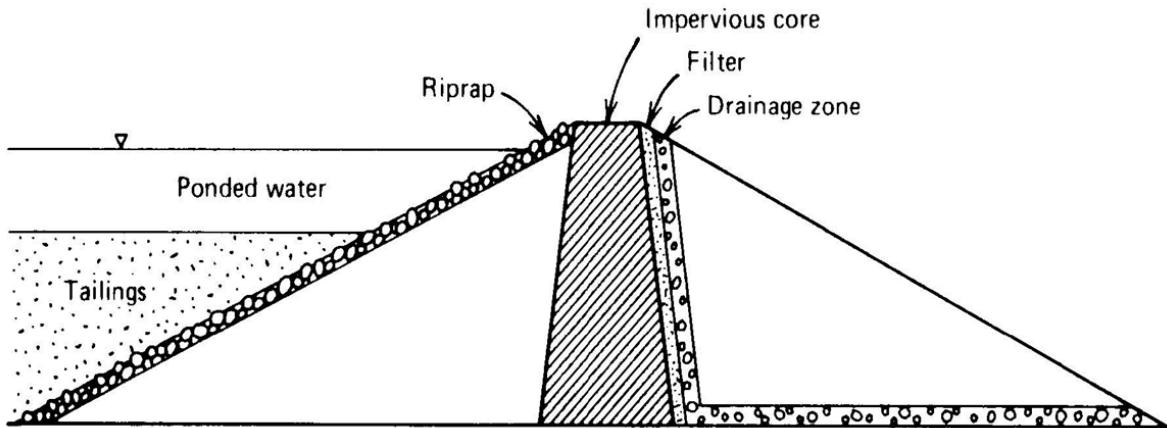


Figure 2.3 Barrage de type à retenue d'eau pour le stockage des résidus miniers (Vick, 1990)

La construction de ce type de digue a pour but de retenir à la fois les résidus et l'eau gravifique du début de la gestion des résidus jusqu'à la fermeture du site d'entreposage concerné (Aubertin et al., 2002a).

Lorsque l'approvisionnement en matériaux d'emprunt est impossible (indisponibilité, coût élevé) et que les résidus miniers possèdent les propriétés physiques et chimiques adéquates, ces derniers peuvent être récupérés pour construire, en partie ou en totalité, les digues de confinement. Les digues construites à partir de résidus miniers diffèrent des digues classiques érigées avec des matériaux d'emprunt d'origine naturelle. Contrairement aux digues classiques, la construction des digues à partir des résidus miniers se fait de façon progressive sur plusieurs années selon la disponibilité des matériaux (Aubertin et al., 2002a; Aubertin & Chapuis, 1991).

Indépendamment de l'origine des matériaux de construction, il existe trois principales méthodes de construction des digues de confinement (Aubertin et al., 2002a; Aubertin & Chapuis, 1991; Klohn, 1986; Vick, 1990).

- La méthode amont : cette méthode est généralement utilisée lorsque les résidus sont déposés à l'aide de lances à robinet ou *spigots* (Aubertin et al., 2002a). La construction des digues par cette méthode est relativement simple et économiquement viable. Elle débute par la mise en place d'un remblai d'amorce et des ouvrages de décantation (drains et tours) (Figure 2.4). Le remblai d'amorce, généralement construit de matériaux d'emprunt granulaires, permet une mise en service rapide du site d'entreposage.

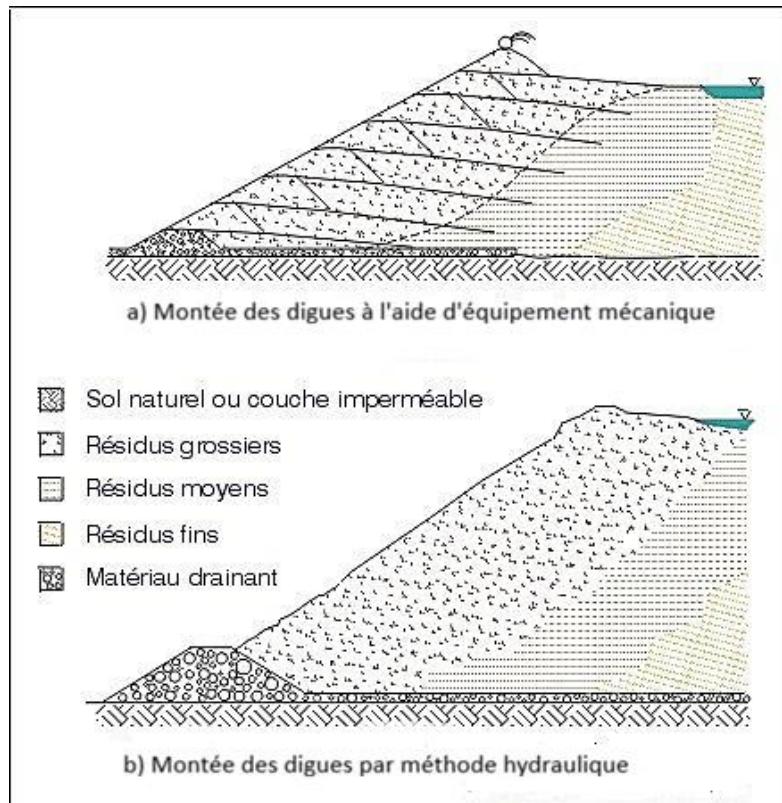


Figure 2.4 Construction d'une digue par la méthode amont : montée des digues par la méthode hydraulique (Aubertin et al., 2002a)

De la crête de cette première digue, dont la hauteur devrait permettre de stocker un volume d'environ deux années de production du concentrateur, sont déversés les résidus miniers sous forme de pulpe vers l'intérieur du parc. Les particules grossières se déposent près du point de déversement (plage) tandis que les fines sont transportées et déposées plus loin dans le parc. Des hydrocyclones peuvent également être utilisés pour accélérer cette ségrégation provoquée des particules. Les nouvelles plages créées avec le déversement des résidus miniers du haut de la crête de la digue deviennent la fondation des futurs rehaussements des digues (Vick, 1990).

Le principal inconvénient de la *méthode amont* est la stabilité physique de la digue et sa vulnérabilité face au phénomène de liquéfaction (CE, 2009). C'est pour cette raison que la *méthode amont* est préconisée dans les régions où le risque de sismicité est faible et lorsque la hauteur des digues n'excède pas 20 à 30 m.

- La *méthode aval* : comparée à la méthode précédente, la *méthode aval* est à la fois plus onéreuse et en même temps plus sécuritaire, particulièrement dans les zones à haut risque

sismique (Aubertin et al., 2002a). Dans cette technique de construction, la digue de retenue est érigée en aval de la digue d'amorce comme son nom l'indique. Pour construire la structure de la digue (entièrement ou en partie), la fraction grossière des résidus miniers séparée par hydrocyclones est habituellement utilisée (CE, 2009). Le pipeline d'acheminement des résidus miniers et la batterie de prises de l'hydrocyclone se trouvant initialement sur la crête de la digue d'amorce, la sous-verse étant évacuée en amont pour former la digue et la surverse étant déversée dans le parc comme l'illustre la figure 2.5.

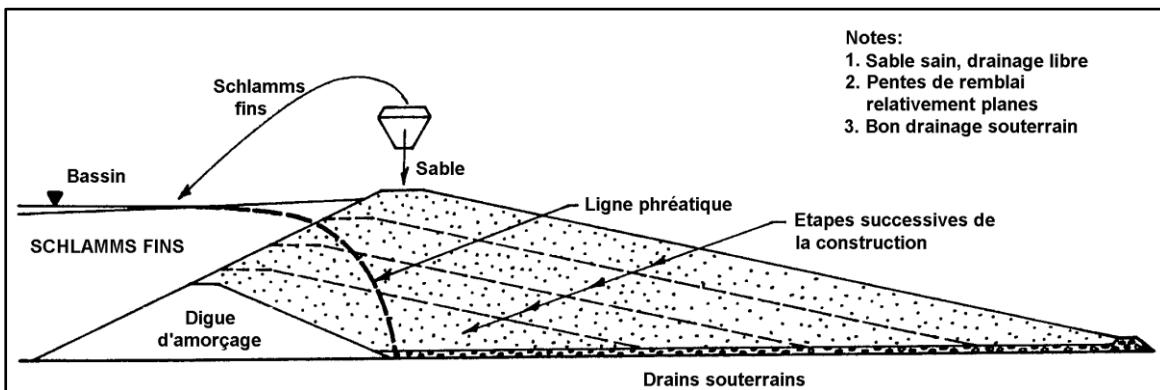


Figure 2.5 Construction d'une digue par la méthode aval au moyen d'hydrocyclones (EPA, 1995)

Un autre avantage de la *méthode aval* est le bilan d'entreposage positif qu'elle génère si l'on le compare à celui de la *méthode amont*. En effet, le volume disponible dans le parc devient important au fur et à mesure que la hauteur de la digue augmente.

Le principal inconvénient de la méthode de construction aval est le coût, car de grands volumes de matériaux sont nécessaires. Ainsi, pour obtenir la même augmentation de hauteur, il faudrait utiliser une quantité de matériaux beaucoup plus importante que pour la méthode amont (Vick, 1990).

- La *méthode à axe central* : la *méthode à axe central* semble être un bon compromis entre le risque sismique et les coûts (Benckert & Eurenius, 2001). Dans cette technique de construction, la crête de la digue est maintenue à la même position horizontale (Figure 2.6). La *méthode à axe central* confère une meilleure stabilité que la *méthode amont* et demande moins de matériaux grossiers que la *méthode aval* même si elle nécessite aussi l'utilisation d'hydrocyclones pour séparer les fractions grossière et fine (Aubertin et al., 2002a; CE, 2009).

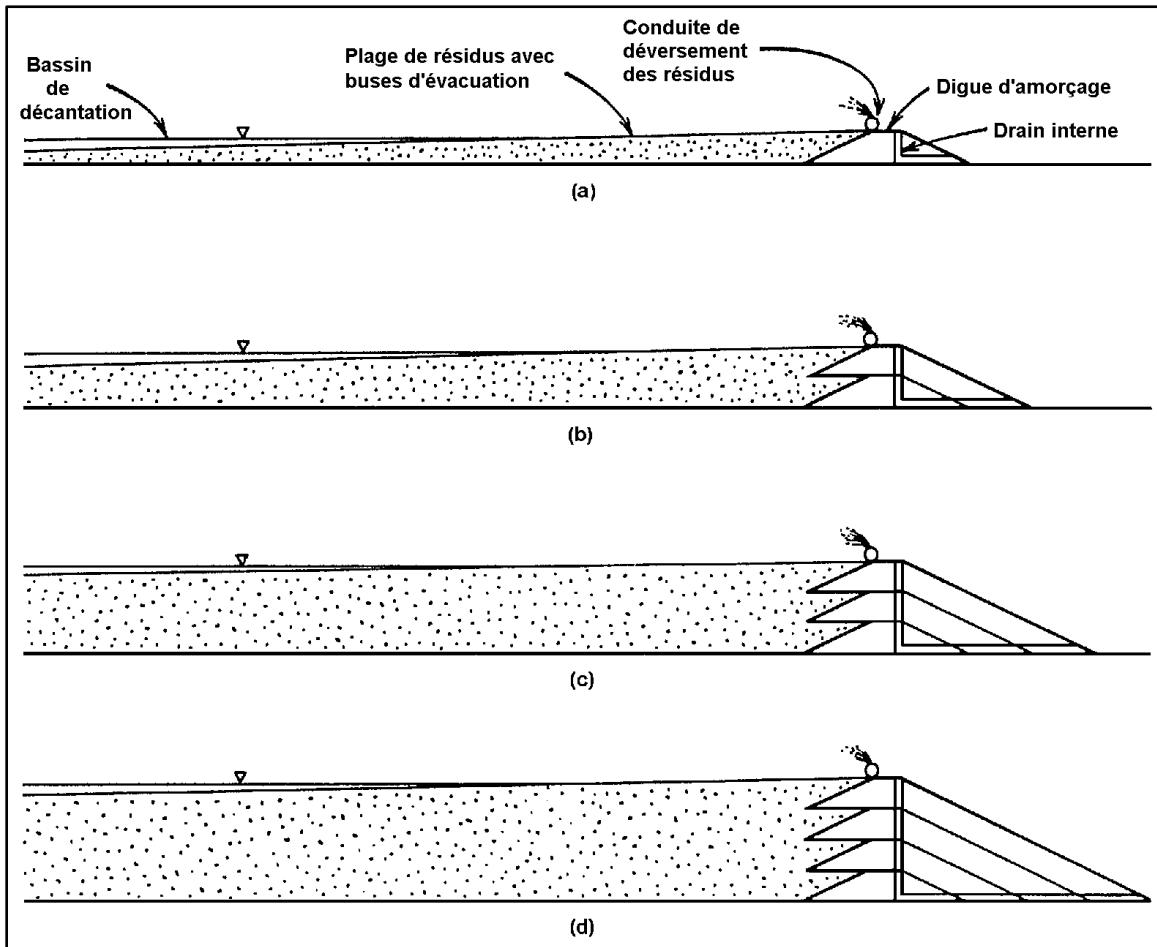


Figure 2.6 Construction d'une digue par la méthode d'axe central (Vick, 1990) : a) digue d'amorçage, b) 1^{er} rehaussement, c) 2^e rehaussement, d) 3^e rehaussement

La *méthode à axe central* est quasiment adaptée pour toutes les situations. Néanmoins, la non-disponibilité de la fraction grossière en quantité suffisante peut être un frein à son utilisation (Aubertin et al., 2002a). Cependant, des matériaux d'emprunt peuvent être utilisés pour compléter la zone de résidus miniers et permettre ainsi à la digue de rester en avance par rapport à la montée du niveau des eaux de retenue (CE, 2009).

Tout comme la *méthode aval*, la *méthode à axe central* permet de faire monter rapidement la digue surtout lorsque les matériaux grossiers sont disponibles. Elle donne également la possibilité d'augmenter la densité des matériaux grossiers qui la constituent (par compactage), ce qui permet en même temps d'accroître la résistance de la digue (Aubertin et al., 2002a).

2.2.1.2 Instabilité et rupture des digues

Les digues de confinement érigées devraient pouvoir supporter les combinaisons de charge statiques et dynamiques les plus défavorables durant les opérations de la mine, de même qu'après la fermeture de cette dernière (Aubertin et al., 2002a; Aubertin et al., 2013a). De nombreux incidents conduisant parfois à la rupture des digues sont rapportés ces dernières années à travers le monde. Azam & Li (2010b) dans leur revue historique, couvrant un siècle, sur les cas de ruptures de digues indiquent que le nombre de ruptures a significativement diminué d'environ 50 ruptures par décennie entre les années 1960-70-80 à environ 20 ruptures par décennie entre les années 1990 et 2000. Cependant, cette diminution est à relativiser si on considère les dimensions des digues. En effet, d'un autre point de vue, la situation s'est même détériorée puisqu'il y a proportionnellement plus de ruptures pour des digues de petites (moins de 15 m) et de moyennes (moins de 30 m) dimensions durant les deux dernières décennies (Aubertin et al., 2013b). En revanche, pour les digues en remblai conventionnel, habituellement la fréquence de rupture augmente avec les dimensions, du moins jusqu'à une hauteur d'environ 100 m (Marche, 2008).

L'Amérique du Nord (Canada, USA) possède le plus grand nombre de ruptures documentées au cours du dernier siècle (autour de 80), suivie par l'Europe (près de 60) et ensuite l'Amérique du Sud (40) et l'Asie (25). Les cas de défaillance surviennent majoritairement en période d'opération ($> 80\%$). Ces défaillances sont souvent liées à l'instabilité des pentes et des fondations, aux effets séismiques et aux débordements en crête (Aubertin et al., 2013b). Les deux dernières causes sont plus fréquentes en phase post-fermeture (Aubertin et al., 2013a). Ces incidents survenus montrent à suffisance que de nombreux défis restent encore à relever pour assurer la stabilité géotechnique de ces ouvrages malgré les avancées des connaissances (Aubertin et al., 2013a; Aubertin et al., 2013b).

De nombreux phénomènes peuvent nuire à la stabilité des digues de confinement conduisant ainsi à leur rupture. Il s'agit notamment de l'érosion régressive du matériau dans la digue ou dans la fondation causée par des pressions interstitielles élevées (à cause d'un filtre inadéquat ou absent), des tassements différentiels sous les digues, de la submersion et de l'érosion de surface dues à une crue, de l'attaque physique ou chimique des matériaux, du mauvais fonctionnement de l'évacuateur de crue ou de l'instabilité statique ou dynamique des pentes (Aubertin et al., 2002a; Aubertin et al., 2013b).

Les cas de ruptures de digues les plus fréquents sont liés à la liquéfaction des résidus miniers, à l'érosion régressive et de surface ainsi qu'au débordement en crête (Aubertin et al., 2013a).

Le Tableau 2.2 présente une classification des principaux incidents documentés entre 1960 et 2000 selon les causes probables (Aubertin et al., (2013a). Une chronologie actualisée de ruptures majeures de digues de confinement est disponible sur le site : <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Ce site répertorie les ruptures majeures de 1960 au 17 mai 2025, date de la dernière rupture survenue en Malaisie. On y trouve le type d'incident qui a causé la rupture ainsi que son impact. Au Canada, la dernière rupture majeure remonte seulement au 24 juin 2024 et est survenue dans une mine d'or au Yukon, avec un déversement d'environ 5 946 000 m³ de matériaux mobilisés sur une distance de 1000 m.

Tableau 2.2 Classification des principaux incidents selon les causes probables (adapté des données de la CIGB, (2001) par Aubertin et al., 2002d).

Cause/Type d'incident (instabilité partielle ou totale)	Rupture, digue active	Rupture, digue inactive	Accident, digue active	Accident, digue inactive	Infiltrations (fuites) dans la fondation	Total
Instabilité des pentes	29	1	20	1		51
Infiltration dans la digue	10	0	11	0		21
Fondation, capacité portante	12	1	11	0		24
Débordement en crête	20	8	3	0		31
Instabilité dans le corps de l'ouvrage	12	0	6	1		19
Séisme	18	0	5	10		33
Effondrement de la mine	3	0	0	0		3
Érosion de surface ou interne	3	0	2	1		6
Cause(s) non rapportée(s)	0	0	0	0	13	13
Cause(s) inconnue(s)	15	3	0	0		18
Total	122	13	58	13	13	219

Face à ces défis, les acteurs du secteur minier cherchent depuis plusieurs années à développer des techniques où les propriétés des rejets de concentrateur sont modifiées de façon à optimiser le mode de gestion et ainsi limiter une partie des problèmes évoqués précédemment. C'est ainsi que des méthodes alternatives de gestion des résidus miniers, incluant la densification des résidus, sont proposées.

2.2.1.3 Méthodes alternatives de gestion : résidus densifiés

Malgré sa mise en place relativement simple et peu coûteuse, la méthode conventionnelle de gestion des résidus miniers occasionne parfois certains problèmes, notamment l'instabilité ou la défaillance des digues de confinement de ces résidus miniers (Martin et al., 2005). De ce fait, des méthodes alternatives de gestion des résidus ont été pensées et appliquées. La densification des résidus est l'une des principales solutions proposées pour améliorer la gestion des résidus miniers et pallier ainsi les problèmes d'instabilité des digues de confinement.

Robinsky (1975) a proposé une augmentation de la densité de pulpe ou du pourcentage de solides (C_w) des résidus miniers avant leur dépôt afin de réduire leur susceptibilité aux instabilités et aux tassements. De nos jours, il est possible de densifier les résidus miniers jusqu'à une densité de pulpe pouvant atteindre 85% (Benzaazoua et al., 2004). Cette densité maximale de pulpe dépend des propriétés rhéologiques et hydrogéotechniques des rejets de concentrateur ainsi que de la technique d'épaississement utilisée (Johnson et al., 2005).

La densification des résidus miniers représente une alternative de plus en plus utilisée pour l'entreposage en surface. Cette technique, en plus d'améliorer les propriétés mécaniques des résidus miniers en place, permet de réduire la consommation d'eau de la mine (Lapierre, 2014; Lapierre et al., 2013). En fonction de leur pourcentage solide massique, les résidus densifiés sont classés comme des résidus épaissis, ou des résidus en pâte ou encore des résidus asséchés (filtrés).

2.2.1.3.1 Résidus épaissis

Les résidus épaissis (Figure 2.7) résultent d'un processus d'épaississement modéré des résidus en pulpes. Ils se forment lorsqu'on élimine une partie de l'eau de la pulpe par usage d'épaississeurs et de filtres. À la fin du processus, les résidus deviennent plus denses et contiennent plus de matières solides que d'eau. Le pourcentage solide massique des résidus varie habituellement entre 50 et 70% comparativement à 30 et 50% pour les résidus conventionnels (Franks et al., 2011; Robinsky, 1999;

Sofrá & Boger, 2002). L'augmentation de la densité de la pulpe entraîne un comportement des résidus davantage assimilable à celui d'un fluide visqueux plutôt qu'à celui de particules en suspension, comme c'est le cas pour les résidus en pulpe à faible teneur en solides (teneur en solides < 45%). Le transport des résidus épaissis se fait par pipeline équipé de pompes centrifuges.

La réduction de leur teneur en eau en usine avant entreposage confère généralement aux résidus épaissis une meilleure résistance au cisaillement et pourrait même réduire drastiquement la quantité d'eau des étangs de surface dans le parc à résidus (Bussière, 2007). Cette technique d'entreposage permet de réduire la taille des digues de confinement. Ainsi, de plus petites digues peuvent être construites pour délimiter la zone d'entreposage et contrôler les eaux de ruissellement (Martin et al., 2005). D'autre part, l'épaississement permet d'économiser l'eau, car l'eau extraite peut être réutilisée dans le procédé, ce qui représente en même temps un avantage environnemental surtout dans les régions où les ressources hydriques sont rares.



Figure 2.7 Entreposage de résidus miniers sous forme épaissie dans un parc à résidus (ministère des Mines du Chili, 2021).

2.2.1.3.2 Résidus en pâte

L'amélioration du niveau de déshydratation par l'utilisation d'une série d'équipements (épaississeurs, filtres à disque, filtres-presses, etc.) permet d'obtenir des résidus ayant une consistance de pâte (Figure 2.8). Le pourcentage massique de solides des résidus en pâte varie généralement entre 70 et 85% selon les sources des résidus (Belem et al., 2003; Martin et al., 2005). Étant plus dense en solides, le transport de ces résidus en pâte par pipelines jusqu'à leur lieu

d'entreposage nécessite l'utilisation de pompes plus performantes, en l'occurrence des pompes à déplacement positif ou à piston.

L'utilisation de cette technique d'entreposage permet de réduire l'empreinte écologique du parc à résidus. De plus, avec l'augmentation de l'épaisseur des résidus et leur consolidation, le poids volumique sec du matériau et la résistance au cisaillement augmentent, améliorant ainsi la stabilité globale du parc à résidus (Aubertin et al., 2003; Haile et al., 2000). Contrairement aux résidus épais, on n'observe pas d'eau de ressouffrage dans les résidus en pâte lors de leur entreposage ou à la suite d'un essai d'affaissement au cône d' Abrams (Martin et al., 2005).

Les résidus en pâte peuvent également être envoyés dans les excavations souterraines sous forme de remblai en pâte cimenté. Cette pratique est de plus en plus répandue dans l'industrie minière (Belem & Benzaazoua, 2008; Belem et al., 2003; Benzaazoua et al., 2003; Johnson et al., 2005; Martin et al., 2005).



Figure 2.8 Résidus en pâte de surface du site minier de Bulyanhulu, Tanzanie (Belem, 2023).

2.2.1.3.3 Résidus asséchés par filtrage

Lorsque la teneur en eau des résidus est davantage réduite, il peut se former un gâteau ou une sorte de croûte sur les filtres : ce sont les résidus asséchés (ou filtrés). À ce stade de densification où le pourcentage solide massique est généralement supérieur à 80%, les résidus ne peuvent plus être pompés (Martin, 2005). Ils sont transportés par convoyeur et/ou par camion jusqu'au lieu d'entreposage (Figure 2.9). Les résidus asséchés sont par la suite épandus et compactés pour former un dépôt de résidus non saturés (Davies & Rice, 2022). Ce type de stockage de résidus produit une masse stable ne nécessitant généralement pas de diguette de rétention et est appelé « amas sec » ou *dry stack*. Le terme « gâteau sec » ou « amas sec » n'est pas tout à fait correct, car les résidus miniers ont une teneur en eau massique minimale de 15% (AMEC, 2004). Cependant, cette terminologie a été adoptée par les régulateurs et les concepteurs (Davies & Rice, 2022).



Figure 2.9 Exemple de résidus asséchés et transportés par convoyeur (Cavali, 2017).

2.2.2 Drainage minier contaminé

Le drainage minier peut être défini comme étant le résultat de la circulation des eaux (de surface et souterraines) à travers les composantes d'un site minier (haldes à stériles, galeries de mine, rejets de concentrateur, etc.). C'est donc le drainage minier qui alimente les effluents miniers (Aubertin et al., 2002a).

Selon Morin & Hutt (2001), le drainage minier peut être subdivisé en quatre principales classes selon les valeurs du pH : le drainage minier acide ($\text{pH} < 6$), le drainage neutre ($6 < \text{pH} < 9$), le drainage alcalin ($\text{pH} > 9$) et le drainage minier au pH peu problématique découlant de l'exploitation des minéraux industriels non métalliques tels que la potasse, le sel gemme, la kaolinite, etc. Le tableau 2.3 résume les principales caractéristiques de ces quatre types de drainage minier.

De tous ces drainages miniers, le drainage minier acide (DMA) est de loin celui dont les conséquences environnementales préoccupent le plus à l'échelle mondiale. Principalement du fait de la mobilisation de métaux lourds et d'autres substances toxiques qu'il génère et de leur transport dans différents milieux récepteurs.

Tableau 2.3 Types de drainage minier et leurs caractéristiques (tiré d'Aubertin et al. (2002a)).

Caractéristiques	Types de drainage minier			
	Acide	Neutre	Alcalin	Autres
	pH du drainage < 6	$6 < \text{pH du drainage} < 9$	$\text{pH du drainage} > 9$	pH de drainage variables
	Acidité élevée	$\text{PN} > \text{PA}$	Alcalinité élevée	
	Exploitations : - Métaux de base; - Métaux précieux; - Uranium; - Charbon, etc.	Le drainage peut devenir alcalin ou acide dans le temps	Exploitations : - Kimberlite; - Bauxite; - Cendres volantes; - Scories de hauts fourneaux, etc.	Exploitations : - Potasse; - Sel; - Borates; - Kaolinite, etc.

2.2.2.1 Production du drainage minier acide

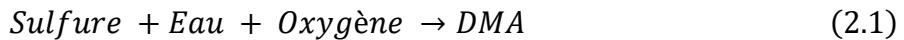
L'exploitation minière occasionne généralement des changements majeurs dans le milieu environnant. Ces changements attribuables à l'intervention de l'homme augmentent à mesure que la demande de la matière première croît. La génération de rejets solides et liquides en quantité importante est l'un des problèmes majeurs qui découlent de l'exploitation de minéraux métalliques (Aubertin et al., 2002a). Les rejets solides, souvent riches en sulfures, peuvent conduire à la production du drainage minier acide (DMA).

Le DMA est souvent associé aux minéraux sulfureux dont on extrait principalement le plomb (Pb), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et d'autres minéraux y compris le charbon (CE,

2009). Le DMA est un processus d’oxydation naturelle qui se produit lorsque des minéraux sulfureux réactifs, tels que la pyrite (FeS_2) et la pyrrhotite ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$, avec $0 \leq x \leq 0,2$), sont exposés aux conditions atmosphériques (oxygène de l’air et l’eau) et qu’il n’y a pas assez de minéraux neutralisants (ex. : CaCO_3). Ce phénomène peut également se développer sur les parois rocheuses riches en sulfures des puits et des galeries des mines souterraines (Vick, 2001). Ainsi, au contact de l’eau (H_2O) et de l’oxygène (O_2), les minéraux sulfurés commencent à s’oxyder. Il s’agit d’une réaction chimique exothermique sous contrôle cinétique favorisé par (CE, 2009) :

- une forte concentration en oxygène;
- une température élevée;
- un faible pH;
- une activité bactérienne.

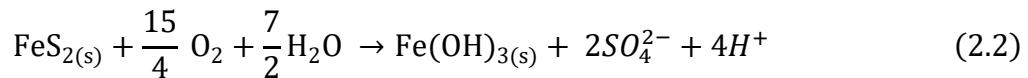
Les processus conduisant à la production du DMA sont relativement bien étudiés et largement décrits dans la littérature (Baker & Banfield, 2003; Bussière & Guittonny, 2020; Egiebor & Oni, 2007; Hakkou et al., 2008; Kleinmann, 1979; Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015; Simate & Ndlovu, 2014; Skousen et al., 2000). L’équation générale de production du DMA, sans entrer dans les détails, s’écrit comme suit :



La pyrite (FeS_2) est généralement utilisée pour décrire les principales réactions qui conduisent à la formation du DMA. Même si la pyrite demeure le minéral sulfureux le plus abondant dans les rejets miniers (Aubertin et al., 2002a), plusieurs autres minéraux sulfureux peuvent être à l’origine du DMA. C’est le cas de la pyrrhotite ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$), de l’arsénopyrite (FeAsS), de la chalcopyrite (CuFeS_2), de la galène (PbS), de la sphalérite (ZnS), de l’alabandite (MmS), etc.

Pour une même quantité donnée de sulfures, la vitesse globale de réaction dépend également d’autres paramètres tels que le type de sulfures et leur granulométrie, qui détermine également la surface exposée. C’est pourquoi les sulfures contenus dans des résidus miniers finement broyés ont tendance à s’oxyder davantage (Höglund, 2001). Les produits d’oxydation des sulfures sont des sulfates dissous, des ions hydrogène (H^+) et des métaux dissous.

La réaction globale d’oxydation directe de la pyrite s’écrit (Kirk Nordstrom, 1982) :



2.2.2.2 Production du drainage neutre contaminé

En réponse à la production d’acide issue du DMA, certains minéraux possédant un potentiel neutralisant peuvent réagir avec l’acide produit et influencer l’ampleur du DMA. Les minéraux carbonatés, particulièrement la calcite et la dolomite, constituent les minéraux ayant un plus grand pouvoir de neutralisation (Aubertin et al., 2002a).

Lorsque le pH des effluents est compris entre 5,5 et 8,5 et que le potentiel net de production d’acide est faible à long terme, les rejets sont considérés comme neutres (Aubertin et al., 2015). Ces rejets peuvent cependant produire un drainage neutre contaminé (DNC). Le DNC contient généralement des concentrations assez élevées en métaux solubles tels que l’arsenic (AS), le mercure (Hg), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le nickel (Ni), etc.

Bien qu’il puisse contenir des métaux toxiques, le problème du DNC est généralement jugé moins critique que celui du DMA (Aubertin et al., 2015).

Les conditions de production du DNC sont souvent similaires à celles du DMA et les techniques de restauration pour les sites producteurs de DMA peuvent également s’avérer efficaces pour ceux producteurs de DNC.

2.2.2.3 Techniques de prévention du drainage minier acide

L’option la plus privilégiée pour lutter contre les problèmes environnementaux que peut causer le DMA consiste à utiliser des mesures préventives pour empêcher ou contrôler la production d’acide. C’est ainsi que plusieurs techniques visant à inhiber les réactions d’oxydation des sulfures à la source ont été développées.

Les principales méthodes utilisées dans la pratique sont : les recouvrements multicouches, les recouvrements aqueux et la technique de la nappe phréatique surélevée (avec couverture monocouche). Chacune de ces techniques de prévention vise à éliminer ou limiter les apports de réactifs (air et/ou eau) indispensables à la réalisation de la réaction d’oxydation. Ainsi, on peut éliminer la production d’acide.

- *Le recouvrement aqueux* : cette technique est efficace pour prévenir la production d'acide et consiste à limiter la diffusion de l'oxygène en plaçant un recouvrement en eau par-dessus des résidus miniers réactifs. La méthode est en partie basée sur le fait que la diffusion de l'oxygène dans l'eau stagnante est 10 000 fois plus faible que celle de l'air (Aubertin et al., 2002a; Awoh et al., 2014). En général, on maintient la couverture d'eau, plus ou moins profonde, grâce à la construction d'infrastructures étanches qui créent un réservoir artificiel. Une épaisseur de couche d'eau comprise entre 0,3 et 1 m est généralement requise pour que la technique soit efficace (Bussière & Guittonny, 2020).
- *Les couvertures avec effets de barrière capillaire* (CEBC) : le concept repose sur l'utilisation du contraste hydrogéologique entre des matériaux à grains fins et à grains grossiers afin de limiter la diffusion de l'oxygène vers les résidus miniers producteurs d'acide. En conditions non saturées, le placement d'un matériau fin au-dessus d'un matériau grossier permet de maintenir une couche à forte teneur en eau, même lorsque la nappe phréatique est basse, grâce à l'effet de barrière capillaire (Aubertin et al., 2015; Bussière & Aubertin, 1999; Bussière & Guittonny, 2020). Cette saturation élevée réduit significativement le coefficient de diffusion de l'oxygène et limite ainsi l'oxydation des résidus miniers. Une CEBC est d'autant plus efficace que lorsque le degré de saturation (Sr) est élevé (Sr compris entre 85 et 90 %). Ainsi, plus une des couches de la CEBC possède la capacité à retenir l'eau, plus elle peut limiter efficacement la diffusion des gaz.
- *Le recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée* (NPS) : tout comme les deux précédentes, le but de cette technique consiste à maintenir les résidus miniers sulfureux saturés ou proches de la saturation afin de limiter la diffusion de l'oxygène, et donc, de prévenir la réaction d'oxydation (Bussière & Guittonny, 2020). Pour parvenir à cela, Aubertin et al. (1999) suggèrent que la nappe phréatique soit maintenue à une profondeur (h) inférieure à la valeur d'entrée d'air (AEV) des résidus miniers ($h < AEV$). Ouangrawa et al. (2009), de leur côté, proposent que la nappe phréatique devrait être surélevée à une profondeur (h) inférieure à la moitié de la valeur de la pression d'entrée d'air des résidus miniers ($h < \frac{1}{2} AEV$). Dans le cas où les résidus miniers sont dans un état préoxydé, la nappe phréatique devrait être surélevée jusqu'à la surface des résidus (Pabst et al., (2018).

La mise en place de la couverture ou du recouvrement monocouche vise principalement à maximiser l'infiltration de l'eau et minimiser son évaporation. Elle peut également permettre de limiter les phénomènes d'érosion et de bioturbation. Il est très difficile et quasiment impossible de maintenir un niveau de nappe phréatique si élevé sans aucune barrière à l'évaporation. L'évaporation sur le site minier va éliminer beaucoup d'eau et le bilan hydrique va rapidement devenir négatif (Bussière & Guittonny, 2020). Le seul moyen de maintenir un niveau d'eau souhaité est d'utiliser, en complément de la nappe phréatique surélevée, une couverture monocouche afin de contrôler les pertes d'eau par évaporation, et donc, de maximiser le bilan d'eau sur le site.

Pour que cette couverture monocouche soit efficace et joue pleinement son rôle, ses matériaux de construction doivent avoir nécessairement deux propriétés essentielles (Bussière & Guittonny, 2020; Dagenais et al., 2006) :

- une faible rétention d'eau pour créer un effet de barrière capillaire efficace avec les résidus sous-jacents et donc d'empêcher l'évaporation (bris capillaire) ;
- une conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) élevée afin que les eaux de précipitation puissent s'infiltérer dans les résidus et contribuer ainsi à maintenir le niveau phréatique à la hauteur souhaitée.

Chacune des techniques citées présente des avantages et des limitations en fonction du contexte géographique, géologique et économique du site minier. Le Tableau 2.4. résume les avantages et les limitations de chacune des trois techniques.

Dans le cas de la NPS, lorsque la couverture monocouche est déposée est faite de résidus miniers non producteurs d'acide et déposés hydrauliquement, il peut y avoir une ségrégation granulométrique. Une telle ségrégation granulométrique des résidus miniers pourrait induire une hétérogénéité spatiale des propriétés hydrogéotechniques, incluant la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) et la capacité de rétention d'eau (CRE), et affecter la dynamique de la nappe phréatique. Cette hétérogénéité est susceptible de compromettre la performance des techniques de restauration, plus particulièrement la mise en place d'une nappe phréatique surélevée associée à une couverture monocouche, en diminuant leur efficacité à prévenir le drainage minier acide. La

maîtrise des conditions et des propriétés d'écoulement des résidus apparaît dès lors essentielle pour optimiser l'efficacité de ces approches de restauration.

Tableau 2.4 Comparaison des trois principales techniques de restauration des sites miniers (inspiré d'(Awoh et al., 2013; Bussière & Guittionny, 2020; Kachhwal, 2011).

Type de recouvrement	Avantages	Contraintes ou limitations
Recouvrement en eau	<ul style="list-style-type: none"> ■ Limite immédiatement la réactivité des résidus et prévient le DMA; ■ Technique économique pour un pays où le bilan hydrique est toujours supérieur à 0; ■ Empêche l'érosion et l'émission des poussières provenant de résidus-PGA; ■ Peut jouer un rôle esthétique pour l'environnement. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Risque d'instabilité physique et chimique des digues; ■ Sensible aux actions du vent (ex. remise en suspension des particules); ■ Dépend du bilan hydrique; ■ Risque de relargage des métaux; ■ Risque de transfert d'oxygène; ■ Sensible à l'effet du changement climatique; ■ Nécessite une protection particulière (risque d'accident humain).
CEBC	<ul style="list-style-type: none"> ■ Prévient le DMA même si la nappe est en dessous des résidus-PGA; ■ Performance stable dans le temps; ■ Peu sensible aux variations climatiques; ■ Méthode prouvée et validée (utilisée depuis quelques décennies); ■ Différents choix pour le type de matériau. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Coût important; ■ Disponibilité et logistique des matériaux nécessaires; ■ Prend du temps avant stabilisation dans le cas de résidus pré-oxydés (n'arrête pas automatiquement l'oxydation indirecte par le Fe^{3+} : effluents de mauvaise qualité à court terme); ■ Sensible à la topographie (Perte de performance possible dans les pentes pouvant affecter l'efficacité de la globalité du système).
NPS & C. Monocouche	<ul style="list-style-type: none"> ■ Moins couteux; ■ Nécessite moins de matériaux; ■ Suivi plus simple; ■ Meilleur stabilité géotechnique que la couverture en eau; ■ Pas autant d'effet du vent (pas de mouvement de remise en suspension des particules); ■ Pas de phénomène de mélange; ■ Meilleurs contrôles des effets de périodes sèches; ■ Moins de risque de désaturation. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Très sensible à la profondeur de la nappe; ■ L'épaisseur de la couverture monocouche doit être bien choisie; ■ Sensible aux variations climatiques; ■ Manque d'efficacité en cas d'événement sismique; ■ Seulement applicable sur le parc à résidus; ■ Sensible aux saisons et au bilan hydrique; ■ Performance affectée par l'uniformité et la granulométrie résidus; ■ Performance affectée par l'hétérogénéité du matériau de la couverture (ex. ségrégation hydraulique); ■ Sensible à la topographie; ■ La pré-oxydation des résidus nécessite un design spécifique; ■ Limite l'utilisation futur du site; ■ Contrôle des digues délicat en cas de grand bassin.

2.3 Ségrégation hydraulique des suspensions solides-liquide

2.3.1 Généralités

La ségrégation peut être définie comme la tendance de certains composants d'une matrice, pourtant dotés de propriétés similaires, à se concentrer préférentiellement dans l'une ou l'autre zone physique de l'ensemble considéré (Silva, 2022; Silva et al., 2015). Pour les suspensions solides-liquides, on peut dire que la ségrégation est le phénomène de migration des particules observé au cours d'un écoulement (cisaillement ou vibration). La ségrégation des suspensions solides-liquides est gouvernée par leur distribution granulométrique, la forme des grains, leur densité relative, l'état de surface des grains, ainsi que par leurs propriétés rhéologiques.

Dans le secteur industriel, l'apparition de la ségrégation peut prendre deux sens; une signification souhaitée avec l'utilisation de la ségrégation comme outil de séparation des minéraux à valeur économique (gravimétrie), ou une signification indésirable comme dans l'industrie de la céramique et du béton où les mélanges doivent garder leur texture homogène.

Dans le secteur minier, le phénomène de ségrégation est observé dans les parcs à résidus, et illustré par la granulométrie décroissante des particules, obtenue lors de l'entreposage hydraulique des résidus miniers (Blight, 1988; Blight, 2009a; Blight & Melentev, 1994; Blight et al., 1985; Bussiere, 1994; Driouky, 2020; Temgoua, 2021).

2.3.2 Théorie de la ségrégation particulaire

L'entreposage hydraulique des résidus miniers est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie minière. Cette méthode est en effet avantageuse en raison de son faible coût et de sa mise en place relativement simple.

Malgré ses avantages, l'entreposage des résidus sous forme de pulpe peut être suivi d'une ségrégation hydraulique matérialisée par une variabilité granulométrique à travers un même parc (Aubertin et al., 2002a; Blight, 1988, 2009b; Blight & Bentel, 1983; Blight & Melentev, 1994; Blight et al., 1985; Bussiere, 1994; Vick et al., 1993). Ce phénomène est également observé dans le domaine du génie civil notamment dans la préparation du béton ainsi que dans la préparation des remblais hydrauliques et rocheux où il constitue une des problématiques majeures affectant l'atteinte des objectifs géotechniques de ces deux types de remblai (Bui et al., 2002; Dalcé, 2018; Josserand, 2002; Panesar & Shindman, 2012).

Cette ségrégation peut s'expliquer par la dynamique de l'écoulement : les particules fines restent en suspension et sont transportées beaucoup plus loin par l'eau que les particules grossières. Plus on est proche du point de déversement, plus on a des grains grossiers (matériaux grossiers) et plus on va vers l'aval de ce point, plus on a des grains fins (matériaux fins).

La ségrégation hydraulique n'est pas sans conséquence. Elle entraîne en effet une hétérogénéité des propriétés géotechniques. Cette hétérogénéité impacte notamment la distribution granulométrique, la porosité, la densité, la conductivité hydraulique saturée ainsi que la capacité de rétention d'eau des résidus. La ségrégation hydraulique peut également influer sur les propriétés rhéologiques. La résistance au cisaillement n'est pas non plus épargnée. La ségrégation entraîne en effet une variation de la résistance au cisaillement dans les parcs à résidus du fait de l'hétérogénéité des matériaux et de la différence dans leurs stades de consolidation (Blight, 2009a). Les matériaux grossiers se déposent et se consolident rapidement non loin du point de déversement tandis que les matériaux fins, sursaturés, sont transportés par l'écoulement, se sédimentent et se consolident lentement et acquièrent une résistance au cisaillement plus faible (Blight, 2009a). La Figure 2.10 schématise l'effet de la ségrégation hydraulique dans un parc à résidus.

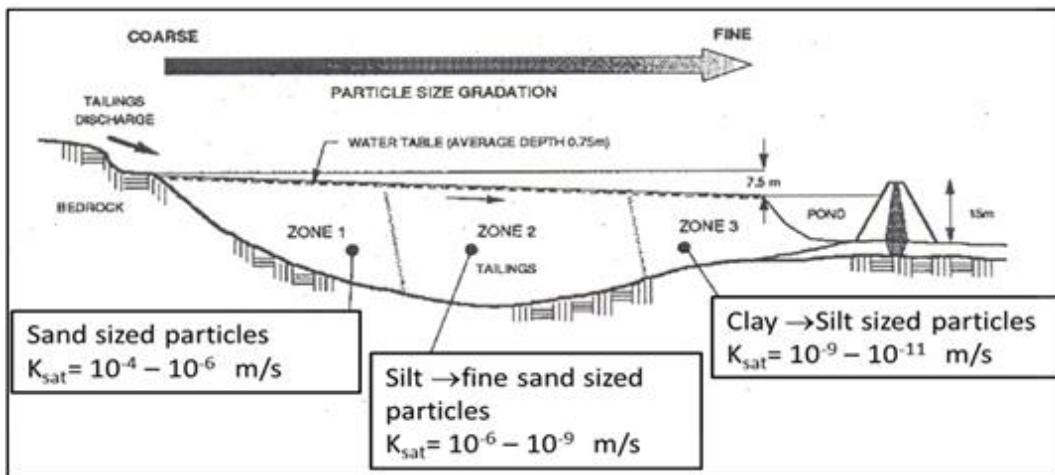


Figure 2.10 Zonation granulométrique créée par la ségrégation hydraulique des résidus miniers au cours de leur dépôt; zone 1 est la zone de la plage, zone 2 est la zone intermédiaire et zone 3 est celle de la décantation des particules fines en suspension (MEND, 2001).

2.3.3 Propriétés des suspensions solides-liquide

Les suspensions solides-liquide désignent généralement un mélange hétérogène d'un liquide avec des particules solides (Silva et al., 2015). Le type d'interactions entre ces deux composantes va

décrire le comportement de tout le mélange. Les principales interactions étudiées dans la littérature sont : L'interaction colloïdale (au niveau des molécules de l'eau et des particules colloïdales (de 1 nm à 10 μm), l'interaction hydrodynamique, et l'interaction de frottement ou de collision entre les grains de grosses tailles (Coussot & Van Damme, 1997).

2.3.3.1 Pourcentage ou concentration en solides

La concentration en solides constitue un paramètre clé dans le contrôle de la ségrégation particulaire des suspensions solides–liquide. À faible concentration ($\leq 45\%$), la ségrégation est principalement gouvernée par la sédimentation différentielle des particules, tandis qu'à des concentrations plus élevées, l'augmentation des interactions interparticulaires et des propriétés rhéologiques, notamment la viscosité apparente et le seuil de cisaillement, limite les mouvements relatifs des particules et favorise des dépôts plus homogènes (Coussot, 2017; Richardson & Zaki, 1997).

Le pourcentage de solides est défini comme la proportion de grains solides dans le fluide et peut être exprimé en volume, i.e. concentration volumique (C_v) ou en masse, i.e. concentration massique (C_w). Le pourcentage de solides volumique (C_v) correspond au rapport entre le volume des grains et le volume total de la suspension solides-liquide:

$$C_v = \frac{\text{volume grains solides}}{\text{volume total}} \quad (2.3)$$

Quant au pourcentage de solides massique (C_w), il correspond au rapport entre la masse des grains solides (m_{solides}) et la masse totale (m_{totale}) de la suspension solides-liquide

$$C_w = \frac{m_{\text{solides}}}{m_{\text{totale}}} \quad (2.4)$$

Ce paramètre intervient dans la caractérisation du comportement des suspensions. En effet, un fluide à comportement visqueux peut passer à un matériau à comportement granulaire si sa concentration en solides augmente.

Pour la fraction de solides, on peut définir deux valeurs importantes :

- Une fraction solide désordonnée (*Random Loose Packing*) d'environ 55%. Le milieu est qualifié de dense au-delà de cette concentration (Berryman, 1983);

- Une concentration volumique maximale (C_{v-m}) correspondant au rapport entre le volume maximal de particules solides par rapport au volume total de la suspension solides-liquide. Elle est égale ou inférieure à 64% (v/v) dans le cas d'un empilement aléatoire compact de sphères et dépend des propriétés morphologiques des particules (taille et forme) dans la suspension (Bernal & Mason, 1960; Berryman, 1983).

La fraction volumique (C_v) est un paramètre clé pour la caractérisation des suspensions solides-liquide, car elle régit les différentes interactions au sein du mélange (Bonnaud, 2009). On distingue deux catégories de suspensions selon la concentration en solides : les suspensions molles et les suspensions dures (Coussot & Ancey, 1999). Les suspensions molles désignent les fluides ayant une faible quantité de particules et une large quantité de liquide. Dans ce type de suspension, on considère un régime d'écoulement hydrodynamique, avec l'introduction du terme de contrainte particulaire, pour prendre en compte la phase solide (Beaume, 2008; Laure et al., 2009). Les suspensions dures sont les suspensions pour lesquelles le comportement solide l'emporte sur le comportement fluide. Les lois qui régissent cette catégorie sont celles de la dynamique des particules, décrites par les forces de contact entre celles-ci. La phase fluide est considérée comme un torseur des efforts hydrodynamiques exercés sur la phase solide. Ces paramètres ont donc une forte influence sur la ségrégation particulaire.

2.3.3.2 Granulométrie

La granulométrie, ou distribution des tailles de particules, influence directement la ségrégation particulaire lors des écoulements granulaires. Dans un mélange polydisperse, les particules fines descendent dans les vides entre les grosses particules (*kinetic sieving*), tandis que les grosses remontent vers la surface (*squeeze expulsion*). Cette ségrégation est d'autant plus prononcée que le contraste de taille est important et que le flux est dense ou rapide, modifiant la structure interne et la dynamique du mélange (Gray & Thornton, 2005; Gray, 2018).

La classification des suspensions selon la granulométrie se fait par la description minutieuse des particules solides en termes de leur géométrie, forme et taille. On parle ici d'une géométrie de sphère avec des rayons différents, d'une géométrie de fibre avec des particules de forme allongée, ou d'une géométrie amorphe décrite par les propriétés physiques des éléments constituant les particules (Figure 2.11).

La granulométrie est un facteur majeur dans la classification des suspensions, car elle donne plus de précision dans le cas de l'étude du comportement de fluides avec la même concentration de solide (Barnes et al., 1989; Coussot, 2017; Guazzelli & Morris, 2011).

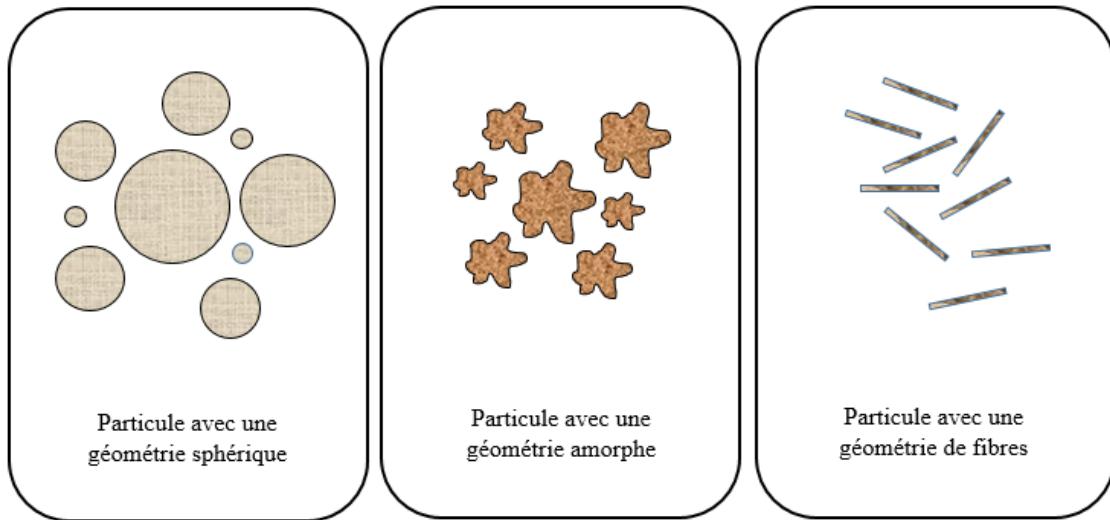


Figure 2.11 Différentes géométries des particules (Coussot, 2017)

2.3.3.3 Dynamique de la suspension solides-liquide

La dynamique d'une suspension fait allusion aux résultats d'une compétition entre différents phénomènes physiques : diffusion brownienne, dissipation visqueuse, inertie du fluide et des grains (Bonnaud, 2009). Le rôle effectif de chacun de ces termes est évalué par plusieurs nombres adimensionnels :

- Nombre de Reynolds (Re)

Le nombre de Reynolds exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Pour un fluide newtonien ce nombre est défini par :

$$Re = \frac{\rho L v}{\mu} \quad (2.5)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3), L est la longueur caractéristique (ex. diamètre d'une conduite) (m), v est la vitesse d'écoulement du fluide (m/s) et μ est sa viscosité dynamique (Pa.s).

La valeur de Re indique si un écoulement est laminaire ($Re < 2000$), transitoire ($2000 < Re < 3000$) ou turbulent ($Re > 3000$). Ces seuils sont approximatifs pour les fluides non-newtoniens. À l'échelle des grains, le nombre de Reynolds est très faible : l'inertie du fluide est négligeable.

- Nombre de Stockes (Stk)

Le nombre de Stokes permet d'étudier le comportement d'une particule dans un fluide. Il compare l'inertie des particules par rapport au temps de relaxation visqueuse. Il est donc défini par le rapport entre l'énergie cinétique de la particule et l'énergie dissipée par frottement avec le fluide. Il permet alors d'estimer l'influence du fluide interstitiel sur la dynamique :

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 v}{18 \mu L} \quad (2.6)$$

Avec :

ρ_p = masse volumique de la particule (kg/m^3)

d_p = longueur caractéristique (diamètre) de la particule (m)

v = vitesse du fluide (m)

μ = viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

L = Longueur de l'écoulement (m)

Un faible nombre de Stokes ($<< 1$) indique que la particule suit fidèlement le mouvement du fluide, tandis qu'un grand nombre de Stokes ($>> 1$) signifie que la particule ne suit pas les variations rapides du fluide et peut percuter un obstacle. Si le nombre de Stokes est ≈ 1 , cela signifie que l'inertie de la particule est comparable aux forces visqueuses du fluide. La trajectoire de la particule commence à s'écartier des lignes de courant du fluide.

2.3.4 Théorie de la sédimentation des suspensions solides-liquide

La théorie de sédimentation décrit le mouvement et la décantation des particules solides sous l'effet de la gravité au sein d'un fluide. Ce processus est gouverné par l'équilibre entre les forces gravitationnelles, de poussée d'Archimède et de traînée visqueuse. La vitesse de sédimentation dépend principalement de la taille, de la forme et de la densité des particules ainsi que des propriétés rhéologiques du fluide (Richardson & Zaki, 1997).

La sédimentation d'une particule de géométrie sphérique dans un fluide représente le cas le plus simple de sédimentation solides-liquide (Chen et al., 1994). Une sphère de diamètre d_p , de densité ρ_s tombant dans un fluide s'étendant à l'infini de densité ρ_l , acquière une vitesse terminale V_{sed} qui correspond à un équilibre entre le poids, diminué de la poussée d'Archimète, et la force de friction exercée par le fluide (force de Stokes), elle s'écrit comme suit pour un fluide newtonien :

$$V_{\text{sed}} = \frac{(\rho_s - \rho_l)gd_p^2}{18\mu} \quad (2.7)$$

Où μ est la viscosité plastique du fluide.

Il est à préciser que la force de Stokes est très sensible aux obstacles, tels que les parois, et qu'elle est valable dans le cas où les effets visqueux remportent sur les effets interstitiels (nombre de Reynolds faible) (Bonnaud, 2009). L'inventaire des forces exercées sur la particule lors du processus de sédimentation donne deux forces opposées : la force de flottabilité appelée B_F et la force gravitationnelle appelée G_F (Figure 2.12). En déséquilibre, une autre force est mise en évidence appelée force de traînée F_D , qui est due à la différence entre la densité des solides et des liquides. Cette force augmente avec l'augmentation de la vitesse V_{sed} .

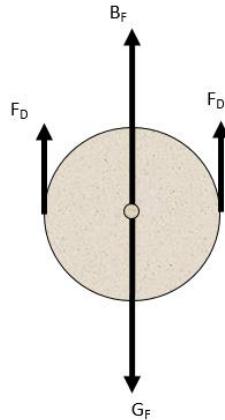


Figure 2.12 Forces appliquées sur une particule sphérique dans un liquide.

La particule arrive à l'équilibre, à cause de la réduction de l'accélération par la force motrice ($G_F - B_F$) et la force de traînée, F_D . La force de traînée est donnée par la formule :

$$F_D = V(\rho_s - \rho_l)g \quad (2.8)$$

Pour un écoulement laminaire, la force de traînée est donnée par la loi de Stokes et s'écrit comme suit :

$$F_D = 3\pi\mu d_p v_{sed} \quad (2.9)$$

Le coefficient de traînée C_D , qui permet de quantifier la résistance exercée par le fluide sur une particule en mouvement relatif, est paramètre adimensionnel défini comme le rapport entre la force de trainée F_D et la pression dynamique du fluide appliquée à la surface projetée de la particule (Allen, 2012), selon la relation :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho_l \mu}{2} \frac{\pi d_p^2}{4}} \quad (2.10)$$

Toutefois, la loi de Stokes n'est valable que pour les particules inférieures à 100 μm (Li & Yuan, 2002). Dans le cas de sédimentation dans un fluide non-newtonien, la vitesse de sédimentation en condition d'écoulement laminaire est donnée par (van Rhee, 2002) :

$$V_{sed} = \frac{(\rho_s - \rho_l)gd_p^2}{18\mu} - d_p \frac{\tau_y}{\mu} \left(1 + \frac{\pi}{12}\right) \quad (2.11)$$

τ_y est le seuil d'écoulement. Cette équation montre que la vitesse de sédimentation diminue lorsque τ_y augmente.

2.3.5 Caractéristiques de la ségrégation et l'écoulement granulaire

La ségrégation et l'écoulement granulaire représentent des phénomènes fondamentaux dans le comportement des matériaux particulaires et jouent un rôle déterminant dans les procédés miniers, notamment dans le dépôt des résidus en pulpe. La ségrégation survient lorsque des particules de tailles, densités ou formes différentes se redistribuent sous l'effet du mouvement ou de l'écoulement, créant des zones granulométriquement distinctes au sein du matériau. Ottino et Khakhar (2000) démontrent que ces processus émergent même en présence de gradients simples de vitesse et qu'ils tendent à se renforcer sous des conditions d'écoulement prolongées ou hétérogènes.

L'écoulement granulaire, quant à lui, présente une dynamique complexe gouvernée par des interactions frictionnelles et collisionnelles, donnant lieu à trois régimes principaux : quasi-statique, inertiel et rapide (Andreotti et al., 2013). Dans les environnements miniers, les matériaux granulaires alternent fréquemment entre ces régimes selon le taux de cisaillement et les conditions d'écoulement, influençant la distribution interne des contraintes, la dilatation et la formation de structures localisées telles que les bandes de cisaillement. Les simulations numériques de

cisaillement plan montrent que les matériaux granulaires denses présentent une transition progressive entre un comportement solide et un comportement fluide selon la densité locale et la vitesse imposée (Da Cruz et al., 2005).

Ces mécanismes sont directement pertinents pour le dépôt des résidus miniers en pulpe, où la ségrégation se produit non seulement entre particules solides, mais également entre phases solide et liquide. Lors de l'écoulement de la pulpe sur le terrain, les particules plus grossières décantent plus rapidement et tendent à se déposer près des points de déchargement, tandis que les fines sont transportées plus loin, générant des gradients granulométriques latéraux et verticaux dans les digues ou plages de résidus. (Azam & Li, 2010a).

2.4 Rhéologie des suspensions solides-liquide

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée (Barnes & Nguyen, 2001). Elle a pour objet d'analyser les comportements mécaniques des substances et d'établir des modèles mathématiques pour décrire ces comportements. Elle permet en outre de décrire les interrelations entre la force, la déformation et le temps. La rhéologie s'intéresse à l'étude de la matière sous ses deux formes : solide et liquide. L'étude des comportements rhéologiques de la matière solide est gouvernée par la loi de Hooke (1678), alors que celle des fluides suit la loi de Newton (1687).

Le comportement constitutif des mélanges solides-liquides, implique l'étude simultanée des différentes phases de la matière, ce qui marque la complexité de ce sujet. Dans les conditions standard, l'eau et les huiles se comportent comme des fluides newtoniens, tandis que les suspensions et autres fluides complexes présentent un comportement différent.

2.4.1 Types de fluide

Un corps donné soumis à une contrainte subit un mouvement cinématique de déformation pouvant être décrit dans le temps. Selon leur réponse à l'application d'une pression extérieure, les fluides peuvent être classés en deux familles : les fluides avec un comportement newtonien et les fluides avec un comportement non-newtonien. L'écoulement de ces deux types de fluide peut se faire de façon laminaire ou turbulente. Généralement, pour déterminer le comportement d'un fluide, on peut procéder à l'expérience de base suivante (Figure 2.13):

Une couche mince d'un fluide sera placée entre deux plaques parallèles séparées d'une distance dy . L'une des plaques est maintenue fixe tandis que l'autre est mobile (Figure 2.13). Le fluide est soumis à un test de cisaillement simple par l'application d'une force F comme l'illustre la figure 2.13. Cette force sera équilibrée par une force de frottement interne de même intensité et opposée dans le fluide.

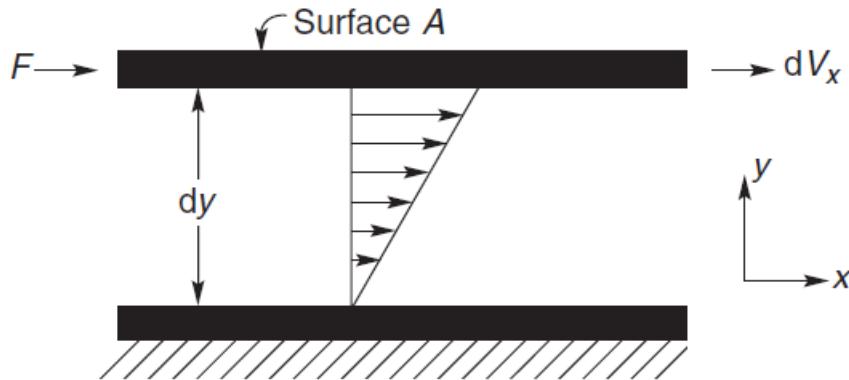


Figure 2.13 Représentation schématique d'un écoulement unidirectionnel cisailé.

À travers cette expérience on peut définir les paramètres suivants :

- La contrainte de cisaillement (τ) ou *shear stress* qui est le rapport de la force F par unité de surface. Elle s'exprime en Pa ou KPa et sa formule s'écrit :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

- Le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) ou *shear rate* qui peut, dans ce cas simple, être assimilé à un gradient de vitesse. C'est un grandeur physique qui mesure la vitesse de déformation d'un fluide lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement. L'unité du taux de cisaillement est le s^{-1} ou 1/s.
- La viscosité dynamique apparente (μ ou η) du fluide (en Pa.s) qui correspond au rapport de la contrainte de cisaillement sur le taux de cisaillement :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.13)$$

La représentation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement ($\tau = f(\dot{\gamma})$) est appelée rhéogramme ou courbe d'écoulement (Barnes et al., 1989).

Fluides newtoniens

On dit qu'un fluide est newtonien lorsque la contrainte de cisaillement (τ) est linéairement proportionnelle à la vitesse de cisaillement. Pour un fluide newtonien, la viscosité dynamique reste constante avec la variation du taux de cisaillement. La courbe d'écoulement donnant τ en fonction de $\dot{\gamma}$ est alors une droite.

Un fluide est dit non newtonien lorsque sa viscosité dynamique dépend de la variation du taux de cisaillement.

Fluides non-newtoniens

Le développement des rhéomètres au 19^e siècle a permis de constater que les fluides ne sont pas toujours newtoniens (Bonnoit, 2009). Au contraire, la majorité des fluides présentent un comportement non-newtonien. Leur viscosité peut dépendre du taux de cisaillement appliqué.

On constate plusieurs formes de comportement d'écoulement non-newtonien. La

Figure 2.14 présente les différents types de comportement non newtoniens :

- Un fluide est dit pseudoplastique (rhéofluidifiant) lorsque sa viscosité est une fonction décroissante de $\dot{\gamma}$ et dilatant (rhéoépaississant) dans le cas contraire. Le rhéogramme présente une forme incurvée avec une concavité tournée vers l'axe des abscisses ($\dot{\gamma}$) dans le premier cas et une concavité tournée vers l'axe des ordonnées (τ) dans le second cas. La loi de puissance permet de décrire ce genre de comportement pour les fluides pseudoplastiques et dilatants :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.14)$$

Avec K (Pa.sⁿ) indice de consistance et n , indice d'écoulement ($n < 1$ pour un fluide pseudoplastique, $n > 1$ pour un fluide dilatant, $n = 1$ pour un fluide Newtonien).

- Certains fluides sont qualifiés de fluides à « seuil ». Autrement dit, pour ces fluides il n'y aura pas d'écoulement tant que la contrainte appliquée ne dépasse pas une valeur critique de cisaillement (τ_0 ou τ_y) appelée seuil de cisaillement ou *yield stress*.

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}n \quad (2.15)$$

Dans le cas où le fluide est un fluide à « seuil » et que sa courbe d'écoulement est linéaire ($n = 1$), son comportement est décrit par le modèle de Bingham:

$$\tau = \tau_{yB} + \mu_B \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

Avec μ_B la viscosité plastique de Bingham (Pa.s).

- Enfin, il existe des fluides non newtoniens dont le comportement dépend du temps d'écoulement ou de cisaillement. On parle alors de thixotropie quand la viscosité diminue avec le temps alors que le cisaillement appliqué est constant ou de viscoélastique quand le comportement est intermédiaire entre un solide élastique et un liquide. Ce comportement est particulièrement observé chez les argiles sensibles.

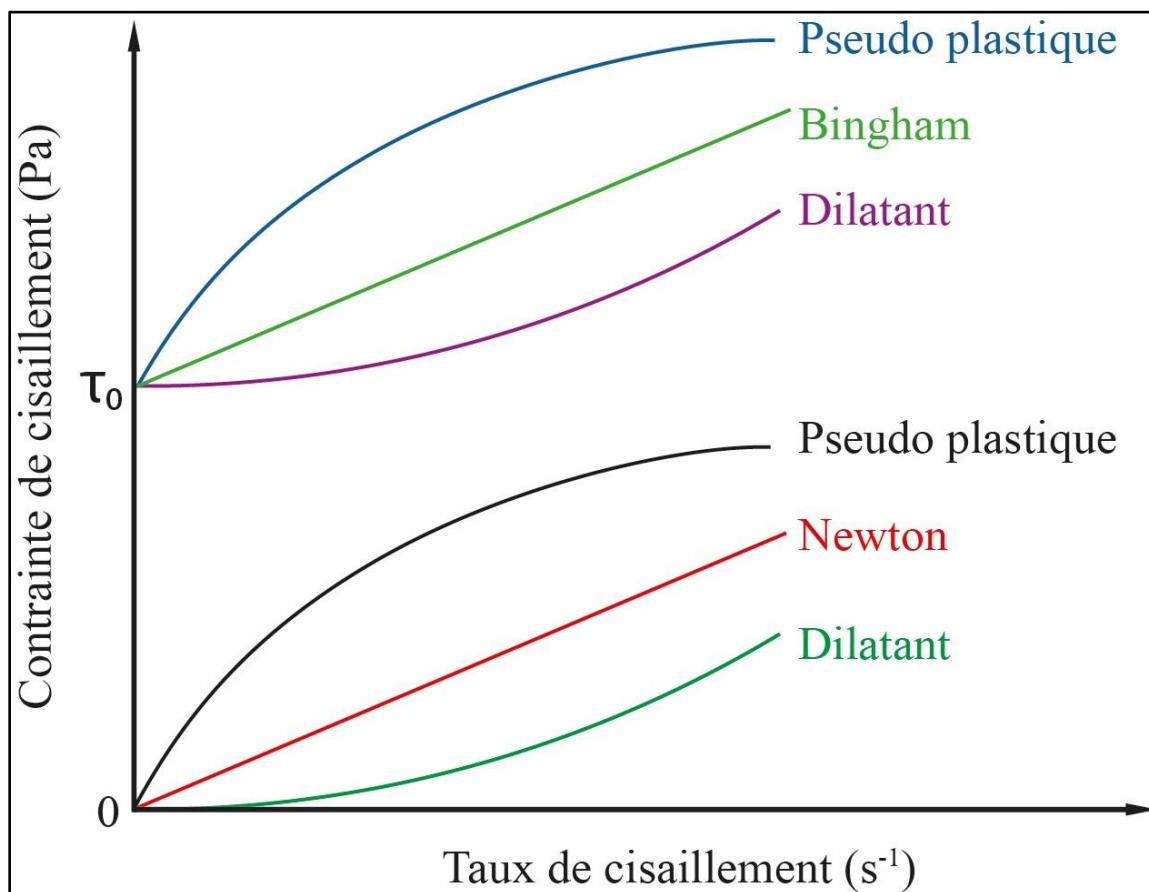


Figure 2.14 Courbes d'écoulement (rhéogrammes) des principaux comportements rhéologiques de fluides non-newtoniens indépendants du temps.

2.4.2 Détermination des caractéristiques rhéologiques des fluides

La détermination des caractéristiques d'écoulement d'un fluide nécessite la compréhension de la réponse de ce dernier à la suite d'une contrainte imposée. La relation entre la contrainte et le taux de déformation du fluide en fonction du temps permet de mesurer les caractéristiques rhéologiques du fluide. Le rhéomètre est l'appareil conçu spécialement pour ces mesures.

2.4.2.1 Types de rhéomètres

Les rhéomètres sont des instruments utilisés pour mesurer les propriétés rhéologiques des matériaux, c'est-à-dire leur comportement en réponse à des contraintes de déformation. Il existe différents types de rhéomètres, adaptés à diverses applications et types de matériaux. Parmi les types de rhéomètres habituellement utilisés, on peut citer (Hou & Kassim, 2005; Ouattara, 2011; Weipert, 1990) :

- Les rhéomètres rotatifs, également appelés viscosimètres rotatifs. Le principe général de fonctionnement d'un rhéomètre rotatif implique la rotation d'un élément, tel qu'une pale ou un disque, à l'intérieur d'un échantillon de matière. L'échantillon à tester est placé entre deux surfaces solides, l'une en rotation (rotor) et l'autre fixe (stator). Ces rhéomètres rotatifs peuvent utiliser plusieurs types d'éléments de mesures tels que des cônes, des cylindres ou des disques;
- Le rhéomètre oscillatoire : Ce type de rhéomètre est souvent utilisé pour étudier les matériaux viscoélastiques. Une contrainte oscillatoire est appliquée au matériau pour mesurer la réponse en déformation;
- Le rhéomètre à torsion : Une torsion dynamique est appliquée pour mesurer la réponse d'un matériau aux contraintes de cisaillement. Il mesure la viscosité et les propriétés de relaxation des matériaux;
- Le rhéomètre capillaire ou viscosimètre capillaire : Il mesure la viscosité d'un liquide en le faisant s'écouler à travers un tube capillaire sous contrôle du débit;

- Le rhéomètre à compression : Ce type de rhéomètre utilise une contrainte de compression pour mesurer les propriétés viscoélastiques des matériaux. Il est souvent utilisé pour les matériaux tels que les pâtes, les gels et les mousses;
- Le rhéomètre à extension : Il est souvent utilisé pour les polymères et les matériaux élastomères. Il mesure la réponse d'un matériau à une contrainte d'extension, etc.

Les rhéomètres sont utilisés dans divers domaines tels que l'industrie des polymères, des cosmétiques, des produits alimentaires, des pâtes et papiers, etc., pour caractériser les propriétés rhéologiques des matériaux. Les résultats d'analyses rhéologiques permettent de déterminer les propriétés rhéologiques du fluide analysé telles que le seuil de cisaillement et la viscosité.

2.4.2.2 Méthodes d'estimation indirecte des paramètres rhéologiques

Il existe des méthodes indirectes de détermination des paramètres rhéologiques d'un fluide. Ce sont, en effet, des approches qui permettent d'estimer les propriétés rhéologiques d'un matériau sans pour autant effectuer des mesures directes. Ces méthodes sont souvent utilisées lorsque les techniques directes sont difficiles à réaliser (ex. coût élevé, impraticabilité). C'est le cas par exemple de l'essai d'affaissement au cône standard d'Abra, utilisé dans l'industrie minière pour estimer du remblai en pâte cimenté (RPC) mais aussi évaluer sa transportabilité. C'est aussi le cas du calcul du seuil de cisaillement au moyen de l'écoulement du matériau le long d'un plan incliné proposé par Coussot & Boyer (1995).

2.5 Corrélation entre la rhéologie et la ségrégation hydraulique

Le lien entre la rhéologie et la ségrégation hydraulique est un sujet d'étude dans plusieurs domaines, notamment en génie civil, en génie des matériaux et en géotechnique. Comme évoqué dans ce même chapitre, la rhéologie se réfère à l'étude du comportement déformable des matériaux, tandis que la ségrégation hydraulique se réfère à la séparation des particules dans un matériau principalement en raison de différences de densité et de taille lorsqu'il est soumis à un écoulement.

Dans de nombreux matériaux, comme les suspensions colloïdales, les bétons, les sols et les mélanges granulaires, la rhéologie influence la manière dont les particules se déplacent et se redistribuent lorsqu'elles sont soumises à un écoulement (Jasiūnienė et al., 2018; Talmon et al., 2014; Yan et al., 2020).

Dans le contexte des résidus miniers, la corrélation entre la rhéologie et la ségrégation hydraulique est un sujet crucial en raison des risques environnementaux et de sécurité associés à la gestion de ces déchets. La corrélation entre la rhéologie et la ségrégation hydraulique des résidus miniers est complexe et dépend de divers facteurs, notamment la composition des résidus, les conditions environnementales et les méthodes de gestion des résidus (Mihiretu et al., 2008; Talmon et al., 2014; Zhang et al., 2023).

Par exemple, des résidus miniers avec une rhéologie fluide favorise la décantation différentielle et accentue la ségrégation, tandis qu'une viscosité élevée tend à la limiter. Zhang et al. (2023) ont également mis en évidence l'influence de la concentration massique et de la distribution granulométrique sur les paramètres rhéologiques et l'affaissement de pulpes de résidus. Leurs résultats montrent que l'affaissement (*Slump*) diminue de manière quadratique avec l'augmentation de la concentration massique et avec la réduction de la taille des particules. Par ailleurs, la contrainte seuil augmente selon une loi quadratique, tandis que la viscosité plastique croît linéairement avec la concentration massique.

Comprendre cette corrélation est essentiel pour concevoir des systèmes de gestion des résidus miniers plus efficaces et durables, afin de réduire les risques de pollution de l'eau, d'instabilité des structures de stockage et d'autres impacts environnementaux négatifs associés à ces déchets.

2.6 Essais d'écoulements en canal (*flume test*)

Les essais d'écoulement en canal ou *flume tests* sont des essais expérimentaux en laboratoire, utilisés généralement pour étudier le comportement des écoulements de fluides ou de suspensions solides-liquide chargées en particules dans un canal rectiligne à échelle contrôlée. Ils permettent d'observer et de quantifier des phénomènes hydrauliques et de sédimentation tels que la dynamique de transport des particules, la formation des profils de dépôt et l'interaction entre les phases solide et liquide sous des conditions contrôlées de pente, de débit et de concentration en solides (Gao, 2015).

Dans le contexte des résidus miniers, les essais en canal sont largement employés pour analyser le comportement d'écoulement et des résidus miniers déposés hydrauliquement, notamment ceux épais. Plusieurs études ont montré que les propriétés rhéologiques, en particulier le seuil de

cisaillement (*shear yield stress*), jouent un rôle déterminant dans la géométrie finale du dépôt et la longueur de la plage formée lors du dépôt hydraulique (Gao & Fourie, 2015).

Les essais en canal ont également été utilisés pour établir des relations entre les conditions d'écoulement (débit, pente, concentration massique en solides) et les caractéristiques spatiales du dépôt, telles que la granulométrie et la ségrégation des particules le long de la distance d'écoulement (Gao, 2015).

Par ailleurs, des essais en canal instrumentés ont permis d'étudier des phénomènes d'instabilité et de fluidisation des dépôts de résidus sous infiltration d'eau ou sous chargement hydraulique, en mesurant l'évolution des pressions interstitielles, des déformations et de la structure interne du matériau (Hu et al., 2021).

Malgré leurs nombreux avantages, les essais en canal présentent certaines limites, notamment liées aux effets d'échelle et aux influences des parois latérales du canal. L'extrapolation des résultats obtenus en laboratoire aux conditions réelles de terrain nécessite donc une analyse rigoureuse des lois de similitude et des paramètres adimensionnels pertinents (Cadilhe de Oliveira & Passini, 2025).

CHAPITRE 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Le cadre scientifique du projet est expérimental (travaux de laboratoire). Dans un premier temps, l'étude repose sur des mesures directes des propriétés physiques, ainsi que sur des tests rhéologiques réalisés sur les différents échantillons de résidus miniers en écoulement.

Pour atteindre l'objectif de l'étude, les tâches suivantes seront réalisées :

- Échantillonnage des résidus miniers;
- Caractérisation physique des résidus miniers échantillonnés;
- Analyse de la composition chimique du surnageant des résidus miniers en écoulement;
- Caractérisation rhéologique des résidus miniers échantillonnés;
- Essais d'écoulement en canal (*flume tests*).

3.1 Approches expérimentales

Il convient de souligner que l'objectif central de ce projet de maîtrise consiste à approfondir, à travers une démarche expérimentale, la compréhension des conditions physico-rhéologiques gouvernant la ségrégation granulométrique lors du dépôt hydraulique des résidus miniers dans les parcs à résidus. À cette fin, un programme structuré d'analyses et d'essais expérimentaux sera mis en œuvre. Les essais expérimentaux ont pour objectif d'examiner en détail les propriétés physiques et rhéologiques des résidus miniers au cours de leur écoulement à surface libre, tant dans le parc à résidus de la mine MCM que dans le canal expérimental (*flume tests*) du laboratoire de l'UQAT. Parallèlement, les analyses auront pour objectif de caractériser les différents échantillons de résidus miniers : d'une part, les résidus « de base » provenant de la mine Goldex, faisant l'objet d'une caractérisation physique, et d'autre part, les résidus en écoulement prélevés dans le parc à résidus de la mine MCM, soumis à des caractérisations physiques, géochimiques et minéralogiques, ainsi que ceux collectés lors des essais d'écoulement en canal à l'UQAT, pour lesquels des caractérisations physiques ont été réalisées.

La Figure 3.1 présente l'organigramme des principaux essais expérimentaux et analyses à réaliser au laboratoire de l'IRME à l'UQAT. Il s'agit notamment de/des :

- I. Échantillonnage des résidus miniers à la mine Goldex et des résidus miniers en écoulement sur le parc à résidus de MCM;
- II. Caractérisation physique à la fois des résidus de la mine MCM et de la mine Goldex à travers laquelle seront déterminés les paramètres tels que la teneur en eau massique (w) et le pourcentage de solides (C_w) à l'étuve, la densité relative (G_s) au pycnomètre à hélium et la distribution granulométrique au granulomètre laser ;
- III. Analyse de la composition minéralogique des résidus de la mine MCM par diffraction aux rayons X (DRX). Cette analyse n'a pas été réalisée pour les résidus échantillonnés à l'usine de remblai en pâte de la mine Goldex ;
- IV. Analyse géochimique de l'eau issue de ces résidus miniers MCM (eau surnageant) pour déterminer les paramètres tels que la conductivité électrique (CE), le potentiel d'hydrogène (pH) ainsi que le potentiel redox (Eh);
- V. Essais d'écoulement en canal ou *flume tests* qui seront réalisés avec les résidus de la mine Goldex uniquement;
- VI. Essais rhéologiques à l'aide du rhéomètre AR2000 de TA Instruments qui vont permettre de déterminer les paramètres d'écoulement tels que la viscosité dynamique (η ou μ) et le seuil de cisaillement ou d'écoulement (τ_0).

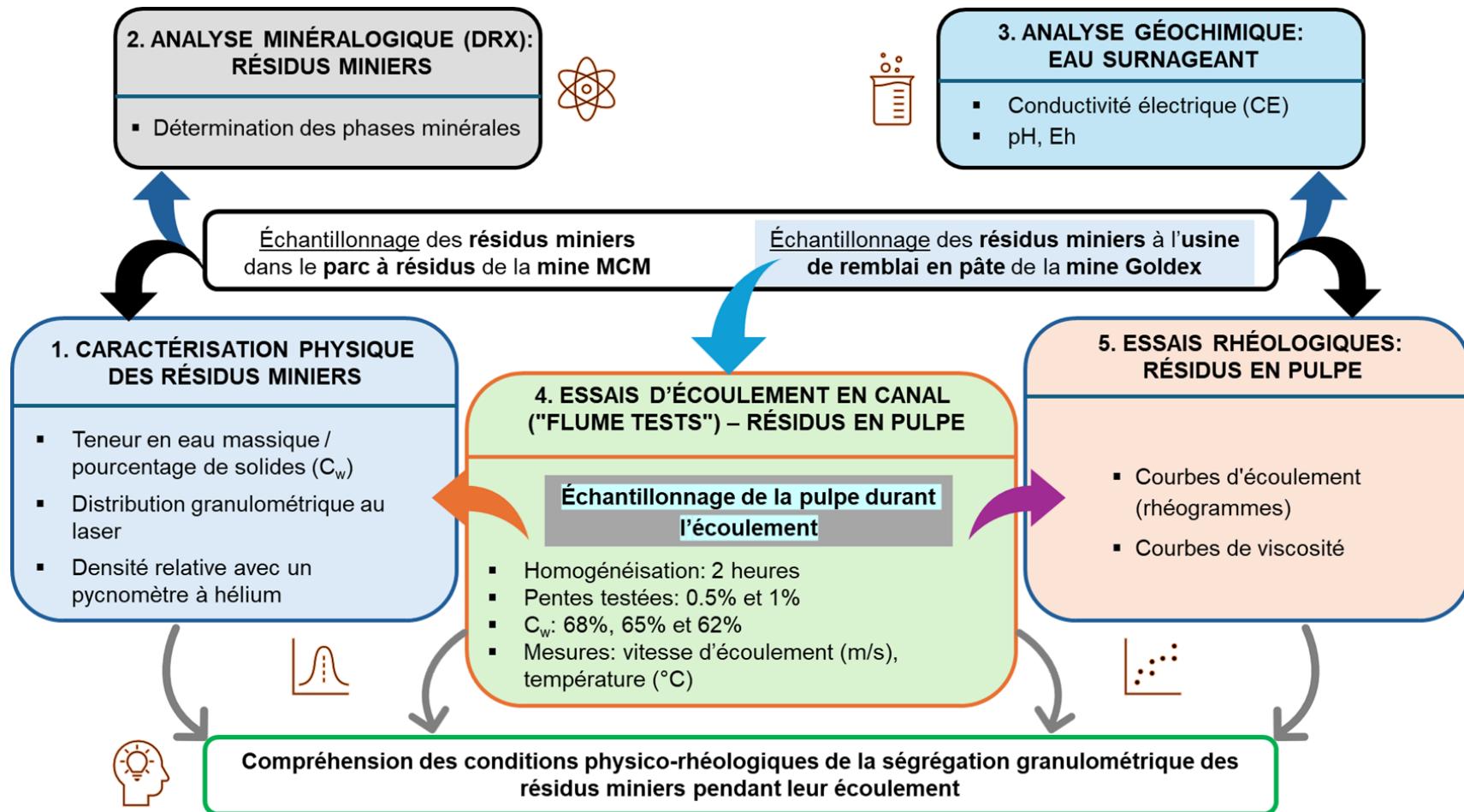


Figure 3.1 Organigramme des travaux à entreprendre au laboratoire.

L'analyse détaillée de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus permettra de définir la ou les relation(s) entre les propriétés physiques et rhéologiques des résidus miniers et le potentiel de ségrégation hydraulique.

3.2 Échantillonnage des résidus miniers

Pour la réalisation des travaux, les résidus miniers ont été échantillonnés à la fois sur le parc à résidus de la Mine Canadian Malartic (MCM) et à l'usine de remblai en pâte de la mine Goldex. Ces deux mines d'or sont opérées par la compagnie Mines Agnico Eagle Ltée. La mine MCM est située dans la ville de Malartic, au Québec, et est l'une des plus grandes mines d'or à ciel ouvert au Canada (Figure 3.2). Quant à la mine d'or souterraine Goldex, elle est située à Val-d'Or, également au Québec (Figure 3.2).

Des résidus épaissis en écoulement (concentration massique en solides, C_w , compris entre 62 et 65%) ont été échantillonnés (juillet 2021) dans le parc à résidus de la mine MCM (Figure 3.3). Dix points de prélèvement ont été identifiés en fonction du sens de l'écoulement de la pulpe de résidus miniers (Figure 3.3d). Le premier prélèvement est effectué au point de déversement (point 0) (Figure 3.3c). Pour ce point 0, des prélèvements ont été réalisés à l'aide d'échantillonneurs horizontaux (H1, H2) et verticaux (V1, V2) (Figure 3.3 e, f). Contrairement aux autres points (points 1, 2, 3, 4, etc.), seuls les prélèvements avec les échantillonneurs horizontaux ont pu être effectués. Les échantillons prélevés sont placés dans des chaudières de 5 litres pour être ramenés au laboratoire pour leur stockage à l'entrepôt de l'UQAT.

Quant aux résidus miniers échantillonnés à l'usine de fabrication du remblai en pâte de la mine Goldex (juillet-août 2025), ils étaient filtrés à une concentration en solides de $C_w = 80\%$. Ces résidus sont destinés aux essais d'écoulement en canal (*flume tests*) qui sont réalisés au laboratoire de l'UQAT.

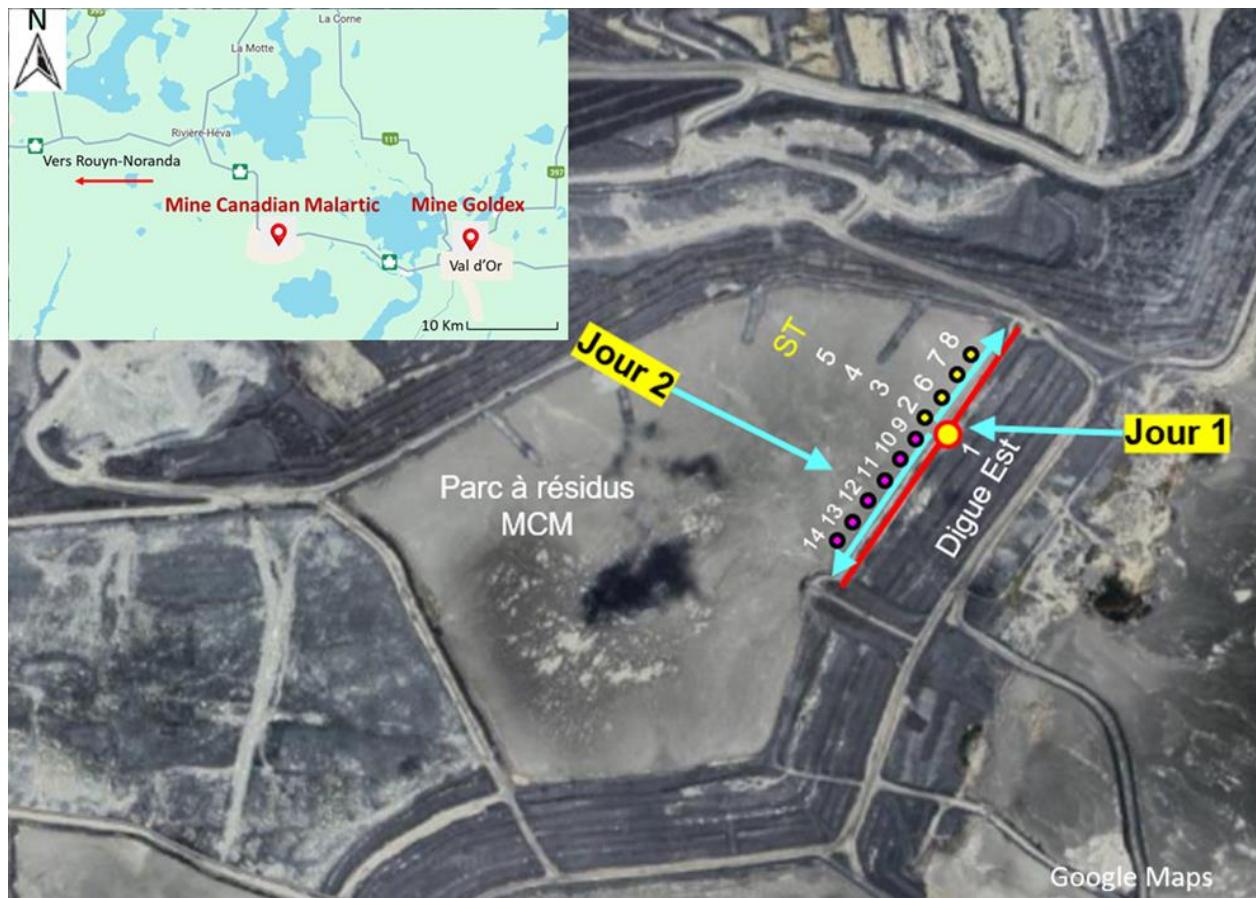


Figure 3.2 Localisation des mines (Canadian Malartic et Goldex) et emplacements physiques de prélèvement des échantillons de résidus miniers en écoulement dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic (MCM).



Figure 3.3 Campagne d'échantillonnage et de mesure sur le parc à résidus de la mine Canadian Malartic (MCM) : a) Ordinateur et Data logger, b) vélocimètre, c) mesures des vitesses, d) points d'échantillonnage, e) bouteille d'échantillonnage verticale, f) bouteille d'échantillonnage horizontale.

3.3 Essais d'écoulement en canal (*Flume tests*)

Afin de mieux comprendre le phénomène de ségrégation granulométrique, voire de quantifier le degré de ségrégation granulométrique latérale (DS_{GL}), une série d'essais d'écoulement en canal a été mise en œuvre au laboratoire de l'UQAT.

Les essais d'écoulement en canal (*Flume tests*). Ces essais vont permettre d'étudier le comportement en écoulement des résidus en pulpe. L'objectif est d'observer ou de quantifier la tendance des particules à se trier selon leur taille, leur densité ou leur forme sous l'effet du courant (selon la concentration en solides, le débit et la vitesse d'écoulement).

Il s'agit d'une méthode expérimentale couramment utilisée en hydraulique sédimentaire pour analyser le comportement de matériaux particulaires transportés par un écoulement d'eau.

Tel qu'indiqué à la Section 3.1 ainsi qu'à la Figure 3.1, ces essais d'écoulement en canal seront réalisés avec uniquement les résidus miniers de la mine Goldex, puisque la quantité des résidus miniers de la mine MCM n'était pas suffisante pour effectuer ces essais.

3.3.1 Dispositif expérimental

La réalisation des essais d'écoulement en canal a nécessité l'utilisation de divers matériels et équipements. Le canal d'essai (*flume*) constitue l'un des matériels centraux du dispositif expérimental.

Il s'agit d'un canal artificiel rectangulaire, en PVC (polychlorure de vinyle) rigide à fond (plat) et parois lisses permettant l'écoulement des résidus miniers en pulpe. Le canal est constitué de six sections mesurant chacune environ 2,44 m de long. La longueur totale du canal est de 14,63 m pour une largeur intérieure de 0,52 m et une profondeur de 0,23 m.

Après jonction des six sections, du silicone est appliqué au niveau desdites jonctions afin d'assurer une étanchéité et prévenir d'éventuelles fuites tout au long du canal. Après installation, un test d'étanchéité a été effectué. Le test a consisté à remplir le canal d'eau et détecter les points de jonction au niveau desquels il y avait des fuites.

Les points de fuite identifiés ont ensuite été colmatés pour garantir l'intégrité du dispositif durant les essais. La Figure 3.4 présente une vue schématique du canal, incluant ses principales dimensions, ainsi qu'une photographie du dispositif après son installation complète.

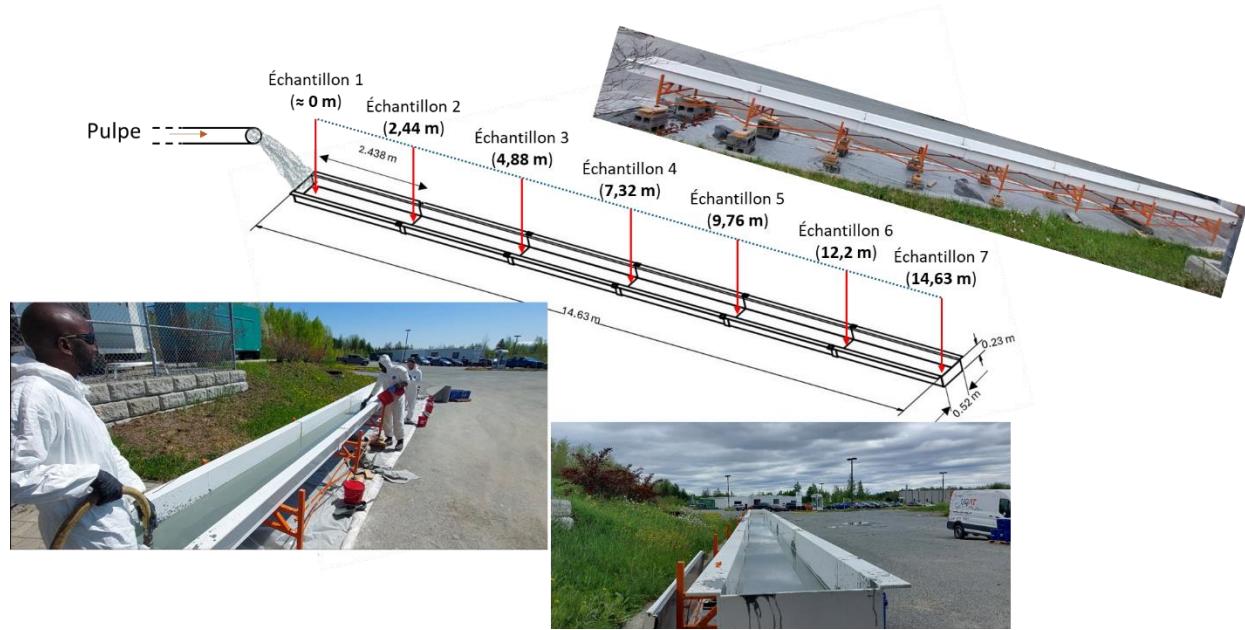


Figure 3.4 Vue schématique et image réelle du canal (après installation complète) avec les distances d'échantillonnage.

Le Tableau 3.1 présente les principaux équipements utilisés, regroupés par catégorie, depuis l'infrastructure du canal jusqu'aux instruments de mesure et au matériel de laboratoire.

Tableau 3.1 Principaux équipements et matériels utilisés pour les essais d'écoulement en canal

Catégorie	Équipement / Matériel	Fonction
Canal d'essai (Flume)	Canal rectangulaire (14,63 m de long, 0,52 m de large, 0,23 m de profondeur)	Simule l'écoulement réel de la pulpe ; permet l'observation de la ségrégation
	Structure inclinable	Ajuste la pente d'écoulement
	Niveau à bulle	Vérifie de l'horizontalité des deux bords du canal
	Théodolite	Mesure les angles
Système d'alimentation	Réservoir de pulpe avec agitateur	Maintient la pulpe homogène
	Pompe de circulation (débit réglable)	Fournit un débit constant dans le canal
	Pelle	Sert à prendre et placer les résidus dans le réservoir
Instrumentation de mesure	Capteur de température	Mesure la variation de la température à l'aide de sondes installées
	Chronomètre	Mesure de la vitesse d'écoulement et contrôle de la durée de l'essai
Système d'échantillonnage	Échantillonneur et chaudière (petite)	Collecte et entreposage d'échantillon
	Prélèvements manuels à intervalle régulier	Caractérisation physique et essais rhéologiques
Matériel de laboratoire	Balance de précision	Pesée des échantillons avant et après séchage
	Étuve (60 °C)	Séchage des échantillons pour détermination des solides secs
	Baril et chaudière (grande)	Récupération et entreposage de la pulpe après chaque essai
	Granulomètre laser	Analyse granulométrique
	Pycnomètre à hélium	Mesure de la densité relative des grains solides
	Rhéomètre AR2000	Essais rhéologiques
Sécurité	Gants, lunettes, blouse, bottes	Protection individuelle contre éclaboussures et blessures éventuelles

L'exécution des essais d'écoulement en canal a suivi une démarche structurée visant à assurer la reproductibilité des résultats et l'identification des paramètres influents. Les principales étapes sont décrites ci-dessous :

a) Préparation du dispositif du canal d'écoulement

- Installation de la structure, assemblage et mise en place du canal;
- Vérification de l'état général du canal, des jonctions entre les six sections modulaires et des instruments de mesure;
- Ajustement de la pente du canal selon les conditions définies pour l'essai (0,5% et 1% ou 0,29° et 0,57°);
- Mise en service du système d'agitation dans le réservoir afin d'assurer une suspension homogène des résidus en pulpe;

b) Préparation de la pulpe

- Retirer et conserver l'eau surnageant au-dessus des résidus dans les chaudières. La concentration en solides de base, C_{w0} , est de 80%;
- Vider les barils contenant les résidus sur le sol, puis transférer ces derniers dans deux réservoirs à l'aide de pelles.
- Préparer la pulpe à partir des résidus miniers en y ajoutant l'eau surnageante, tout en respectant la concentration massique initiale cible C_{wi} (68%, 65% et 62%). L'équation suivante permet de déterminer la quantité d'eau à ajouter :

$$M_{w_{aj}} = M_{T0} * \left(\frac{C_{w0}}{C_{wi}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

$M_{w_{aj}}$: masse d'eau ajoutée (kg)

M_{Ti} : masse totale de base avant ajout d'eau (kg)

C_{w0} : concentration en solides de base (%) (= 80%)

C_{wi} : concentration en solide initiale cible (%)

- Homogénéiser la pulpe par agitation mécanique pendant une durée suffisante (environ 2 heures) avant son acheminement dans le canal;
- Installer les capteurs de température (thermocouples) ainsi que le dispositif d'échantillonnage.

c) Démarrage de l'écoulement en canal

- Amorçage du mixeur-pompe à béton et initiation de l'écoulement dans le canal;
- Réglage du débit d'alimentation (constant);
- Stabiliser le régime d'écoulement, débuter les observations et les prélèvements (échantillonnages).

d) Observation et enregistrement des données

- Observer visuellement le comportement de la pulpe : décantation, stratification, accumulation au fond, etc.;
- Acquérir les données relatives à la vitesse d'écoulement;
- Enregistrer les températures indiquées par les thermocouples.

e) Prélèvement d'échantillons

- Effectuer des prélèvements de pulpe à différentes distances le long du canal selon l'axe longitudinal (cf. Figure 3.5);
- Recueillir des échantillons dans de petites chaudières, étiquetées et identifiées selon leur position.

f) Nettoyage et préparation pour les essais subséquents

- Vidanger complètement le canal et le rincer avec de l'eau claire afin d'éviter toute contamination entre les essais;
- Nettoyer le réservoir avant de le remplir;

- Recalibrer éventuellement les capteurs si nécessaire.

La Figure 3.5 illustre les différentes étapes de mise en œuvre des essais d'écoulement en canal. Elle reconstitue l'ensemble du processus, depuis la préparation de la pulpe à partir des résidus miniers de base jusqu'à la collecte des échantillons. Cette illustration permet de mieux comprendre le déroulement global des opérations ainsi que la séquence logique suivie pour assurer la fiabilité des résultats obtenus.

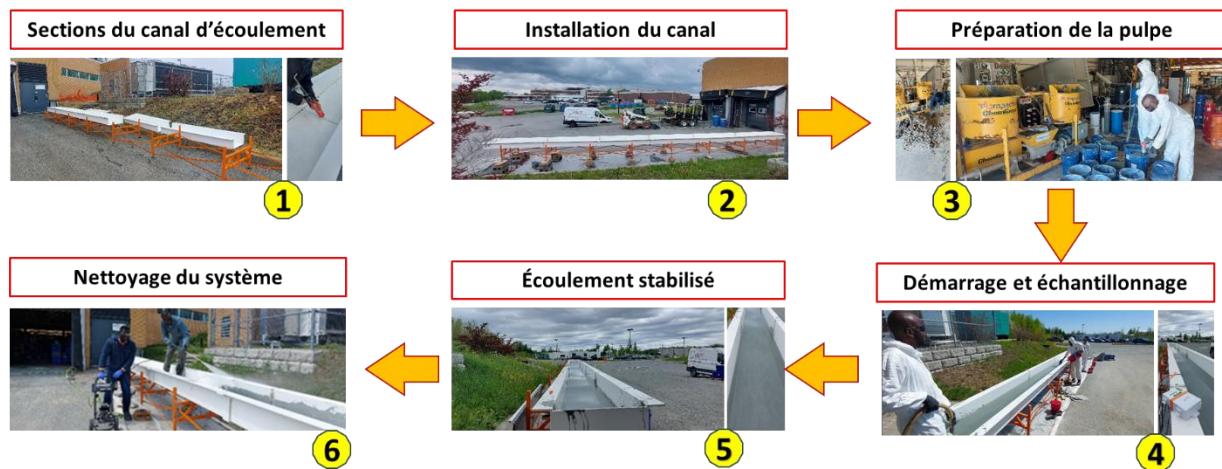


Figure 3.5 Illustration des différentes étapes de l'essai d'écoulement en canal, allant de la préparation de la pulpe aux prélèvements des échantillons.

3.4 Caractérisation physique des résidus miniers

La caractérisation physique des résidus consistera à en analyser les propriétés. Ceci permettra d'obtenir des données, qui, une fois analysées, aideront à mieux comprendre la nature des résidus miniers.

Les résidus échantillonnés à la mine Goldex étaient filtrés, tandis que ceux échantillonnés dans le parc à résidus de la mine MCM étaient sous forme de pulpe. Pour ces derniers, il est important de préciser que chaque échantillon a été homogénéisé dans la chaudière de 5 litres qui le contient (remise en suspension avant utilisation), car les résidus se sédimentent au fil du temps. Pour procéder à la prise d'un échantillon représentatif de résidus humides, il est indispensable d'homogénéiser l'eau surnageante et la matière solide des résidus. Ainsi, chacune des 14 chaudières a d'abord été homogénéisée avant que les prises d'échantillon ne soient placées dans l'étuve.

La Figure 3.6 illustre les étapes de préparation des échantillons au laboratoire, qui précèdent la détermination des paramètres physiques.



Figure 3.6 Étapes de préparation des échantillons au laboratoire.

3.4.1 Teneur en eau massique

La détermination de la teneur en eau massique (w) des résidus est la première étape de la caractérisation physique. Elle consiste à évaluer la masse d'eau dans l'échantillon par rapport à la masse totale de l'échantillon. Pour ce faire, une prise d'échantillon représentative de résidus humides de masse (M_h) est placée à l'étuve réglée à la température de 60 °C (température appropriée pour les résidus miniers) jusqu'à l'atteinte d'un séchage complet (selon l'ASTM D2216-19). L'obtention de la masse sèche (M_d) constante est assurée par des mesures consécutives de 24 h d'intervalle. La teneur en eau massique (w) correspond alors au rapport entre la masse d'eau M_w ($= M_h - M_d$) contenue dans l'échantillon de résidus et la masse des résidus secs (M_d).

$$w(\%) = \frac{M_w = (M_h - M_d)}{M_d} \times 100 \quad (3.2)$$

Toutefois, dans l'industrie minière, c'est le pourcentage de solides (ou concentration massique en solides) C_w qui est le paramètre le plus utilisé et est le rapport entre la masse sèche (M_d) et la masse humide (M_h) de l'échantillon :

$$C_w(\%) = \frac{M_d}{M_h} \times 100 \quad (3.3a)$$

La concentration massique en solides (C_w) est directement reliée à la teneur en eau massique par la relation suivante:

$$C_w(\%) = \frac{100}{100 + w(\%)} \times 100 \quad (3.3b)$$

3.4.2 Distribution granulométrique

L'analyse granulométrique des échantillons de résidus permet de mieux comprendre la distribution des tailles de particules (selon l'ASTM D422-63). Cette analyse granulométrique est réalisée à l'aide du granulomètre laser Mastersizer 3000 de Malvern (Figure 3.7).

L'utilisation de cet appareil est bien adaptée pour les résidus miniers dont la taille maximale est de 1000 μm . En effet, le granulomètre laser permet de quantifier la distribution granulométrique d'un matériau granulaire dont les tailles des particules sont comprises entre 0,05 μm et 900 μm .

De plus, comparativement aux méthodes par tamisage et par sédimentométrie, l'analyse granulométrique au laser est une méthode rapide. C'est une méthode qui repose sur la diffusion de la lumière.

Lorsque les particules passent devant le faisceau laser, elles diffractent la lumière à des angles qui dépendent de leur taille. Ce qui permet de déterminer la distribution des tailles des particules dans un échantillon.



Figure 3.7 Granulomètre laser Mastersizer 3000 de Malvern Panalytical utilisé.

Les étapes de l'analyse peuvent être résumées comme suit :

- Configurer les paramètres (identification de l'échantillon, densité, type de nettoyage, etc.);
- Prélever un échantillon représentatif;
- Introduire l'échantillon dans l'analyseur tout en s'assurant qu'il est bien dispersé dans l'eau (notre cas, granulométrie à cellule humide) au moyen d'ultrasons pour éviter l'agglomération des particules;
- Activer le laser pour que les particules diffractent la lumière.

Le granulomètre laser produit une courbe granulométrique volumique représentative de toute la distribution de la taille de grains, contrairement au tamisage qui donne des proportions massiques de chaque classe granulométrique.

3.4.3 Densité relative

La densité relative (G_s ou D_R) des grains solides est une mesure importante en sciences des matériaux et en géotechnique. La densité relative des grains solides des résidus miniers est un paramètre clé pour évaluer leur comportement physique et déterminer les meilleures pratiques pour leur gestion et leur stockage. Elle est définie comme étant le rapport de la masse volumique des grains solides (ρ_s) à la masse volumique de référence, généralement celle de l'eau (ρ_w). Une densité relativement élevée peut indiquer une meilleure stabilité physique des résidus, ce qui est favorable pour les procédés de stockage et de confinement.

La densité relative des grains solides des échantillons de résidus a été déterminée à l'aide du pycnomètre à hélium ULTRAPYC 1200 de Micromeritics (Figure 3.8). Ce dernier est un instrument spécifique pour déterminer le volume d'un échantillon en le remplissant d'hélium (selon l'ASTM D5550-14).

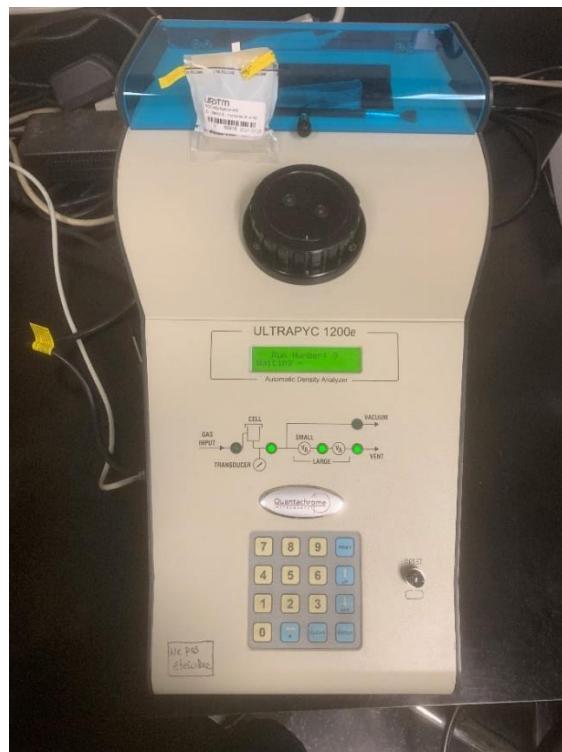


Figure 3.8 Pycnomètre à hélium utilisé.

Les étapes suivantes ont été suivies pour déterminer la densité relative des échantillons :

- S'assurer que l'appareil est propre, correctement calibré et prêt à l'emploi;
- Déterminer la masse à vide du porte-échantillon cylindrique à l'aide d'une balance précise et faire la tare;
- Mesurer à l'aide de la même balance la masse de l'échantillon sec dont on souhaite déterminer la densité relative (l'échantillon doit être représentatif et exempt de toute contamination);
- Placer le porte-échantillon avec l'échantillon dans la cellule d'analyse du pycnomètre;
- Fermer hermétiquement le pycnomètre pour éviter toute fuite de gaz;
- Entrer l'identification de l'échantillon ainsi que sa masse correspondante à l'aide du clavier du pycnomètre;
- Lancer la mesure.

L'appareil détermine automatiquement la valeur de la densité relative de l'échantillon. Pour chaque échantillon, l'appareil procède à une série de 15 mesures et donne une valeur moyenne de ces mesures qui représentera la densité relative de l'échantillon.

3.5 Caractérisation minéralogique

La caractérisation minéralogique permet d'identifier les phases minérales présentes dans les résidus miniers. La technique analytique utilisée dans le cadre de cette étude est la diffraction des rayons X (DRX). Elle repose sur l'interaction des rayons X avec les plans atomiques d'un cristal. Un échantillon frappé par un faisceau de rayons X se diffracte selon des angles spécifiques. Ce qui permet d'identifier les phases minérales présentes dans cet échantillon. Avant de passer à l'analyse, l'échantillon séché est pulvérisé et homogénéisé une autre fois à l'aide de la technique des 4 coins. L'enregistrement des intensités se fait en fonction des angles de diffraction et les données sont collectées sous forme de diffractogrammes.

3.6 Analyse géochimique du surnageant

Avant l'homogénéisation et la prise d'échantillon, l'analyse géochimique de l'eau surnageante des résidus est d'abord réalisée. Les paramètres analysés sont : la conductivité électrique (CE), le potentiel d'hydrogène (pH), la température (T°C) et le potentiel redox (Eh). Un appareil multiparamétrique (Figure 3.9) permet de mesurer directement ces paramètres. La détermination de ces derniers pourrait être d'une grande utilité dans l'interprétation de certains résultats. Par exemple, il est connu que le pH constitue un paramètre qui influe sur les données rhéologiques (Cooke, 2007).

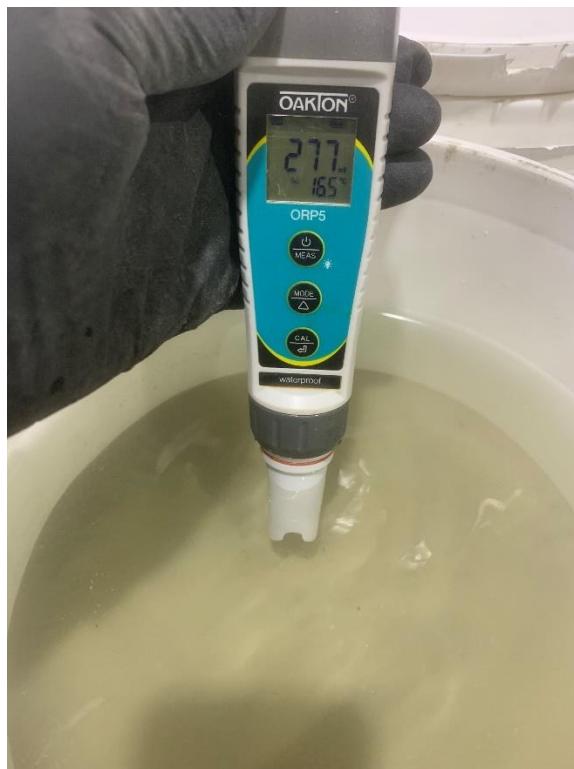


Figure 3.9 Sonde de mesure du potentiel redox.

3.7 Essais rhéologiques

La détermination des paramètres rhéologiques permet de caractériser le comportement des matériaux sous déformation. Il s'agit d'un élément primordial dans la réalisation de cette étude. Les paramètres rhéologiques clés à déterminer sont le seuil d'écoulement ou de cisaillement (τ_0 ou τ_Y) et la viscosité dynamique (η ou μ). Le rhéomètre AR 2000 de TA Instruments (Figure 3.10) est utilisé pour la réalisation des différents tests rhéologiques dans le cadre de cette étude. C'est un

appareil avancé permettant de mesurer les propriétés rhéologiques de fluides et de matériaux semi-solides. Il s'agit d'un rhéomètre rotatif conçu pour évaluer la viscosité et la structure des matériaux. Il est capable de fonctionner sur une large plage de température permettant l'analyse de divers échantillons. Il dispose également d'un large éventail de géométries (cylindres, plaques, moulinets, etc.) adaptées à divers types de matériaux, allant des fluides newtoniens aux matériaux viscoélastiques. Le fonctionnement de ce rhéomètre donne la possibilité de contrôler soit la contrainte de cisaillement (τ), soit la vitesse de rotation, offrant ainsi des données sur le comportement du matériau sous différents taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$). Le rhéomètre AR 2000 est équipé du logiciel TA Advantage permettant l'acquisition et l'analyse des données sur ordinateur.

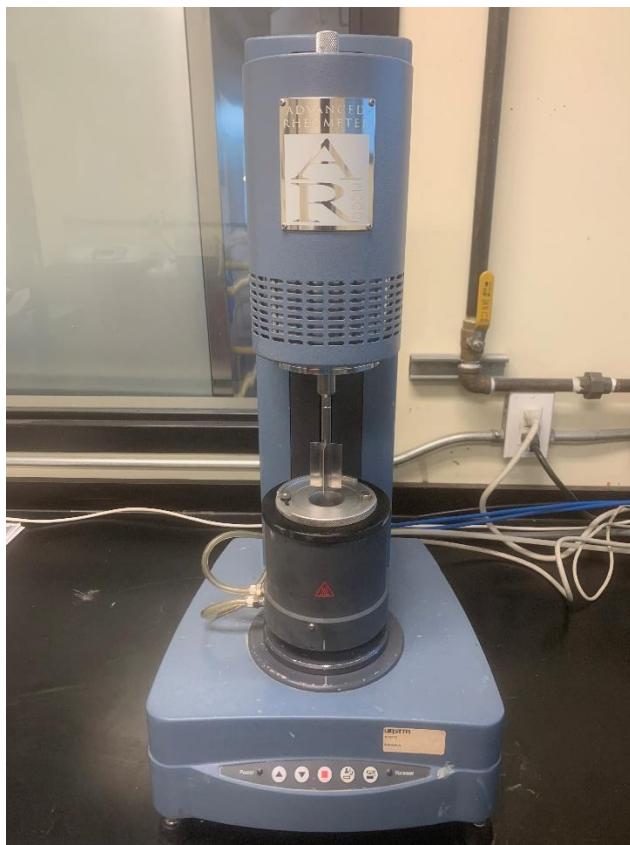


Figure 3.10 Rhéomètre AR2000 de l'URSTM.

Il faudrait souligner le fait que les essais rhéologiques sont réalisés afin d'acquérir les courbes d'écoulement ou rhéogrammes ($\tau = f(\dot{\gamma})$) et les courbes de viscosité ($\mu = f(\dot{\gamma})$) des résidus miniers échantillonnés sur le parc à résidus de la mine MCM et sur les échantillons de pulpe de résidus prélevés au cours des essais d'écoulement en canal (résidus provenant de la mine Goldex).

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Dans ce chapitre sont présentés à la fois les résultats des propriétés des résidus miniers en écoulement à surface libre dans le parc à résidus de la mine MCM (concentration massique en solides C_w , distributions granulométriques, densité relative G_s , minéralogie, physico-géochimie du surnageant, propriétés rhéologiques) ainsi que ceux des résidus de la mine Goldex en écoulement lors d'un essai d'écoulement en canal (vitesse d'écoulement, distribution granulométrique, concentration massique en solides C_w , propriétés rhéologiques).

4.1 Écoulement à surface libre dans le parc à résidus de la mine MCM

4.1.1 Concentration massique en solides (C_w)

Les résultats de la détermination de la teneur en eau massique (w) ainsi que de la concentration massique en solides des quatorze échantillons de résidus miniers, collectés sur les dix stations de prélèvement ainsi qu'à l'extrémité du tuyau de déversement (cf. Figure 3.2) sont présentés dans le Tableau 4.1.

Pour la station 0, où quatre échantillons ont été prélevés, seul le premier échantillon prélevé horizontalement (ST2) est retenu pour l'analyse ultérieure de l'évolution spatiale des paramètres. Les échantillons ST3, correspondant au second prélèvement horizontal, ainsi que ST4 et ST5, prélevés verticalement, ne sont pas considérés dans cette analyse.

Les résultats montrent que la teneur en eau (w) des résidus varie entre 59,7% (ST13) et 64,7% (ST6) selon les différents échantillons. La teneur en eau massique moyenne correspondante est de 63,3%. Ces valeurs indiquent que les résidus miniers MCM contiennent une quantité significative d'eau, ce qui peut influer sur leur gestion, notamment en matière de stockage et de transport. Les écarts par rapport à la moyenne peuvent être dus à des imprécisions lors du prélèvement des résidus à l'aide des bouteilles d'échantillonnage.

En effet, selon la position et/ou l'accessibilité du point d'échantillonnage ainsi que le type d'échantillonnage (vertical ou horizontal), l'échantillonneur peut récolter une quantité de matière solide plus ou moins importante.

Tableau 4.1 Teneur en eau massique et concentration massique en solides des échantillons de résidus miniers en écoulement (ST1 à ST14) du parc à résidus MCM.

Station	Échantillon	Masse initiale (g)	Masse après séchage (g)	w (%)	C _w (%)
Extrémité du tuyau	ST1	987,1	605	63,2	61,3
	ST2	881	539,7	63,2	61,3
	ST3	895,1	546,9	63,7	61,1
	ST4	815,1	496,3	64,2	60,9
	ST5	776,7	475,6	63,3	61,2
0	ST6	922,9	560,2	64,7	60,7
1	ST7	763,2	465,6	63,9	61,0
2	ST8	765	471,8	62,1	61,7
3	ST9	762	466,4	63,4	61,2
4	ST10	747,4	455	64,3	60,9
5	ST11	863	531,1	62,5	61,5
6	ST12	781	475,1	64,4	60,8
7	ST13	798,1	499,7	59,7	62,6
8	ST14	742,3	452	64,2	60,9
9					

Quant au pourcentage massique de solides (C_w) des résidus, qui est intrinsèquement lié à la teneur en eau massique, il varie entre 60,7 % et 62,6 % (Tableau 4.1), avec une valeur moyenne de 61,2%. Mis à part les échantillons ST8, ST11 et ST13, la concentration massique en solides semble la même à toutes les stations d'échantillonnage qui est autour de 61%. Ces valeurs sont éloignées de la valeur cible de 64% recherchée par la mine MCM. **Il ne semble donc pas y avoir eu de ségrégation granulométrique des résidus MCM.**

4.1.2 Distributions granulométriques

La Figure A.5.1 (en Annexe) présente les courbes de distribution granulométrique de tous les échantillons de résidus miniers en écoulement de MCM, collectés le 1^{er} jour (ST1 à ST8) (Figure 4.1A, en Annexe), et des échantillons collectés le 2^e jour (ST9 à ST14) (Figure 4.1B, en Annexe). Les courbes granulométriques des résidus miniers analysés présentent une distribution continue et monomodale, caractéristique des matériaux issus des procédés de broyage et de flottation. Ces courbes se superposent presque entièrement, témoignant d'une homogénéité granulométrique très élevée entre les différents échantillons de résidus prélevés. Elles révèlent une répartition continue des tailles de particules, sans vide ni zones de tailles manquantes entre les fines (< 75 µm) et les grosses particules (> 75 µm). Elles affichent également des pentes plutôt douces et régulières, ce

qui indique une proportion équilibrée de fines particules, de particules de taille moyenne et de grosses particules. Le Tableau 4.2 présente les valeurs des paramètres caractéristiques de la distribution granulométrique pour tous les échantillons. Le coefficient d'uniformité (C_U) est un indicateur de la gamme de tailles des particules dans l'échantillon. Il est calculé par la formule :

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad (4.1)$$

Où D_{60} est le diamètre au-dessous duquel 60% des particules sont plus petites, et D_{10} est le diamètre au-dessous duquel 10 % des particules sont plus petites. Un C_U élevé indique une grande variété de tailles de particules, tandis qu'un C_U faible indique une gamme de tailles plus étroite.

Le coefficient de courbure (C_C) est un autre indicateur de la forme de la courbe granulométrique. Il est calculé comme suit :

$$C_C = (D_{30})^2 / [D_{10} \times D_{60}] \quad (4.2)$$

Où D_{30} est le diamètre en dessous duquel 30% des particules sont plus petites. Un C_C proche de 1 indique une distribution bien graduée, tandis qu'un C_C plus élevé ou plus bas peut suggérer une distribution moins idéale.

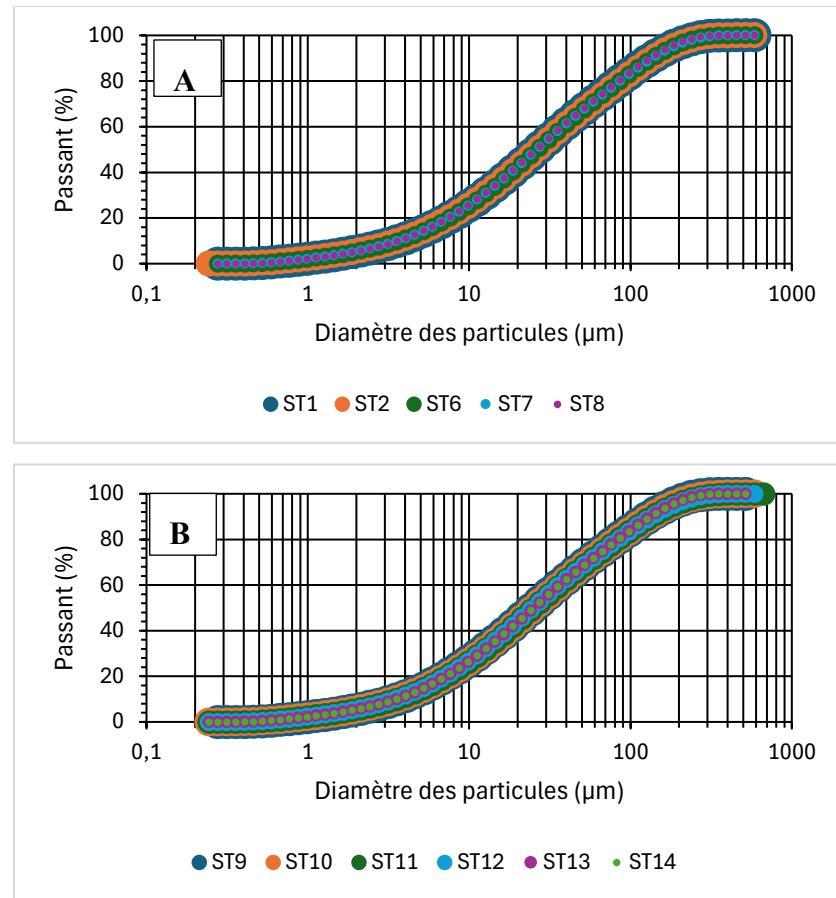


Figure 4.1 Juxtaposition des courbes de distribution granulométrique des différents échantillons de résidus miniers MCM : **A**) échantillons du 1^{er} jour de la campagne d'échantillonnage (écoulement le long de la digue); **B**) échantillons du 2^e jour de la campagne d'échantillonnage (écoulement dans la direction normale à celle du 1^{er} jour).

Les variations entre les échantillons sont relativement faibles, ce qui indique une certaine uniformité dans les propriétés des échantillons.

- **D₉₀** (diamètre en dessous duquel 90% des particules sont plus petites) varie entre **131 µm** et **137 µm** dans l'ensemble des échantillons. Cela suggère que la taille des particules les plus grandes reste relativement constante entre les différents points d'échantillonnage.
- **D₅₀** (la médiane des tailles de particules, diamètre en dessous duquel 50% des particules sont plus petites) varie entre **24,8 µm** et **26,7 µm**, ce qui montre une certaine stabilité dans la taille moyenne des particules. Les variations restent minimes, ce qui indique que les

échantillons ont des caractéristiques granulométriques similaires. La taille médiane des particules reste assez proche d'une valeur moyenne de **25,5 μm** .

Tableau 4.2 Paramètres caractéristiques de la distribution granulométrique des échantillons de résidus miniers de la MCM.

Éch.	D ₉₀ (μm)	D ₈₀ (μm)	D ₇₀ (μm)	D ₆₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₄₀ (μm)	D ₃₀ (μm)	D ₂₀ (μm)	D ₁₀ (μm)	C _u	C _c
ST1	135,00	85,80	56,50	38,10	26,40	18,30	12,30	7,52	3,65	10,44	1,09
ST2	137,00	87,10	57,40	38,60	26,60	18,40	12,30	7,50	3,61	10,69	1,09
ST3	134,00	84,90	56,10	37,90	26,30	18,30	12,30	7,50	3,63	10,44	1,10
ST4	134,00	86,00	56,80	38,30	26,50	18,30	12,20	7,44	3,58	10,70	1,09
ST5	135,00	85,00	55,70	37,50	25,90	18,00	12,00	7,36	3,57	10,50	1,08
ST6	137,00	86,90	57,20	38,60	26,70	18,50	12,40	7,57	3,67	10,52	1,09
ST7	137,00	86,40	56,70	38,10	26,30	18,20	12,20	7,47	3,64	10,47	1,07
ST8	133,00	84,50	55,70	37,50	26,00	18,00	12,10	7,40	3,62	10,36	1,08
ST9	131,00	82,60	53,70	35,90	24,80	17,10	11,50	7,13	3,56	10,08	1,03
ST10	134,00	84,00	54,70	36,60	25,20	17,50	11,80	7,27	3,57	10,25	1,07
ST11	135,00	84,00	54,50	36,40	25,10	17,40	11,70	7,21	3,55	10,25	1,06
ST12	135,00	83,70	54,10	36,00	24,80	17,10	11,50	7,10	3,49	10,32	1,05
ST13	132,00	83,70	54,50	36,40	25,10	17,40	11,70	7,20	3,54	10,28	1,06
ST14	134,00	84,10	54,50	36,30	25,00	17,30	11,60	7,15	3,52	10,31	1,05

- **D₁₀** (diamètre en dessous duquel 10% des particules sont plus petites) varie entre **3,49 μm** et **3,67 μm** , ce qui montre que les diamètres effectifs sont également assez constants entre les différents échantillons.
- Les autres percentiles (D₈₀, D₇₀, D₆₀, D₄₀, etc.) montrent également des variations faibles, indiquant que la distribution granulométrique des échantillons est homogène.

Il ne semble donc pas y avoir eu de ségrégation granulométrique des résidus MCM sur la distance d'écoulement étudiée.

Le C_U de nos échantillons varie entre 10,08 et 10,7. Ce qui indique une large gamme de tailles, suggérant une distribution granulométrique semi-étalée ($5 < C_U \leq 20$). On peut alors conclure que les échantillons de résidus miniers MCM ont une gamme assez variée de tailles de particules, avec une proportion notable de particules fines et grossières ($P_{20\mu\text{m}} \approx 42\%$ et $P_{80\mu\text{m}} \approx 78\%$). Le C_c de nos échantillons varie entre 1,03 et 1,1, ce qui indique que la distribution granulométrique est assez bien graduée, sans variations importantes.

En résumé, les échantillons de résidus miniers MCM testés présentent une granulométrie bien étalée, avec une large gamme de tailles de particules, ce qui peut être utile pour diverses applications où la gradation joue un rôle clé, comme dans les remblais ou le béton. L'uniformité de la distribution des particules est également favorable, ce qui en fait un matériau potentiellement adapté pour des applications nécessitant compacité et stabilité. Toutefois, les analyses granulométriques de ces échantillons n'ont pas permis de mettre en évidence de manière claire le phénomène de ségrégation granulométrique. En effet, les courbes granulométriques des différents échantillons sont superposées presque parfaitement (Figure 4.1), ce qui confirme une fois de plus leur similarité. **Il ne semble donc pas y avoir eu de ségrégation granulométrique des résidus MCM sur la distance d'échantillonnage atteinte dans cette étude.**

4.1.3 Évolution des paramètres granulométriques en fonction de la distance d'échantillonnage

Les résultats montrent que les diamètres caractéristiques D_{80} , D_{50} et D_{20} demeurent pratiquement constants en fonction de la distance au point de déversement (Figure 4.2). Cela indique que les caractéristiques granulométriques des résidus restent globalement similaires, quelle que soit la distance considérée. Cette observation est d'ailleurs confirmée par la superposition des différentes courbes granulométriques (Figure 4.1). En revanche, une diminution du coefficient d'uniformité (C_u) est observée avec l'éloignement du point de déversement (Figure 4.2). Autrement dit, plus la distance au point de déversement augmente, plus le C_u diminue. Cela signifie qu'à proximité du point de déversement, la distribution des tailles de particules est plus étendue, tandis qu'en aval, la granulométrie devient plus resserrée.

Cette constatation pourrait renforcer l'hypothèse d'une ségrégation hydraulique des résidus MCM lors de leur transport et de leur dépôt.

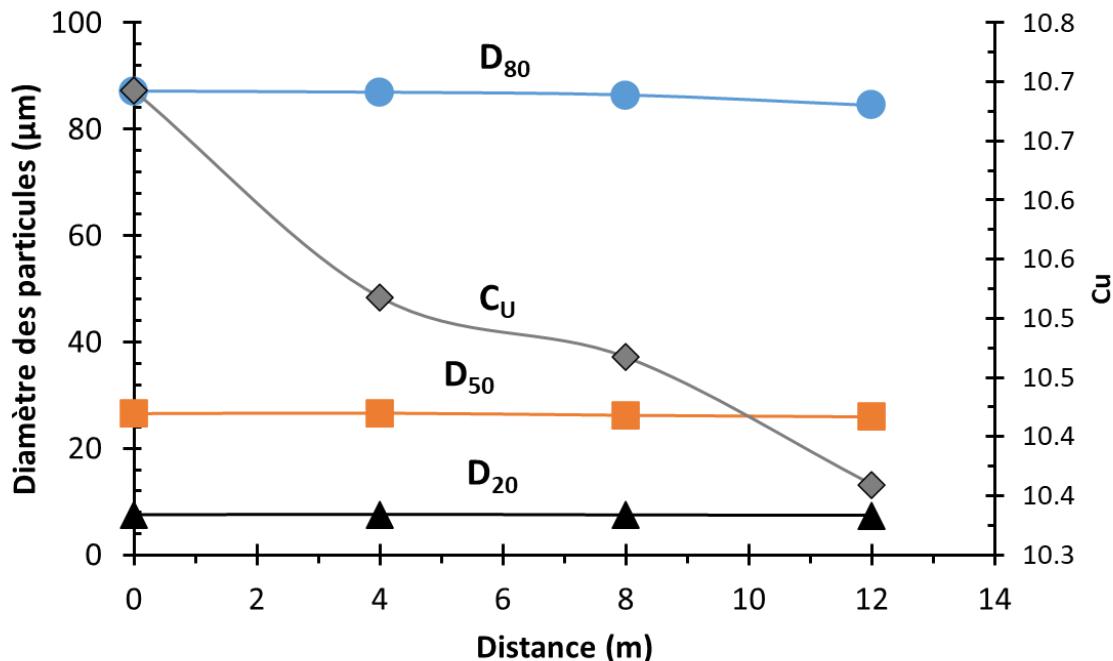


Figure 4.2 Évolution des paramètres granulométriques en fonction de la distance d'échantillonnage

4.1.4 Densité relative des grains solides

Les résultats de la densité relative des échantillons de résidus miniers MCM sont présentés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Densité relative des grains solides des résidus miniers en écoulement de MCM.

Échantillon	$G_{s-\text{moy}}$
ST1	2,79
ST2	2,76
ST3	2,78
ST4	2,78
ST5	2,77
ST6	2,78
ST7	2,66
ST8	2,68
ST9	2,73
ST10	2,68
ST11	2,69
ST12	2,69
ST13	2,70
ST14	2,68

Les résultats montrent que la densité relative des grains solides (G_s) des échantillons de résidus miniers MCM varie entre 2,66 et 2,79, avec une moyenne de 2,73. Cette gamme de densités est typiquement caractéristique des mines en roche dure. Une densité relative de 2,73 place les grains solides des résidus miniers MCM dans une gamme intermédiaire par rapport aux minéraux courants que l'on trouve dans les matériaux géologiques, tels que le quartz (qui a une densité relative d'environ 2,65) ou la pyrite (environ 5,0). Ces valeurs suggèrent que les résidus MCM sont constitués de matériaux mixtes, comprenant à la fois des minéraux légers et des minéraux plus lourds, avec une proportion significative de quartz.

Les variations dans les résultats de densité relative peuvent également refléter la diversité des minéraux présents dans les résidus. Des analyses complémentaires, telles que la diffraction des rayons X ou la spectroscopie, permettent d'identifier les minéraux dominants et d'expliquer les différences observées.

4.1.5 Analyses minéralogiques

La Diffraction des Rayons X (DRX) est appliquée pour identifier les minéraux présents dans les échantillons. Sur les 14 échantillons, 7 ont été soumis à des analyses DRX, dont six proviennent du premier jour d'échantillonnage et un du deuxième jour.

Les principales phases minérales identifiées dans les échantillons de résidus miniers MCM sont le **Quartz** (SiO_2), l'**Albite** calcian ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), la **Biotite** ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), la **Chlorite** (groupe des phyllosilicates), la **Microcline** (KAlSi_3O_8), la **Muscovite** ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), et l'**Anorthite** ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Le Tableau 4.4 présente les pourcentages des minéraux dans les différents échantillons.

Tableau 4.4 Pourcentages des différents minéraux composant les échantillons.

Éch.	Quartz (%)	Albite (%)	Biotite (%)	Chlorite (%)	Microcline (%)	Muscovite (%)	Anorthite (%)	Ortho. (%)
ST1	13,77	25,02	17,21	2,33	10,16	2,97	22,23	6,30
ST2	17,58	46,54	8,17	3,50	0,60	6,34	17,27	6,34
ST4	23,62	47,92	11,52	3,82	0,00	7,53	5,59	-
ST6	19,64	41,49	8,71	3,82	16,04	2,70	7,60	-
ST7	18,8	6,22	4,02	3,84	24,43	3,47	39,24	-
ST8	18,70	24,44	10,80	4,71	0,00	4,39	36,96	-
ST13	39,41	2,23	2,23	3,35	0,00	19,63	35,37	-

Les échantillons de résidus miniers MCM étudiés présentent une combinaison de minéraux magmatiques (quartz, anorthite, albite) et de minéraux métamorphiques (muscovite, biotite, chlorite). Il est possible que ces échantillons soient d'origine magmatique (comme un granite ou un gabbro) ayant subi une certaine altération ou transformation métamorphique modérée ou légère.

L'analyse de ces échantillons montre une grande diversité dans les compositions minéralogiques, bien qu'ils proviennent tous du même site. Cela suggère qu'en fonction du lieu d'échantillonnage et de la distance par rapport au point de déversement des résidus, la proportion des minéraux varie. Bien que l'analyse minéralogique ne permette pas de dégager une évolution claire des phases minérales en fonction du lieu de dépôt, elle confirme la différence dans les proportions de composition minéralogique selon l'emplacement dans le parc à résidus.

Par exemple, pour les trois premiers points échantillonnés, on observe que le pourcentage de quartz augmente avec la distance du point de déversement (Figure 4.3). Ce pourcentage passe de 14% dans l'échantillon récolté au bout du tuyau (ST1) à 20% dans l'échantillon ST6 (3^e point échantillonné).

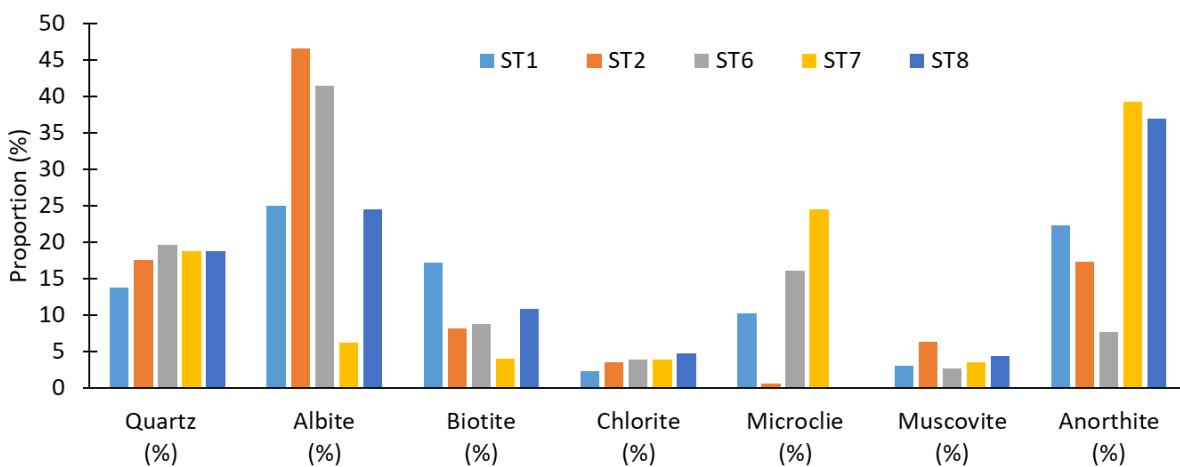


Figure 4.3 Évolution des phases minérales dominantes dans les échantillons de résidus miniers de la MCM (échantillons récoltés lors du premier jour de la campagne).

4.1.6 Paramètres physico-chimiques de l'eau surnageante

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau surnageante des résidus miniers MCM, réalisées en mai 2024, sont présentés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Analyse physico-chimique de l'eau surnageante des résidus de la MCM.

Échantillon	T (°C)	pH	EC (mS/cm)	Eh (mV)
ST1	15,80	7,66	4,71	326
ST2	15,70	7,63	4,84	340
ST3	15,70	7,35	4,86	322
ST4	15,40	7,30	4,87	289
ST5	15,40	7,26	4,54	300
ST6	15,40	7,62	4,79	349
ST7	15,40	7,00	4,52	378
ST8	15,40	7,32	4,51	389
ST9	15,80	7,60	4,76	277
ST10	16,10	7,53	4,72	321
ST11	16,20	7,47	4,78	314
ST12	15,90	7,44	4,80	272
ST13	16,10	7,83	4,81	303
ST14	15,60	7,51	4,54	275

- Température (°C) : Les températures varient de **14,6°C** à **16,2°C**. La plupart des températures sont proches de **15°C**, avec une moyenne de 14,9°C, ce qui peut être considéré comme une température ambiante stable pour les mesures. Cette variation limitée de température ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) (Figure 4.4) indique des conditions relativement constantes, ce qui est important car la température peut affecter la conductivité et le pH.

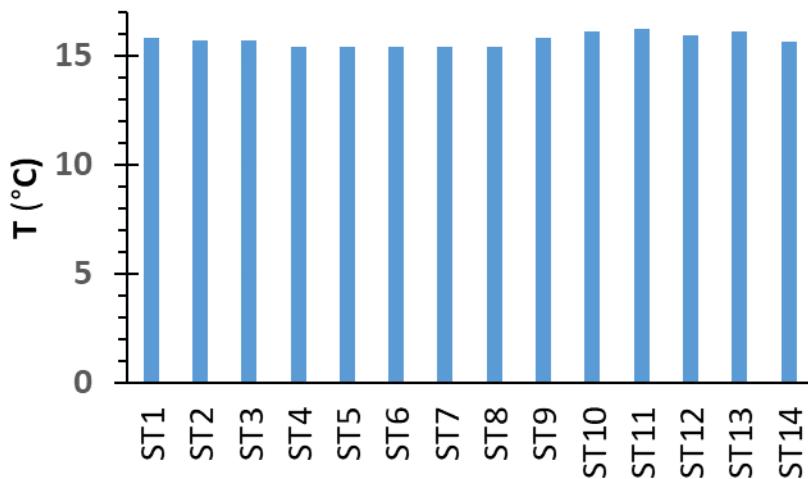


Figure 4.4 Comparaison des valeurs de température mesurées dans les échantillons de résidus miniers MCM.

- pH (Acidité/Alcalinité) : Les valeurs de pH varient de **7 à 7,8**, avec une moyenne autour de **7,5**, ce qui est relativement neutre (le pH 7 étant neutre). Aucune variation extrême n'est observée dans les valeurs de pH. La stabilité de ces valeurs dans cette plage suggère (Figure 4.5) des conditions relativement constantes en termes d'acidité ou d'alcalinité de l'échantillon. Aucun des pH mesurés n'indique une eau excessivement acide ou basique, ce qui suggère un environnement stable sur le plan de l'acidité ou de l'alcalinité.

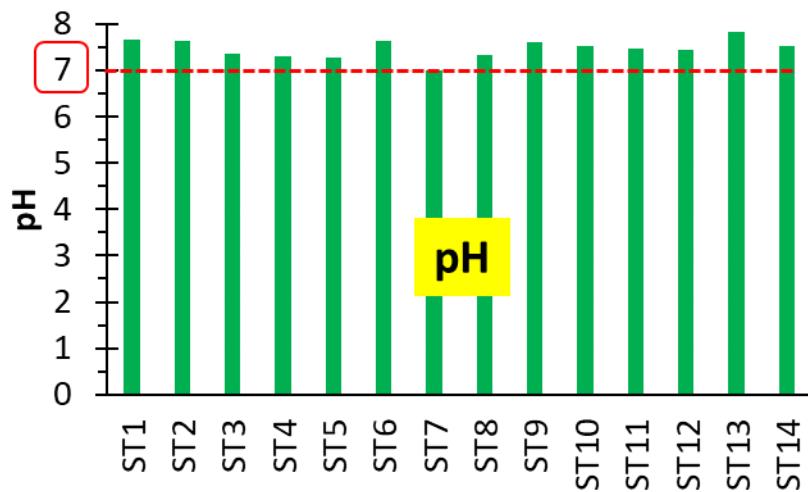


Figure 4.5 Comparaison des valeurs de pH mesurées dans les échantillons de résidus miniers MCM.

- Conductivité électrique (CE, mS/cm) : Les valeurs de conductivité varient entre 4,51 mS/cm et 4,87 mS/cm. La conductivité électrique est liée à la concentration en ions dissous dans l'eau. Une conductivité plus élevée indique généralement une plus grande concentration d'ions dissous. Les valeurs mesurées ici sont relativement élevées, suggérant une solution qui contient une quantité modérée d'ions dissous (Figure 4.6). Il n'y a pas de variations drastiques de la conductivité, et les valeurs restent assez constantes, ce qui pourrait refléter une uniformité des conditions ou des caractéristiques de l'eau mesurée.

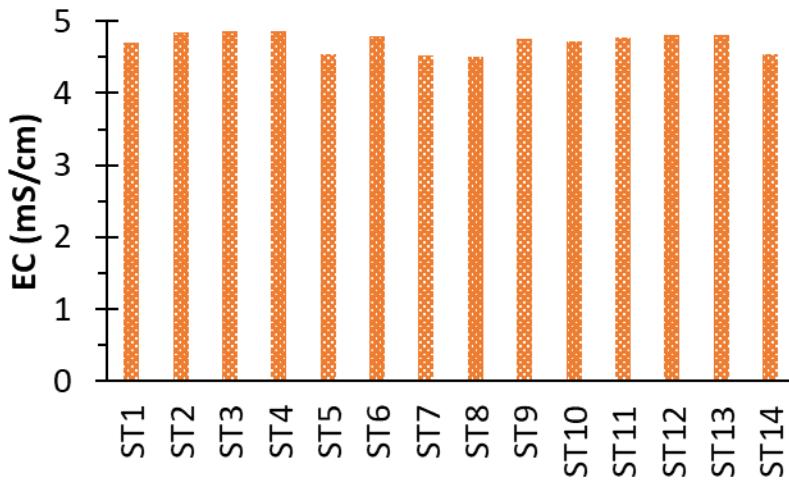


Figure 4.6 Comparaison des valeurs de conductivité électrique mesurées dans les échantillons de résidus miniers de la MCM.

- Potentiel Redox (Eh, mV) : Le potentiel redox varie de **272 mV** à **389 mV**. Le Eh mesure l'état d'oxydation-réduction de l'échantillon. Un Eh plus élevé est associé à des conditions oxydantes, tandis qu'un Eh plus faible suggère des conditions réductrices. Les mesures ici montrent une variation notable (Figure 4.7), ce qui indique une diversité des conditions chimiques ou de la disponibilité d'oxygène dans l'eau mesurée.

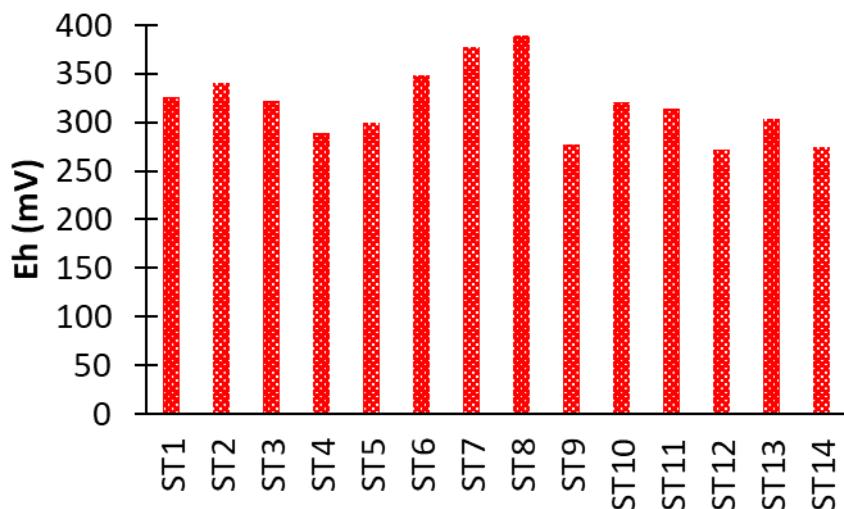


Figure 4.7 Comparaison des valeurs de potentiel redox mesurées dans les échantillons de résidus miniers de la MCM.

4.1.7 Essais rhéologiques

4.1.7.1 Procédure expérimentale appliquée

Les essais rhéologiques réalisés permettent de mesurer et d'évaluer le comportement des échantillons de résidus miniers MCM sous diverses conditions de déformation. Ces essais sont effectués directement sur la pulpe de résidus après homogénéisation. Plusieurs essais ont été réalisés en ajustant les paramètres de mesure (vitesse et nombre de points de mesure) jusqu'à ce que des résultats cohérents soient obtenus (voir Annexe C). Des résultats satisfaisants ont été obtenus en variant le taux de cisaillement (vitesse de déformation) entre 0 et 500 1/s, avec sept points de mesure. La géométrie utilisée pour les essais est le moulinet en acier inoxydable (*vane*), d'un diamètre de 14 mm et d'une hauteur de 2 cm, équipé de 4 lames orthogonales. Le Tableau A. 5.1(en annexe) présente les données enregistrées pour chaque échantillon lors de ces tests.

On peut constater que la température est maintenue constante (21°C) pendant toute la période d'essai afin d'éviter toute influence notable de celle-ci sur les résultats. Il en va de même pour la contrainte normale, qui présente de très faibles variations. Cela indique que la déformation de la pulpe de résidus est principalement dominée par la contrainte de cisaillement, tandis que la contribution de la contrainte normale est négligeable.

4.1.7.2 Variation des propriétés rhéologiques en fonction de la position des points d'échantillonnage dans le parc à résidus

L'analyse des rhéogrammes ou courbes d'écoulement (contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement) obtenus permet d'étudier les propriétés rhéologiques des échantillons. Cette analyse sera uniquement basée sur les courbes rhéologiques descendantes. La différence entre les courbes ascendantes et descendantes est très minime ; on peut ainsi conclure que le phénomène d'hystérésis est négligeable dans ces échantillons (voir Annexe C).

Les rhéogrammes obtenus montrent que tous les échantillons présentent un comportement non-newtonien, ce qui signifie que leur viscosité varie en fonction du taux de déformation. De plus, on observe que la viscosité des échantillons diminue à mesure que le taux de cisaillement augmente, ce qui suggère que les résidus deviennent plus fluides à des taux de déformation élevés. Ainsi, on peut conclure que les échantillons de résidus en pulpe de MCM se comportent comme des fluides de type pseudoplastique (ou fluides *shear-thinning* ou rhéofluidifiants). Les courbes d'écoulement des échantillons sont quasi linéaires, avec des pentes qui diminuent à mesure que le taux de cisaillement augmente (Figure 4.8). Elles présentent toutes un seuil de cisaillement (*yield stress*) non nul.

Le modèle d'ajustement le plus adapté (*best fit*), selon le logiciel utilisé, est celui de Herschel-Bulkley (voir Annexe C). C'est le modèle qui décrit le mieux le comportement des échantillons. Les indices d'écoulement (*n*) obtenus sont très proches de l'unité, étant légèrement inférieurs ou égaux à 1. Lorsque *n* = 1 dans le modèle de Herschel-Bulkley, on retrouve le modèle de Bingham. On peut donc conclure que les échantillons de résidus en pulpe de MCM testés ont un comportement rhéologique situé entre celui de Herschel-Bulkley et celui de Bingham.

Les principales propriétés rhéologiques obtenues sont présentées dans le Tableau 4.6. Les seuils de cisaillement (*yield stress*) varient entre 2,08 et 3,70 Pa, et les viscosités plastiques se situent entre $1,14 \times 10^{-2}$ et $2,77 \times 10^{-2}$ Pa.s. La Figure 4.8 permet de mieux visualiser la variation des propriétés, en particulier celle du seuil d'écoulement, selon le lieu de collecte des échantillons de résidus. Cela montre que les propriétés rhéologiques des échantillons diffèrent en fonction de la position du point d'échantillonnage par rapport au lieu de déversement.

Tableau 4.6 Propriétés rhéologiques déterminées

Échantillon	Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa.s)	n
ST1	3,40	1,14E-02	1,05
ST2	2,97	2,73E-02	0,92
ST3	2,54	2,26E-02	0,95
ST4	2,62	1,68E-02	0,99
ST5	2,57	0,02558	0,93
ST6	2,15	0,01224	1,01
ST7	3,31	0,01767	0,97
ST8	3,70	0,02586	0,94
ST9	3,28	0,01283	1,02
ST10	2,45	1,29E-02	1,02
ST11	3,20	1,58E-02	1,01
ST12	2,81	1,46E-02	1,01
ST13	2,08	2,77E-02	0,88
ST14	3,28	1,97E-02	0,96

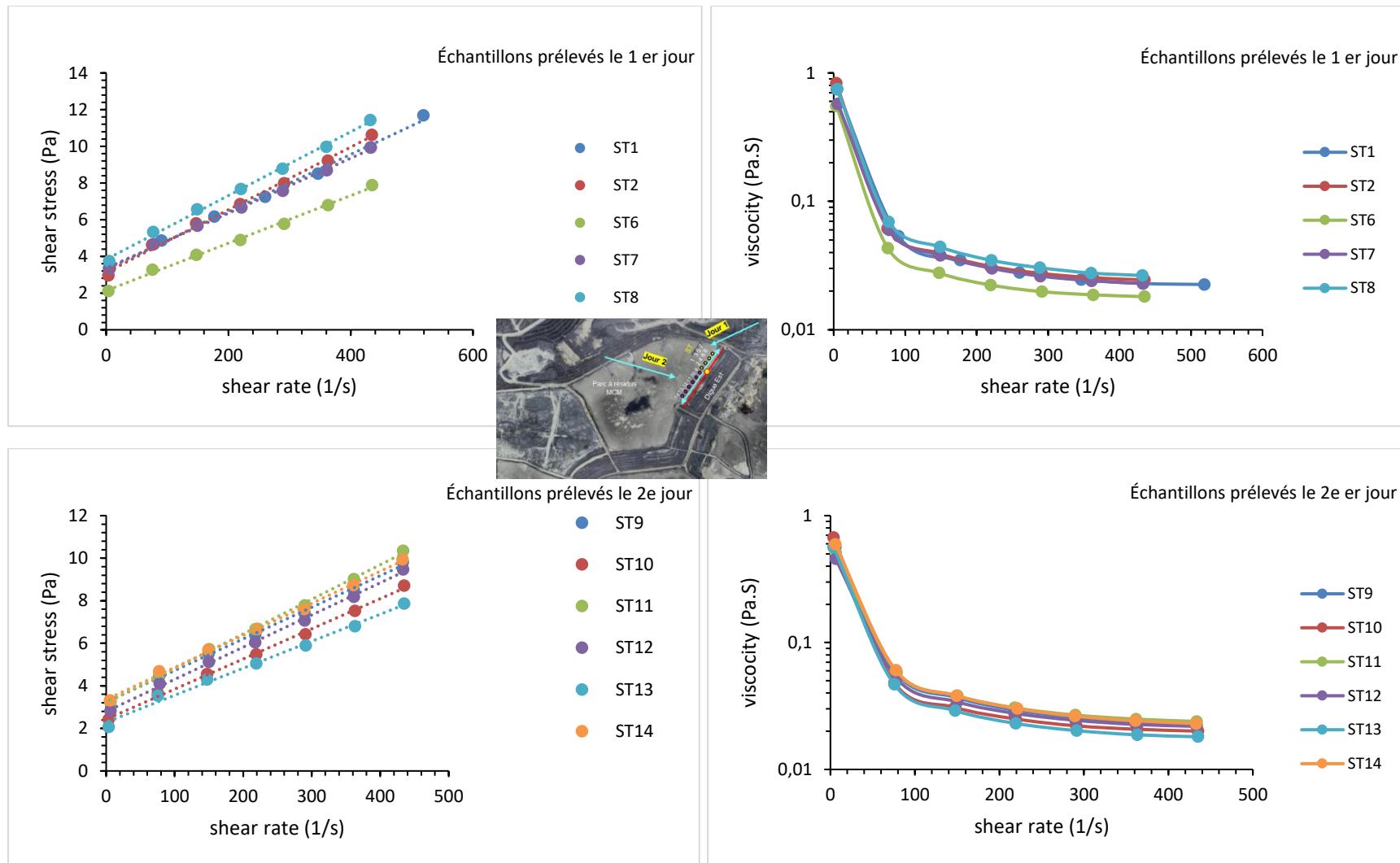


Figure 4.8 Rhéogrammes (colonne de gauche) et courbes de viscosité (colonne de droite) illustrant la variation des propriétés rhéologiques des résidus en fonction du point d'échantillonnage.

Bien que le seuil de cisaillement présente des variations selon les points d'échantillonnage, aucune tendance générale claire ne se dégage lorsque l'ensemble des données est considéré (Figure 4.9).

Toutefois, en se focalisant sur les échantillons prélevés lors de la première journée (ST1 à ST8), avec un espacement horizontal d'environ 4 mètres, une tendance se manifeste pour les deux premiers points (ST2 et ST6) : une diminution progressive du seuil de cisaillement et de la viscosité dynamique est observée à mesure que l'on s'éloigne du point de déversement (Figure 4.10).

Cependant, cette tendance n'est valable que pour les deux premières stations échantillonnées. Les points suivants présentent un comportement opposé, ce qui pourrait s'expliquer par un changement dans la direction d'écoulement des résidus miniers MCM.

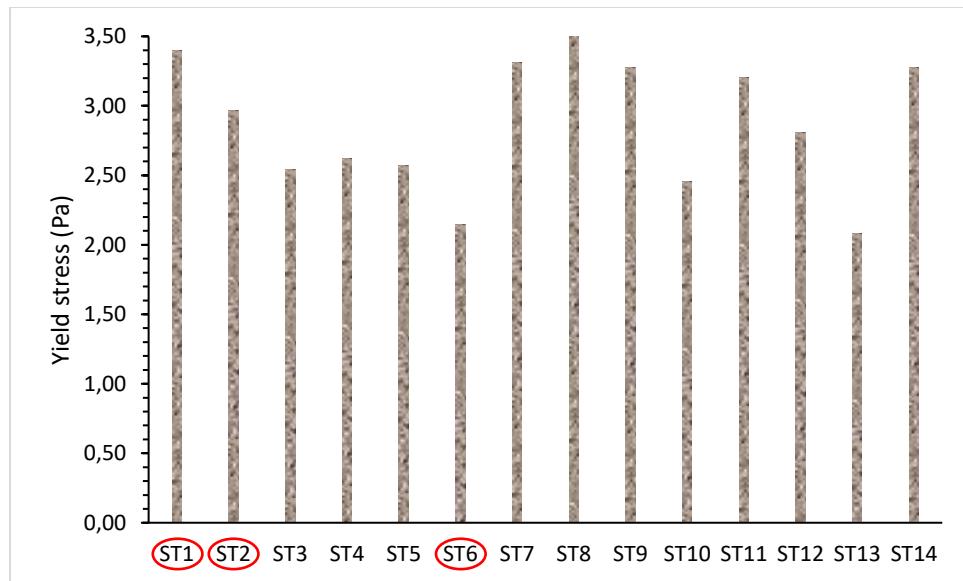


Figure 4.9 variation du seuil de cisaillement en fonction de la position des points d'échantillonnage.

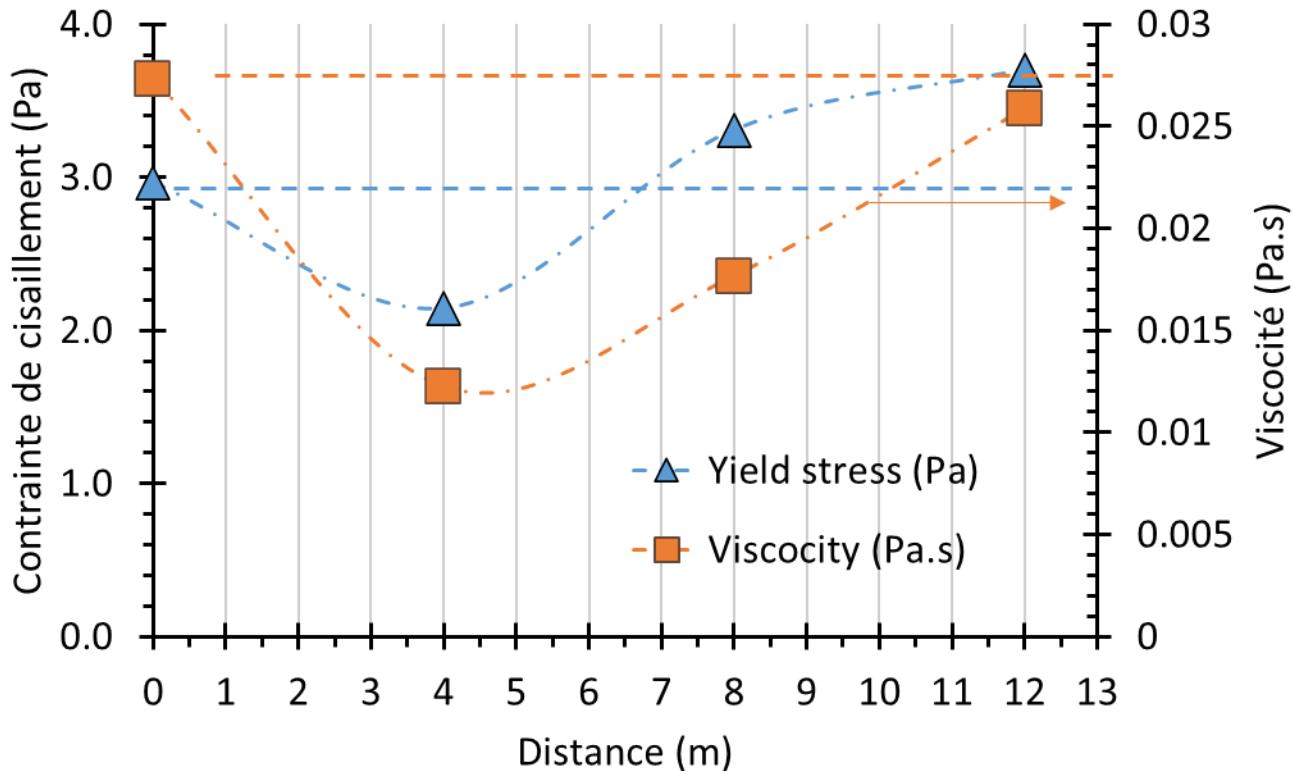


Figure 4.10 Évolution des paramètres rhéologiques en fonction de la distance d'échantillonnage.

4.2 Essais d'écoulement en canal avec les résidus de la mine Goldex

Trois essais sont réalisés avec des concentrations massiques en solides C_w ciblées de 68%, 65% et 62% pour chacune des pentes considérées (0,5% et 1%). Dans ce mémoire, seuls les résultats obtenus avec C_w de 62% pour une pente de 0,5% sont présentés. La raison principale est que c'est cette valeur de C_w qui est proche de celle obtenue dans les analyses avec les résidus de MCM et que la valeur de la pente du parc à résidus de MCM est de 0,5% (Pascal et al., 2021).

4.2.1 Analyse de l'évolution spatiale de la vitesse lors de l'essai d'écoulement en canal

La Figure 4.11 présente l'évolution de la vitesse d'écoulement mesurée le long du canal au cours de l'essai. On observe que la vitesse demeure constante à environ 0,05 m/s sur toute la longueur du *flume*, indiquant un régime d'écoulement quasi stable.

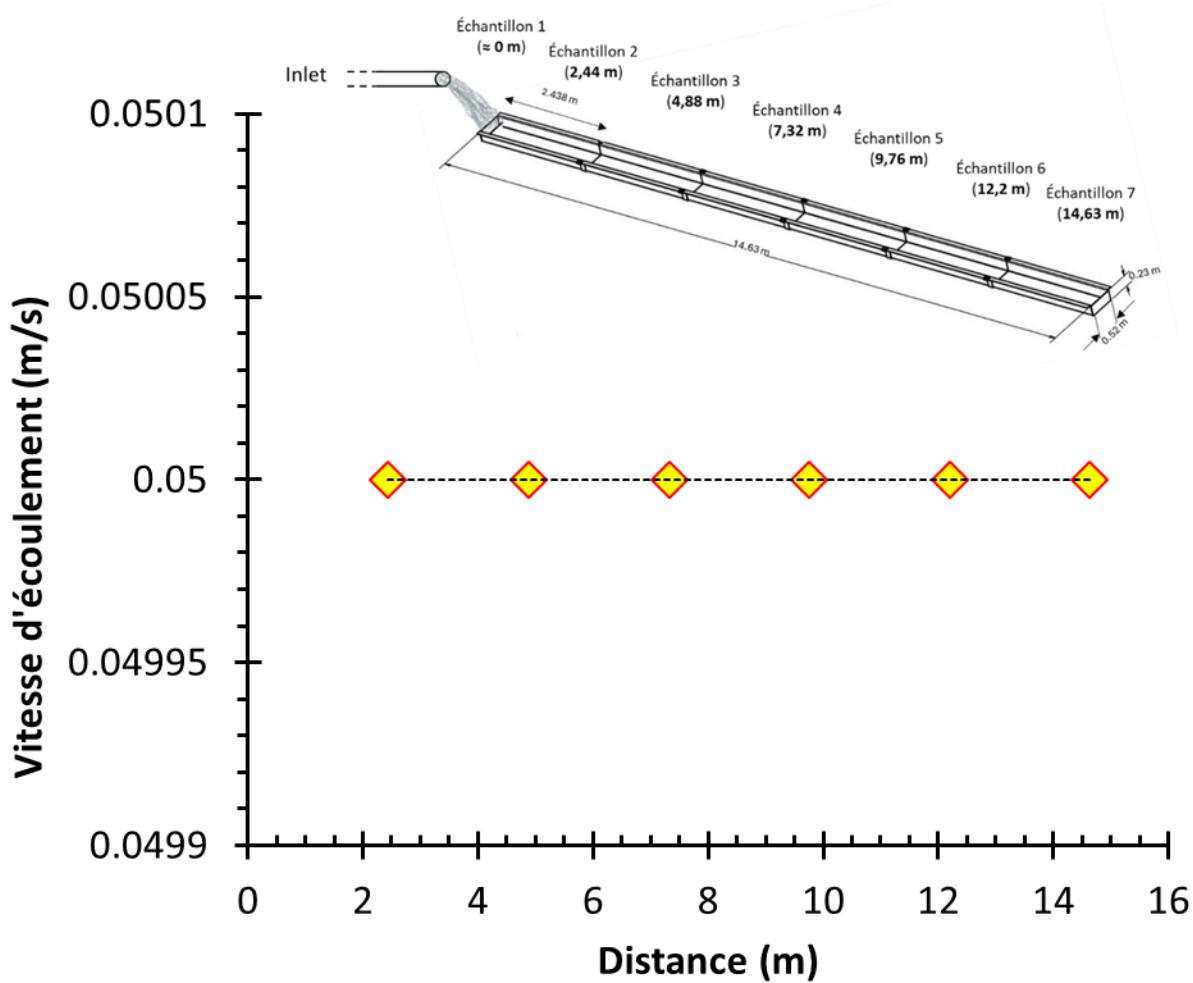


Figure 4.11 Profil des vitesses d'écoulement le long du canal lors de l'essai d'écoulement.

4.2.2 Évolution de la granulométrie en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal

L'analyse des courbes granulométriques cumulées (Figure 4.12) issues des sept échantillons prélevés le long du canal met en évidence l'existence d'une ségrégation granulométrique au sein de l'écoulement. Bien que les distributions présentent globalement une forme relativement similaire, des décalages entre certaines courbes indiquent une variation non négligeable de la répartition des tailles de particules selon la position d'échantillonnage. En particulier, les courbes correspondant aux échantillons 4 et 7 sont légèrement décalées vers la gauche, traduisant une plus grande proportion de particules fines à ces emplacements. À l'inverse, les échantillons situés plus en amont (notamment les échantillons 1 et 2) montrent une répartition légèrement enrichie en

particules grossières (Figure 4.12). Cette tendance révèle une ségrégation longitudinale induite par l'écoulement, où les particules plus fines, en suspension prolongée, tendent à se déplacer plus loin dans le canal, tandis que les particules plus grossières se déposent préférentiellement en amont.

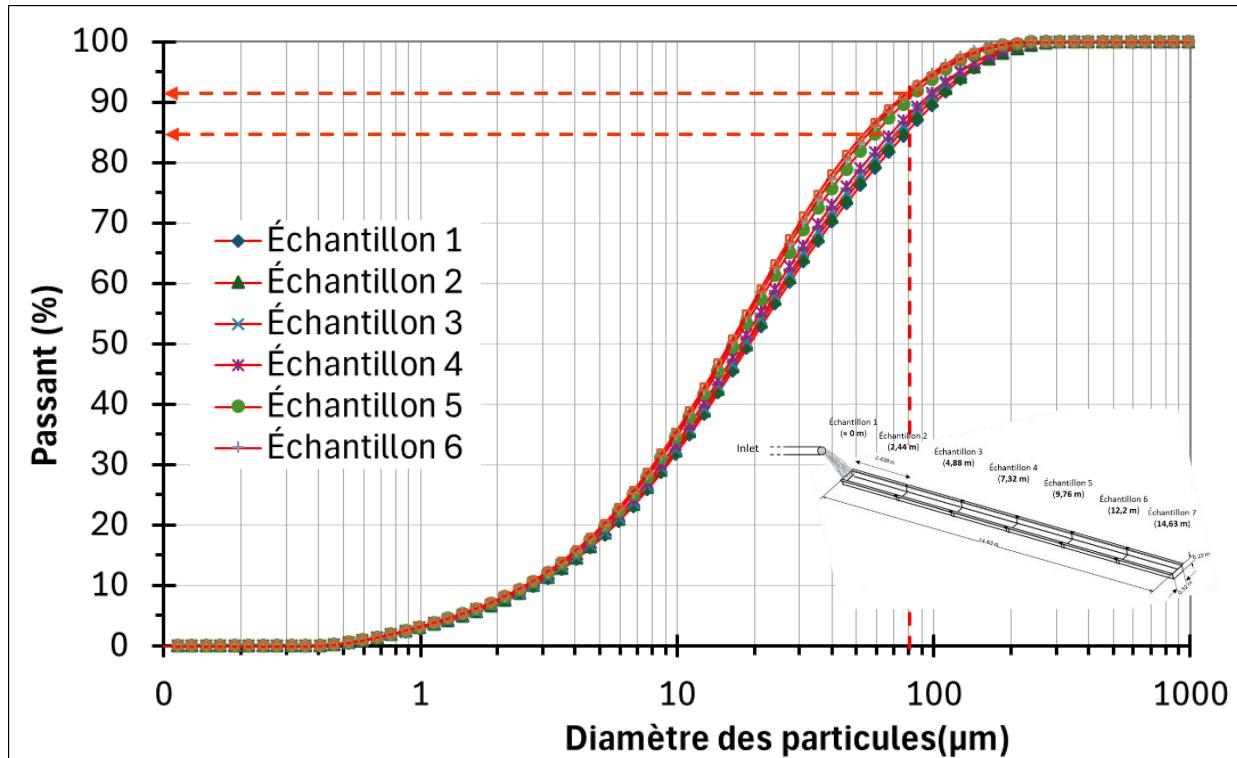


Figure 4.12 Courbes granulométriques cumulées des échantillons en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal.

L'évolution des paramètres granulométriques le long du canal (Figure 4.13) confirme l'existence de cette ségrégation granulométrique induite par l'écoulement. Les diamètres caractéristiques D_{10} , D_{20} et D_{50} restent relativement stables d'un point d'échantillonnage à l'autre, traduisant une homogénéité de la fraction fine des résidus transportés. En revanche, une tendance claire à la diminution du D_{80} est observée avec la distance, indiquant que les particules les plus grossières tendent à se déposer préférentiellement en amont. Cette sélectivité du transport est typique d'une ségrégation granulométrique, où la décantation différentielle selon la taille des particules conduit à un appauvrissement progressif en gros grains à mesure que l'on s'éloigne du point de déversement. Par ailleurs, la diminution progressive du coefficient d'uniformité (C_U), associée à une baisse du D_{60} alors que le D_{10} reste relativement constant, corrobore ce phénomène, suggérant que le mélange devient de plus en plus uniforme vers l'aval, en raison de la perte de la fraction grossière. Ces résultats appuient les observations faites sur les courbes granulométriques cumulées

et mettent en évidence l'influence des conditions hydrodynamiques sur la répartition spatiale des sédiments dans le canal.

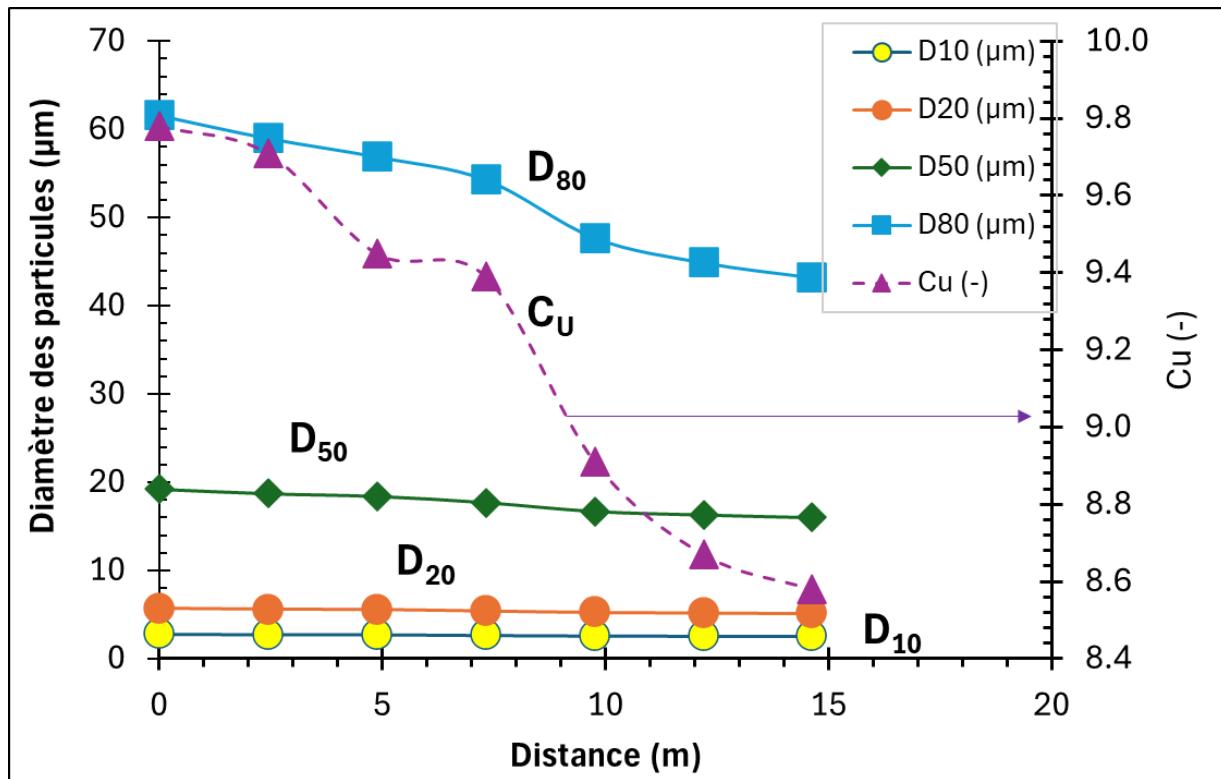


Figure 4.13 Variation des diamètres caractéristiques (D_{10} , D_{20} , D_{50} , D_{80}) et du coefficient d'uniformité (C_U) selon la distance d'échantillonnage.

4.2.3 Évolution de la concentration massique en solides et de la densité relative des grains solides le long du canal

L'analyse de la concentration massique en solide (C_w) le long du canal permet de mettre en évidence de façon claire les mécanismes de ségrégation granulométrique intervenant lors de l'écoulement (Figure 4.14). On observe une diminution progressive de C_w avec la distance, passant de 62% à environ 43% sur 14 mètres. Cette baisse témoigne d'une ségrégation des particules solides, les grains les plus lourds et/ou grossiers ayant tendance à se déposer préférentiellement en amont. Parallèlement, la densité relative G_s connaît une variation significative : après une légère hausse initiale (atteignant 2,91), elle chute rapidement à partir de 4 mètres pour atteindre un minimum d'environ 2,8 entre 8 et 10 mètres, avant de remonter légèrement vers l'aval. Cette évolution indique une décantation différentielle selon la densité propre des grains, où les particules

les plus denses (souvent associées à des minéraux plus lourds) se déposent en priorité dans les premières sections du canal. En aval, le mélange résiduel devient donc relativement enrichi en grains moins denses, ce qui explique la baisse observée de G_s . Ces résultats confirment que la ségrégation dans le canal n'est pas seulement granulométrique, mais également minéralogique, affectant la composition physique des matériaux transportés selon leur densité relative.

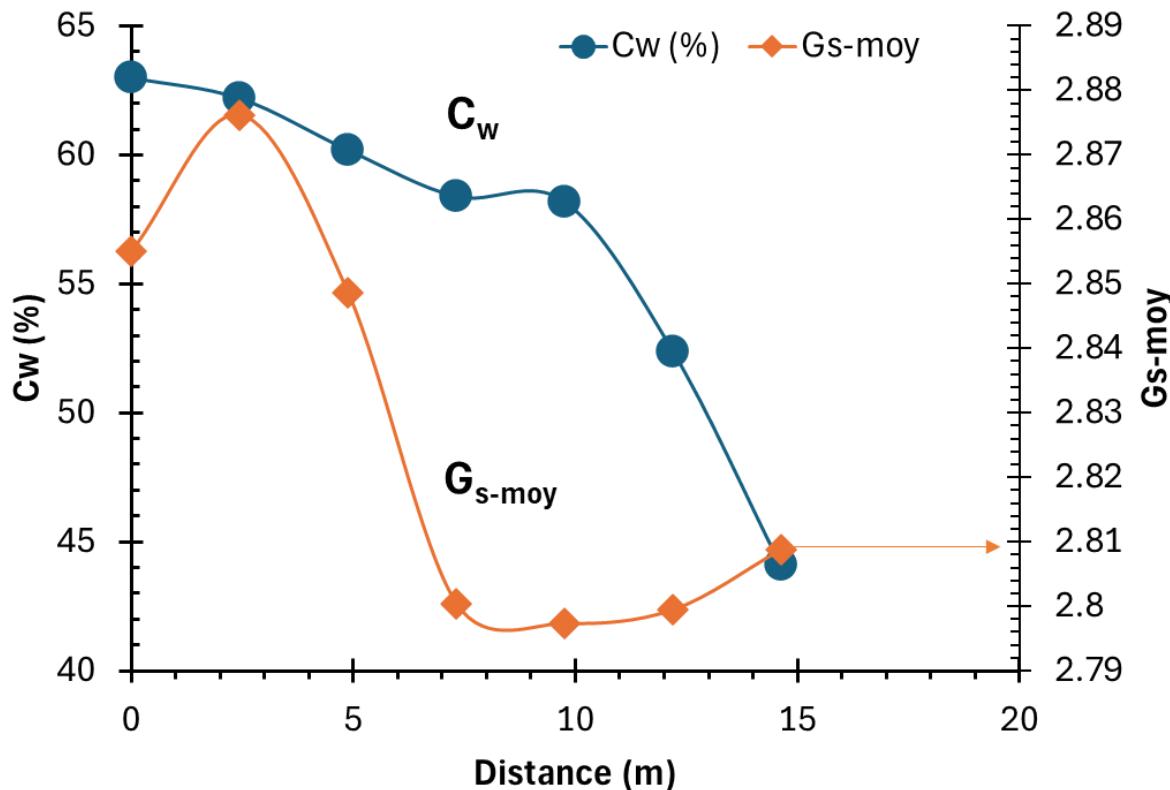


Figure 4.14 Évolution de la concentration massique en solides (C_w) et de la densité relative des grains solides (G_s) selon la distance dans le canal.

4.2.4 Évolution des propriétés rhéologiques en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal

L'étude des paramètres rhéologiques des résidus à $C_w = 62\%$, en particulier le seuil de cisaillement de Bingham (τ_{yB}) et la viscosité dynamique à taux de cisaillement infini (μ_∞ ou η_∞), permet de mieux comprendre l'évolution du comportement d'écoulement du fluide au fil de la distance dans le canal. Ces propriétés sont fortement influencées par la concentration en particules, la granulométrie et la densité relative des grains en suspension.

La Figure 4.15 montre une diminution progressive du seuil de cisaillement de 1,9 Pa à 0,4 Pa sur une distance de 14,63 m. Cette baisse reflète une perte de cohésion interparticulaire, probablement causée par la décantation des particules grossières et denses en amont. En effet, comme l'indiquent les variations de C_w et G_s (Figure 4.14), le mélange s'appauvrit progressivement en particules lourdes, entraînant une fluidification du comportement mécanique du fluide. En aval, la variabilité des mesures diminue, ce qui témoigne d'une structure plus homogène du mélange résiduel, dominé par des particules fines.

En parallèle, la Figure 4.16 présente une évolution similaire de la viscosité dynamique. Celle-ci passe de 0,041 Pa.s à environ 0,005 Pa.s sur la même distance. Ce comportement traduit une diminution de la résistance du fluide à l'écoulement, étroitement liée à la baisse de la concentration massique en solides (C_w) et à la ségrégation des solides. La viscosité étant sensible aux interactions hydrodynamiques et interparticulaires, cette chute renforce l'hypothèse d'un fluide de plus en plus dilué et moins structuré. En fin de parcours, le mélange présente des caractéristiques proches de celles d'un fluide pseudo-plastique à faible charge en solides.

Ces deux paramètres rhéologiques confirment donc le rôle central de la ségrégation hydraulique dans la transformation du comportement d'écoulement, depuis une pulpe fortement structurée en amont vers un fluide plus homogène, fluide et faiblement cohésif en aval.

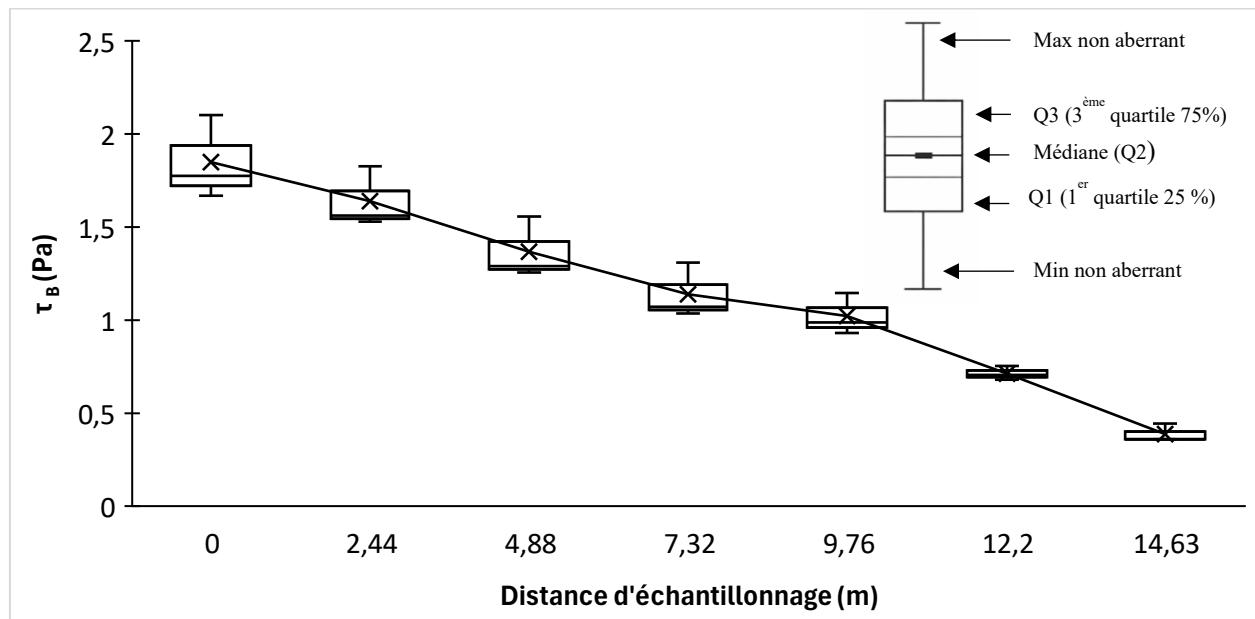


Figure 4.15 Évolution du seuil de cisaillement de Bingham (τ_B) en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal.

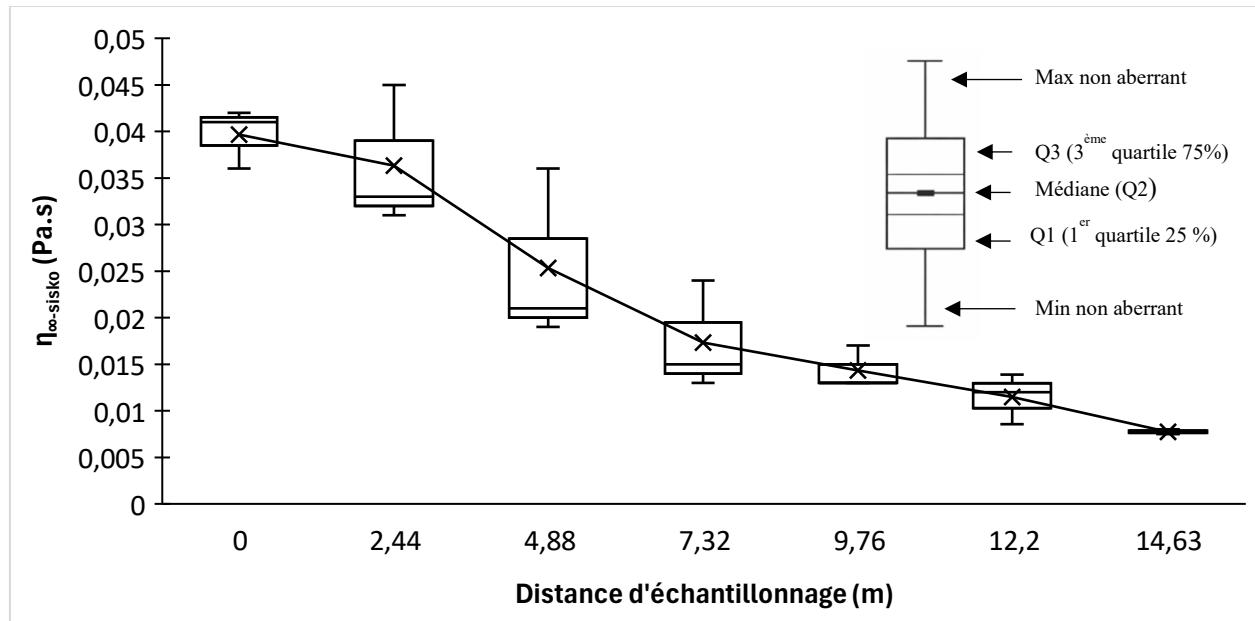


Figure 4.16 Évolution de la viscosité dynamique de Sisko à taux de cisaillement infini en fonction de la distance d'échantillonnage dans le canal.

4.2.5 Synthèse des phénomènes observés lors de l'essai d'écoulement en canal

Les résultats obtenus tout au long de l'essai d'écoulement en canal mettent en évidence un phénomène progressif de ségrégation granulométrique, affectant la composition et les propriétés du mélange solides-liquide dans le canal. À mesure que l'écoulement progresse, on observe une décantation des particules les plus grossières et les plus denses, accompagnée d'une baisse de la concentration massique en solides.

Cette dynamique entraîne une évolution significative des propriétés granulométriques, densimétriques et rhéologiques du fluide, qui devient plus homogène, plus fluide et moins structuré en aval. Le Tableau 4.7 illustre de manière synthétique les effets cumulatifs de la ségrégation granulométrique sur les propriétés des résidus.

Tableau 4.7 Synthèse des variations des propriétés granulométriques, densimétriques et rhéologiques des résidus lors de l'essai d'écoulement en canal.

Paramètre	Tendance avec la distance	Interprétation physique
D₈₀	Diminue	Décantation des particules grossières
C_U (coefficent d'uniformité)	Diminue	Mélange plus uniforme en aval
D₁₀, D₂₀, D₅₀	Quasi stables	Les fines restent en suspension
G_s (densité relative)	Diminue	Décantation des particules les plus denses
C_w (concentration massique)	Diminue	Dilution progressive du mélange
τ_y (seuil de cisaillement)	Diminue	Baisse de la cohésion et de la structuration du fluide
η_p (viscosité dynamique)	Diminue fortement	Fluidification due à la perte de particules et à la dilution

CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusions

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de comprendre l'influence des propriétés physico-rhéologiques sur le phénomène de la ségrégation granulométrique des résidus miniers lors de leur dépôt dans un parc à résidus, à l'aide d'essais d'écoulement en canal et d'analyses en laboratoire.

Les résidus miniers de MCM analysés présentent une teneur en eau relativement élevée, avec une moyenne de 63,3%, indiquant un matériau très humide, ce qui peut influencer son comportement lors du transport et du dépôt. La concentration massique en solides mesurée reste légèrement inférieure à la valeur cible.

Les résultats granulométriques révèlent une distribution continue, homogène et bien graduée, avec un coefficient d'uniformité (C_U) compris entre 10 et 11, et un coefficient de courbure (C_C) proche de 1. Cette granulométrie bien étalée, ainsi que la faible variabilité entre les échantillons, témoigne d'une bonne stabilité du matériau. Toutefois, cela complique la mise en évidence du phénomène de ségrégation hydraulique, les courbes granulométriques des différents échantillons étant presque superposées. Ce comportement suggère une séparation granulométrique peu marquée dans les conditions testées.

Bien que les résidus analysés soient compatibles avec une étude de ségrégation, les conditions expérimentales actuelles, notamment la faible distance considérée, n'ont pas permis de démontrer ce phénomène de manière nette.

Les essais rhéologiques ont confirmé le comportement non-newtonien des résidus en pulpe, typique d'un fluide pseudoplastique avec un seuil de cisaillement marqué. Ces propriétés sont restées quasiment constantes sur l'ensemble de la distance d'échantillonnage considérée. Par conséquent, le phénomène de ségrégation granulométrique n'a pas été observé dans les résidus en écoulement prélevés dans le parc à résidus de la mine Canadian Malartic.

Les essais d'écoulement en canal, réalisés à une concentration massique de solides C_w de 62% et une pente représentative du site du parc à résidus de MCM, ont permis d'observer un écoulement stable et quasi-laminaire. Ils ont également mis en évidence un phénomène de ségrégation

granulométrique, caractérisé par la décantation progressive des particules les plus grossières et denses en amont. Ce processus entraîne une diminution de la concentration massique et une variation de la densité relative des particules le long du canal. Le mélange évolue ainsi vers un fluide plus homogène, moins dense, moins visqueux et moins cohésif en aval. Ces observations confirment l'influence des propriétés physico-rhéologiques sur la ségrégation granulométrique. Elles contribuent à améliorer la compréhension du comportement des résidus lors de leur dépôt hydraulique.

5.2 Recommandations

Afin d'améliorer la qualité des résultats et de procéder à une étude plus globale du phénomène de ségrégation hydraulique des résidus miniers, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

- Optimisation de l'échantillonnage
 - Multiplier les points d'échantillonnage le long d'un axe longitudinal dans le sens de l'écoulement.
 - Espacer les points selon un intervalle régulier et enregistrer leurs coordonnées GPS.
 - Compléter l'échantillonnage de l'ensemble des points d'un même axe sans interruption, pour éviter les effets de variation dans le sens d'écoulement.
- Amélioration des essais d'écoulement en canal
 - Déterminer le débit de manière précise (volumétrique, débitmètre ou méthode hydraulique).
 - Réaliser la mesure directe de la vitesse d'écoulement.
- Modélisation numérique
 - Choisir un logiciel adapté à l'étude (par exemple : FLUENT, FLOW-3D).
 - Réaliser sur le terrain les mesures nécessaires : topographie, coordonnées précises, conditions aux limites.

- Calibrer les modèles à partir de données expérimentales fiables et représentatives.
- Valider les résultats de simulation par une comparaison systématique avec les essais physiques et ajuster les paramètres en conséquence.

Ces recommandations visent à approfondir la compréhension des mécanismes de ségrégation granulométrique des résidus en pulpe. Une meilleure maîtrise de ces phénomènes pourrait contribuer à l'amélioration des techniques de gestion et de restauration des sites miniers, notamment en ce qui concerne le contrôle de la nappe phréatique surélevée (NPS).

RÉFÉRENCES

- Allen, J. R. (2012). *Principles of physical sedimentology*. Springer Science & Business Media.
- Andreotti, B., Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2013). *Granular media: between fluid and solid*. Cambridge University Press.
- Aubertin, M., Aachib, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (1996). *Recouvrements multi-couches avec effets de barrière capillaire pour contrôler le drainage minier acide: étude en laboratoire et in situ*. Symposium Int. "Exemples majeurs et récents en géotechnique de l'environnement", Paris. <https://publications.polymtl.ca/31555/>
- Aubertin, M., Aachib, M., Joanes, A., Monzon, M., & Authier, K. (1999). *Evaluation du flux d'oxygène à travers les matériaux de revêtement*. Proceedings Annual Conference of APGGQ, Rouyn-Noranda, Quebec (p. 19-30).
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002a). *Environnement et gestion des rejets miniers*. Manuel sur CD-Rom, Presses Internationales Polytechnique.
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., . . . Li, L. (2002b). 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, Montréal, Québec, Canada*, 5-8.
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R. P., Julien, M., Belem, T., . . . Li, L. (2002c). *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. (p. 5-8).
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., & Chapuis, R. P. (2013a). 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.*, 36.
- Aubertin, M., & Chapuis, R. P. (1991). *Critères de conception pour les ouvrages de retenue des résidus miniers dans la région de l'Abitibi*. Comptes-Rendus de la 1ère Conférence Canadienne de Géotechnique Environnementale (p. 113-127).
- Aubertin, M., James, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2013b). Revue de divers aspects liés à la stabilité géotechnique des ouvrages de retenue de résidus miniers: Partie II—Analyse et conception. *Environnement, Ingénierie & Développement.*, 50.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1104-1122. <https://doi.org/10.1139/t03-054>
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M., & Riffon, O. (2002d). *Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle*. Défis & Perspectives: Symposium.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Maqsoud, A. (2015). *Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA*. Symposium 2015 sur l'environnement et les mines.

- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2013). Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover. *Mine Water and the Environment*, 32(1), 42.
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., Bussière, B., Plante, B., & Bouzahzah, H. (2014). Laboratory study of highly pyritic tailings submerged beneath a water cover under various hydrodynamic conditions. *Mine Water and the Environment*, 33(3), 241.
- Azam, S., & Li, Q. (2010a). Tailings dam failures: A review of the incidence, frequency and cause. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 24(3), 239–256.
- Azam, S., & Li, Q. (2010b). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, 28(4), 50-54.
- Aznar-Sánchez, J. A., García-Gómez, J. J., Velasco-Muñoz, J. F., & Carretero-Gómez, A. (2018). Mining waste and its sustainable management: advances in worldwide research. *Minerals*, 8(7), 284.
- Baker, B. J., & Banfield, J. F. (2003). Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, 44(2), 139-152.
- Barnes, H. A., Hutton, J. F., & Walters, K. (1989). *An introduction to rheology* (vol. 3). Elsevier.
- Barnes, H. A., & Nguyen, Q. D. (2001). Rotating vane rheometry—a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 98(1), 1-14.
- Beaume, G. (2008). *Modelling and numerical simulation of a complex fluid flow*, Mémoire de thèse. École Nationale Supérieure des Mines de Paris].
- Belem, T. (2023). *Notes du Cours de GNM 1002/GML6603 - Remblais miniers*. UQAT – École Polytechnique de Montréal.
- Belem, T., & Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, 147-174.
- Belem, T., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2003). *Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie I: De sa fabrication à sa mise en place sous terre*. Symp. int. Apres-mines, GISOS, Gisos ed., Nancy, France (p. 5-7).
- Benckert, A., & Eurenius, J. (2001). Seminar on Safe Tailings Dam Constructions, Gallivare, Swedish Mining Association (p. 30-36).
- Benzaazoua, M., Belem, T., Ouellet, S., & Fall, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement à court, à moyen et à long terme. *Proceedings of Apres-mines, Nancy, France*.
- Benzaazoua, M., Fall, M., & Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152.
- Bernal, J. D., & Mason, J. (1960). Packing of spheres: co-ordination of randomly packed spheres. *Nature*, 188(4754), 910-911.
- Berryman, J. G. (1983). Random close packing of hard spheres and disks. *Physical Review A*, 27(2), 1053.

- Blight, G. E. (1988). *Some less familiar aspects of hydraulic fill structures*. Hydraulic Fill Structures (p. 1000-1027).
- Blight, G. E. (2009a). *Geotechnical-engineering-for-mine-waste-storage-facilities*. CRC press.
- Blight, G. E. (2009b). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC press.
- Blight, G. E., & Bentel, G. (1983). The behaviour of mine tailings during hydraulic deposition. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 83(4), 87-91.
- Blight, G. E., & Melentev. (1994). The master profile for hydraulic fill tailings beaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 107(1), 27-40.
- Blight, G. E., & Steffen, O. (1979). Geotechnics of gold mining waste disposal. *Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal*, 1-53.
- Blight, G. E., Thomson, R., & Vorster, k. (1985). Profiles of hydraulic-fill tailings, beaches, and seepage through hydraulically sorted tailings. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 85(5), 157-161.
- Bonnoit, C. (2009). *Ecoulement de suspensions granulaires modèles*, ESPCI ParisTECH].
- Boussicault, B. (2007). *Étude géophysique d'une digue de rétention d'eau, parc à résidus miniers Solbec, Stratford, Québec* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS Eau Terre et Environnement].
- Bui, V. K., Montgomery, D., Hinczak, I., & Turner, K. (2002). Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1489-1496.
- Bussiere, B. (1994). *Evaluation des propriétés hydrogéologiques de résidus miniers utilisés comme barrières de recouvrement* [Mémoire de maîtrise, Ecole polytechnique de Montréal].
- 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. <https://doi.org/10.1139/t07-040>
- Bussière, B., & Aubertin, M. (1999). *Clean tailings as cover material for preventing acid mine drainage: an in situ experiment*. Proceedings of Sudbury (vol. 99, p. 19-28).
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2020). *Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage*. CRC press.
- Cadilhe de Oliveira, C., & Passini, L. d. B. (2025). Scale effects on dam-break analysis with flume test modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 25(6), 313-321.
- Cavali, D. (2017). <https://www.linkedin.com/pulse/future-mining-tailings-managment-davide-cavalli/>.
- CE. (2009). *Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities-January 2009*.
- Chen, R., Reese, J., & Fan, L. S. (1994). Flow structure in a three-dimensional bubble column and three-phase fluidized bed. *AIChE Journal*, 40(7), 1093-1104.

- CIGB. (2001). *Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences*. Bulletin 121, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.
- Cooke, R. (2007). Backfill pipeline distribution systems—design methodology review. *CIM Mag*, 2.
- Coussot, P. (2017). *Mudflow rheology and dynamics*. Routledge.
- Coussot, P., & Ancey, C. (1999). Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes. *Physical Review E*, 59(4), 4445.
- Coussot, P., & Boyer, S. (1995). Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test. *Rheologica Acta*, 34, 534-543.
- Coussot, P., & Van Damme, H. (1997). Physico-chimie et rhéologie des mélanges argile-eau. *Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable: introduction aux suspensions en géologie et en physique*, ILDEFONSE B., ALLAIN C., COUSSOT P., 169-192.
- Da Cruz, F., Emam, S., Prochnow, M., Roux, J.-N., & Chevoir, F. (2005). Rheophysics of dense granular materials: Discrete simulation of plane shear flows. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 72(2), 021309.
- 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*. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD) (vol. 2630, p. 405420).
- Dalcé, J. B. (2018). *Étude expérimentale des propriétés géotechniques d'un remblai hydraulique en lien avec la ségrégation des particules*, Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)].
- Davies, M. P., & Rice, S. (2022). An alternative to conventional tailing management—“dry stack” filtered tailings. Dans *Tailings and Mine Waste 2001* (p. 411-420). CRC Press.
- Driouky, Z. (2020). *Étude de l'impact de la ségrégation hydraulique des résidus miniers sur la performance de la technique de la nappe phréatique surelevée* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue]. Depositum. <http://depositum.uqat.ca/id/eprint/1256/>
- Egiebor, N. O., & Oni, B. (2007). Acid rock drainage formation and treatment: a review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2(1), 47-62.
- EPA. (1995). Best Practice Environmental Management in Mining. *Australian Journal of Environmental Management*, 2(4), 207-209. <https://doi.org/10.1080/14486563.1995.10648331>
- Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M., & Mulligan, D. R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources policy*, 36(2), 114-122.
- Gao, J. (2015). *Investigations of the flume test and mini-slump test for thickened tailings disposal*, University of Western Australia].
- Gao, J., & Fourie, A. (2015). Using the flume test for yield stress measurement of thickened tailings. *Minerals Engineering*, 81, 116-127.

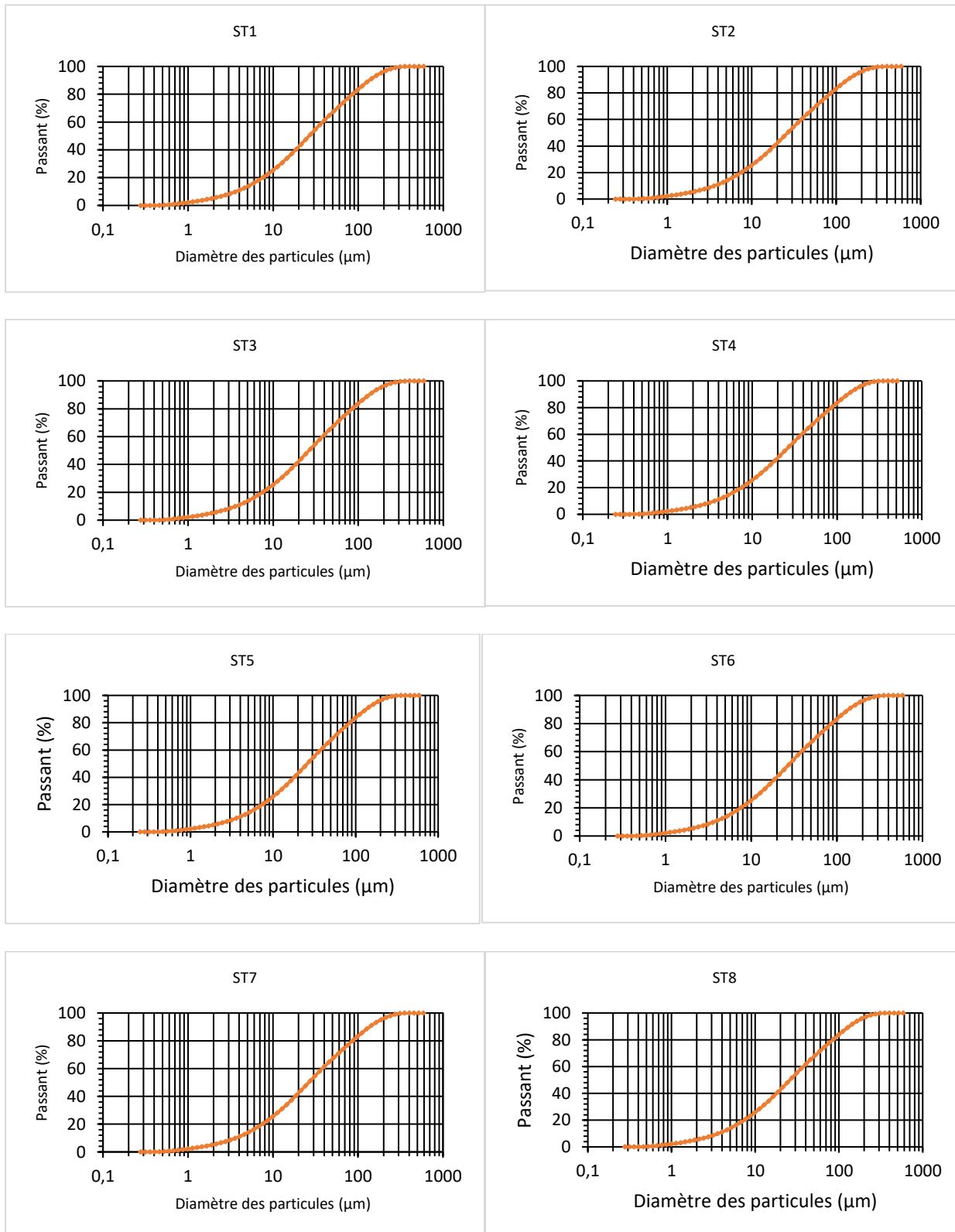
- Gray, J., & Thornton, A. (2005). A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461(2057), 1447-1473.
- Gray, J. M. N. T. (2018). Particle segregation in dense granular flows. *Annual review of fluid mechanics*, 50(1), 407-433.
- Grimard, L., James, M., Karray, M., & Mhenni, A. (2017). *Physical and mechanical characterisation of hydraulically deposited tailings using shear wave velocity*. In 70th Canadian Geotechnical Conference; 12th joint with IAH-CNC.
- Guazzelli, E., & Morris, J. F. (2011). *A physical introduction to suspension dynamics* (vol. 45). Cambridge University Press.
- Haile, G., O'Callaghan, W., Hartney, T., & Cameron, W. (2000). *Experience with thickened red mud tailings (paste) stacking tropical and temperate climates and applicability of the technology to other tailings*. Proceedings of the 53rd Canadian Geotechnical Conference Canadian Geotechnical Society (p. 15-18).
- Hakkou, R., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2008). Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 1. Environmental characterization. *Mine Water and the Environment*, 27, 145-159.
- Höglund, L. O. (2001). "EU-Towards a new mines directive - Main priorities", Ireland.
- Hou, Y. Y., & Kassim, H. O. (2005). Instrument techniques for rheometry. *Review of scientific instruments*, 76(10).
- Hu, W., Xin, C., Li, Y., Zheng, Y., Van Asch, T., & McSaveney, M. (2021). Instrumented flume tests on the failure and fluidization of tailings dams induced by rainfall infiltration. *Engineering Geology*, 294, 106401.
- Hudson-Edwards, K. A., & Dold, B. (2015). Mine waste characterization, management and remediation. *Minerals*, 5(1), 82-85.
- ICOLD, A. (1996). *Guide to Tailings Dams and Impoundments: Design, Construction, Use and Rehabilitation*. ICOLD, Committee on Mine and Industrial Tailings Dams, Paris.
- Jasiūnienė, E., Cicėnas, V., Grigaliūnas, P., Rudžionis, Ž., & Navickas, A. A. (2018). Influence of the rheological properties on the steel fibre distribution and orientation in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 51, 1-14.
- Johnson, J., Vialpando, J., & Lee, C. (2005). Paste tailings management alternative--Study results for Molycorp's lanthanide group operations in Mountain Pass, California. *Mining Engineering*, 57(2), 50-56.
- Josserand, L. (2002). *Ressuage des bétons hydrauliques*, Ecole des Ponts ParisTech].
- Kachhwal, L. K. (2011). *Evaluation of Wind-Induced Resuspension on the Performance of a Mine Tailings Storage Facility* [PhD Thesis, The University of Western Ontario (Canada)].
- Kirk Nordstrom, D. (1982). Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid Sulfate Weathering*, 10, 37-56.
- Kleinmann, R. L. P. (1979). *The biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation*. Princeton University.

- Klohn, E. J. (1986). *Dam safety and tailings dam design*. Dam Safety Seminar (p. 129-154).
- Lapierre, J. (2014). *Étude expérimentale du comportement en cisaillement de résidus miniers épaissis* [Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke].
- Lapierre, J., Nuth, M., & Karray, M. (2013). *Experimental study of the small strain and large strain elastic parameters of thickened tailings*. In 66th Canadian Geotechnical Conference; 11th joint with IAH-CNC.
- Laure, P., Beaume, G., Peuvrel-Disdier, E., & Vincent, M. (2009). *Numerical and Experimental Studies of Suspensions of Fiber and Spherical Solid Particles*. Coupled Problems 2009: Computational for Coupled Problems in Science and Engineering (p. 4 pages).
- Marche, C. (2008). *Barrages: crues de rupture et protection civile*. Presses inter Polytechnique.
- Martin, V., McMullen, J., & Aubertin, M. (2005). *Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Mining and the Environment, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada (p. 56-71).
- MEND. (2001). *Manual, Report 5.4.2, Volume 4—prevention and control*. Secretariat CANMET, Ottawa, Ontario.
- Mihiretu, Y., Chalaturnyk, R., & Scott, J. D. (2008). *Tailings segregation fundamentals from flow behaviour perspectives*. 1st International Oil Sands Tailings Conference (vol. 112120).
- Moncur, M., Jambor, J., Ptacek, C., & Blowes, D. (2009). Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite. *Applied Geochemistry*, 24(12), 2362-2373.
- Morin, K. A., & Hutt, N. M. (2001). *Environmental geochemistry of minesite drainage: Practical theory and case studies, Digital Edition*. MDAG Publishing (www.mdag.com), Surrey, British Columbia.
- Moses, C. O., Nordstrom, D. K., Herman, J. S., & Mills, A. L. (1987). Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6), 1561-1571.
- Nicholson, R. V., Gillham, R. W., & Reardon, E. J. (1988). Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5), 1077-1085.
- Opris, R. I. (2017). *Caractérisation de résidus miniers à l'aide d'essais de pénétration au cône*. [Mémoire de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/560/>
- Ottino, J. M., & Khakhar, D. V. (2000). Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1), 55-91.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1312-1323.
- Ouatara, D. (2011). *Étude des propriétés rhéologiques de résidus miniers densifiés* [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/560/>
- Pabst, T., Bussière, B., Aubertin, M., & Molson, J. (2018). Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydrogeochemical assessment. *Journal of Contaminant Hydrology*, 214, 39-53.

- Panesar, D., & Shindman, B. (2012). The effect of segregation on transport and durability properties of self consolidating concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 252-264.
- Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B. G. (2015). A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 82, 107-124.
- Pascal, L., Sylvie, L., Guy, G., Nicole, H., & François, B. (2021). *<NI 43-101 Technical Report, Canadian Malartic Mine>*. Mine Canadian Malartic.
- Richardson, J., & Zaki, W. (1997). Sedimentation and fluidisation: Part I. *Chemical Engineering Research and Design*, 75, S82-S100.
- Ritcey, G. M. (2005). Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, 78(1-2), 3-20.
- Robinsky, E. I. (1975). Thickened discharge. A new approach to tailings disposal. *C.I.M. BULL*, 68(764), 47-53.
- Robinsky, E. I. (1999). *Thickened tailings disposal in the mining industry*. EI Robinsky Associates.
- Silva, R. (2022). Experimental characterization techniques for solid-liquid slurry flows in pipelines: A review. *Processes*, 10(3), 597.
- Silva, R., Garcia, F. A., Faia, P. M., & Rasteiro, M. G. (2015). Settling suspensions flow modelling: A review. *KONA Powder and Particle Journal*, 32, 41-56.
- Simate, G. S., & Ndlovu, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1785-1803.
- Skousen, J. G., Sexstone, A., & Ziemkiewicz, P. F. (2000). Acid mine drainage control and treatment. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*, 41, 131-168.
- Sofrá, F., & Boger, D. V. (2002). Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. *Chemical Engineering Journal*, 86(3), 319-330.
- Talmon, A. M., van Kesteren, W. G., Sittoni, L., & Hedblom, E. P. (2014). Shear cell tests for quantification of tailings segregation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(2), 362-373.
- Temgoua, M. D. (2021). *Évaluation de la ségrégation hydraulique dans deux parcs à résidus inactifs situés en Abitibi* [Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
- Vick, S. G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. BiTech Publishers Ltd.
- Vick, S. G. (2001). *Stability aspects of long-term closure for sulphide tailings*. Seminar on Safe Tailings Dam Constructions, Gallivare (p. 20-21).
- Vick, S. G., Dorey, R., Finn, W., & Adams, R. C. (1993). *Seismic stabilization of St. Joe State Park tailings dams*. Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation (p. 402-415).
- Weipert, D. (1990). The benefits of basic rheometry in studying dough rheology. *Cereal chem*, 67(4), 311-317.
- Yan, W., Cui, W., & Qi, L. (2020). Effect of aggregate gradation and mortar rheology on static segregation of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 259, 119816.

Zhang, X., Wang, H., & Wu, A. (2023). Study on Correlations between Tailings Particle Size Distribution and Rheological Properties of Filling Slurries. *Minerals*, 13(9), 1134.

ANNEXE A COURBES GRANULOMÉTRIQUES



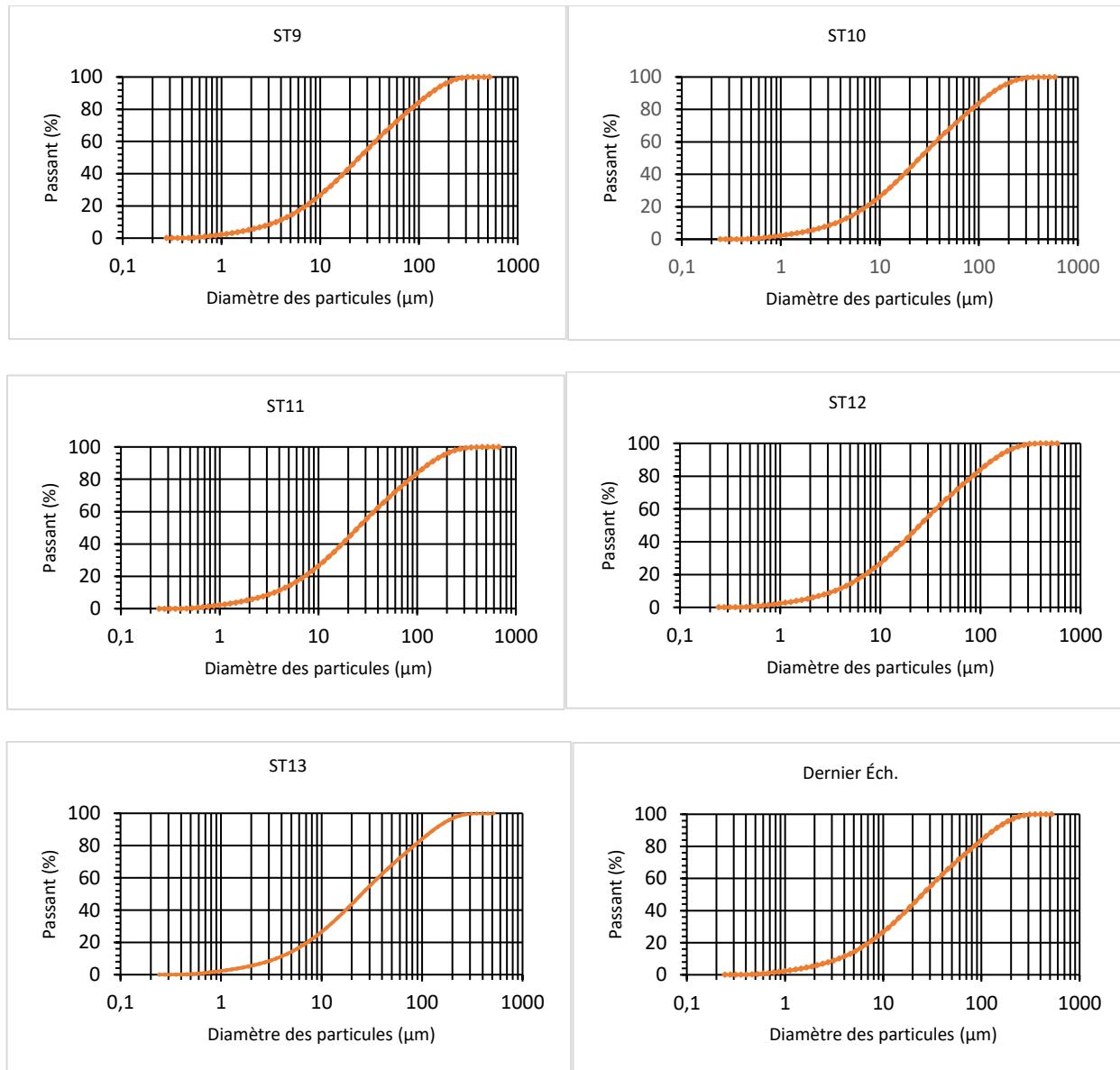
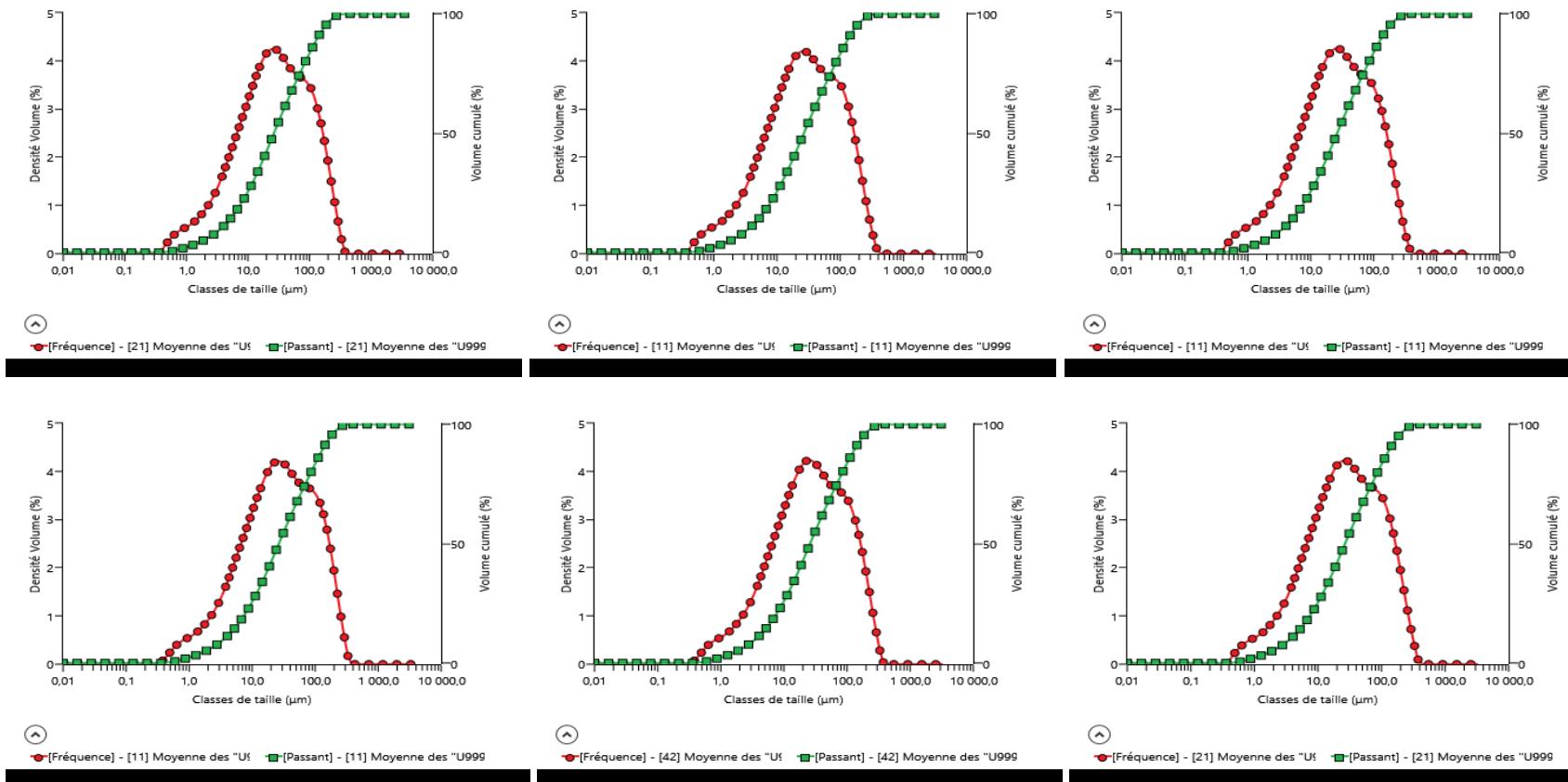
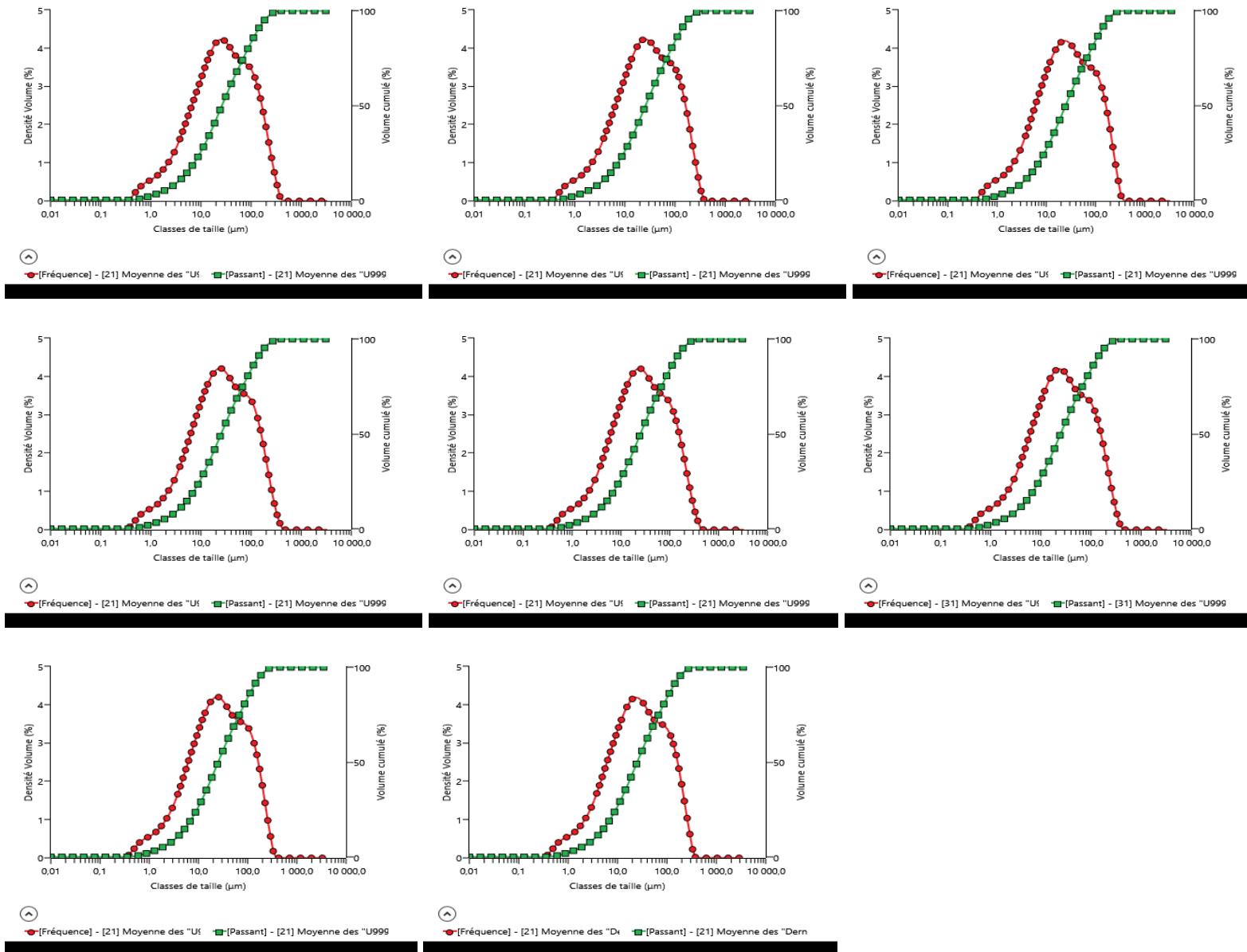
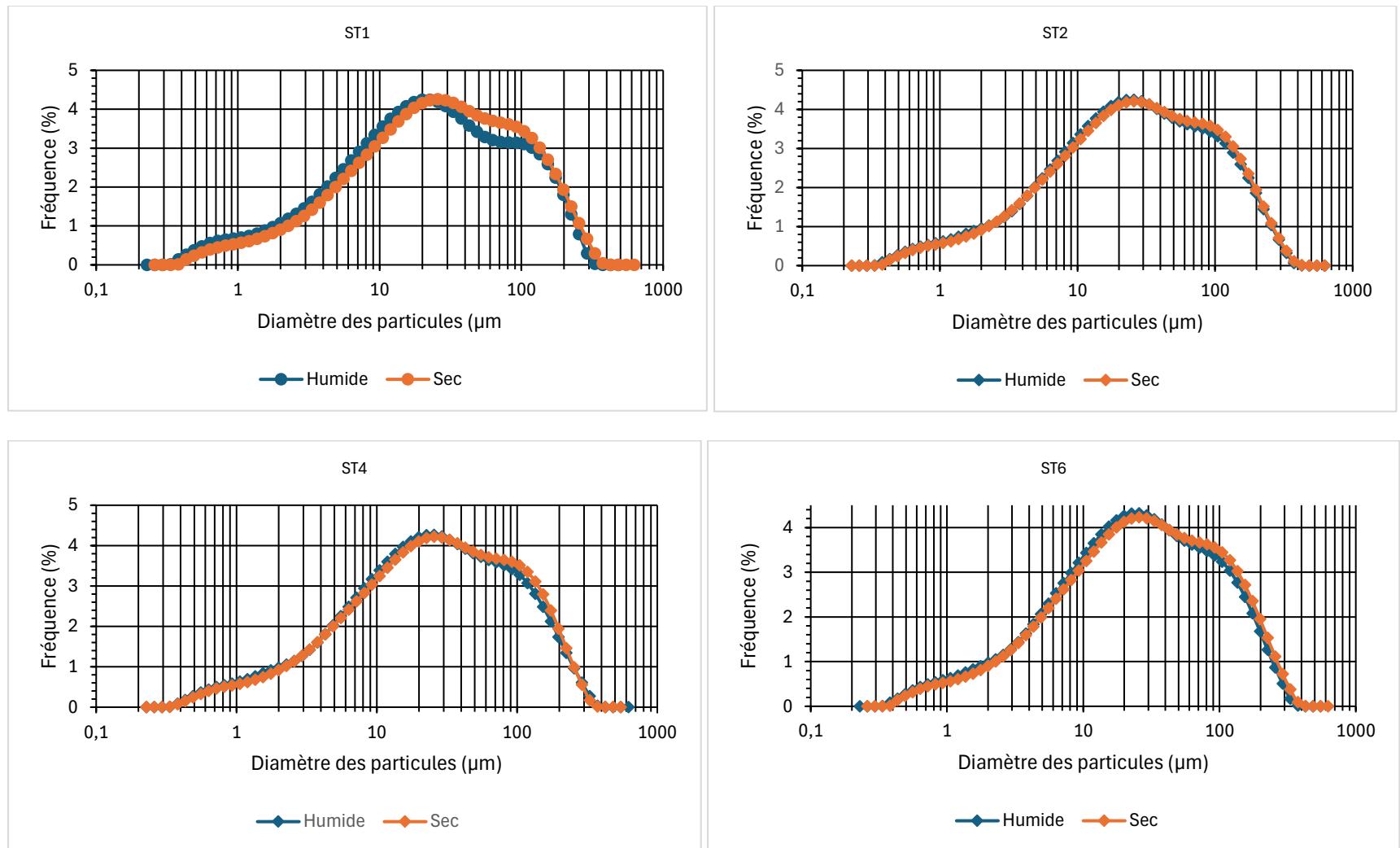
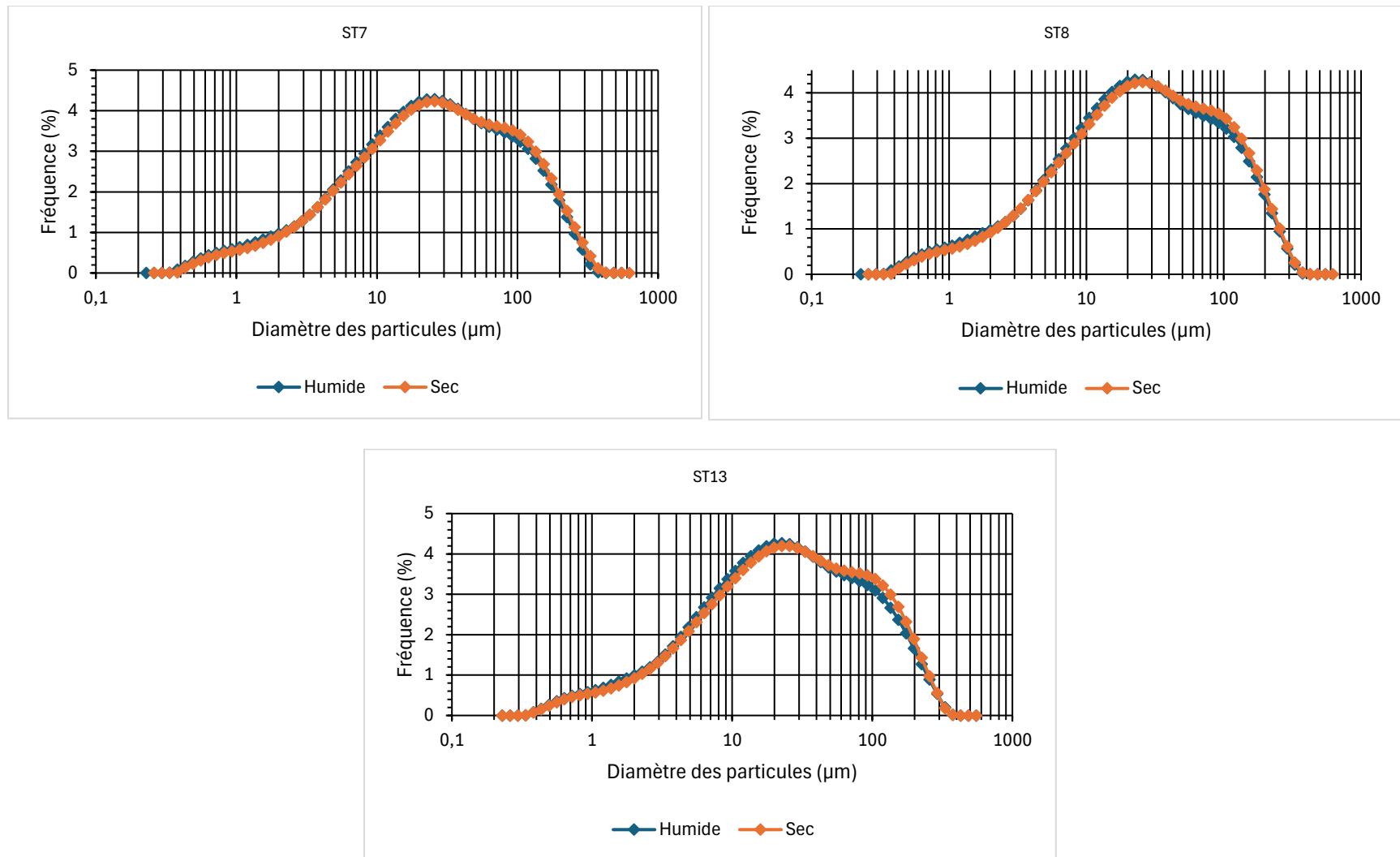


Figure A.5.1 Courbes de distribution granulométrique des 14 échantillons de résidus miniers de la MCM.







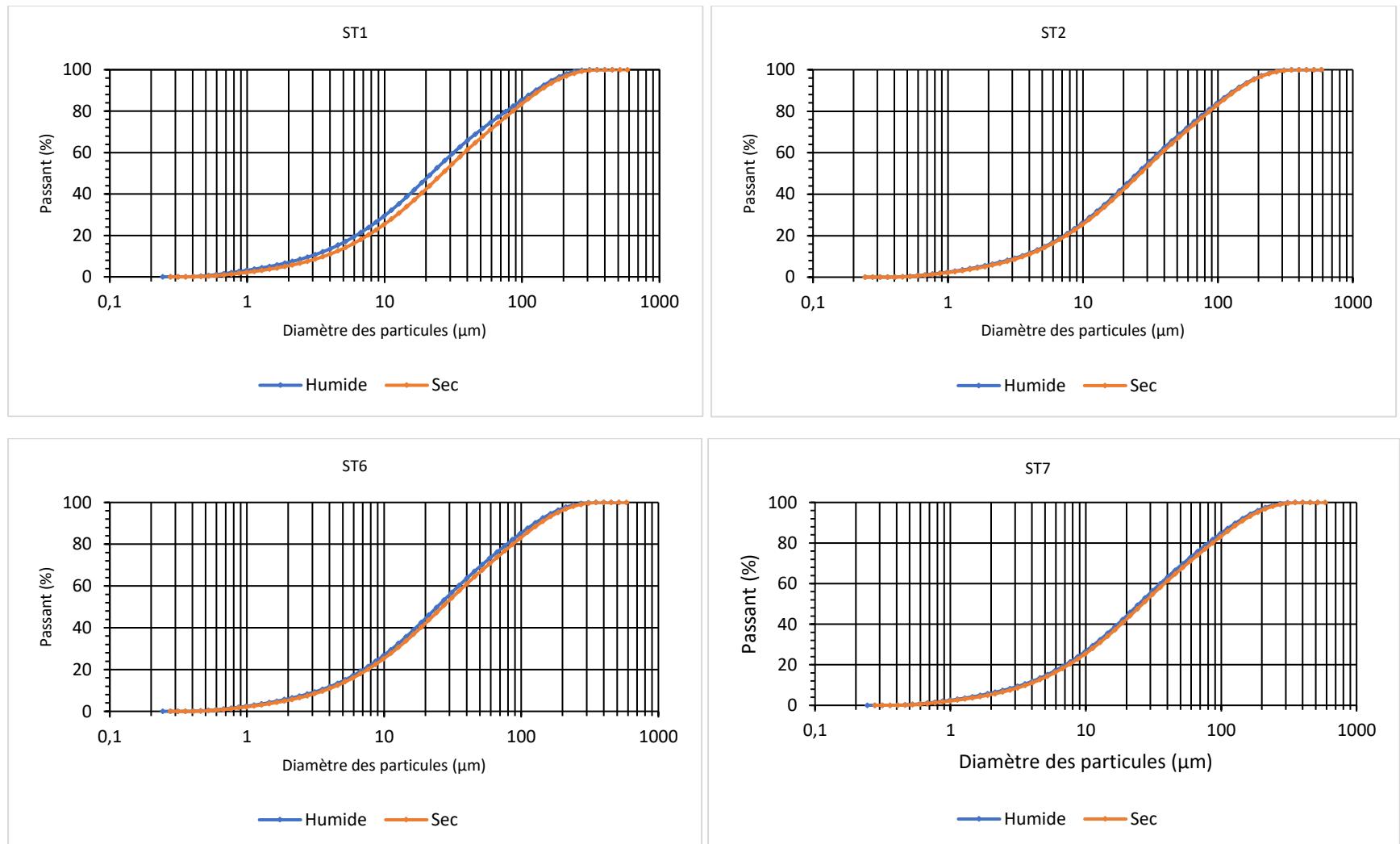


5.2.1 A1. Effet de l'état des échantillons de résidus (sec ou humide) sur les résultats du test granulométrique

Ayant observé que les valeurs du P_{80} ($P_{80} \approx 78\%$) de nos échantillons étaient relativement faibles par rapport à celles généralement obtenues dans les résidus miniers, nous avons cherché à comprendre l'origine de cette différence. En effet, dans l'exploitation de l'or en roche dure, la taille de particules de minerai permettant de libérer l'or de manière optimale (maille de libération) correspond à un P_{80} d'environ 90%. Autrement dit, 90% des particules doivent avoir une taille inférieure ou égale à 80 μm . Dès lors, nous avons envisagé de soumettre les échantillons à un test granulométrique dans leur état humide (pulpe). L'analyse granulométrique de 7 échantillons parmi les 14 a été réalisée à l'état humide. La Figure A.5.2 présente les courbes granulométriques obtenues, ainsi que leur comparaison avec celles obtenues pour les mêmes échantillons testés à l'état sec.

On constate que les courbes granulométriques des échantillons de résidus testés à l'état humide sont systématiquement décalées vers la gauche par rapport à celles des échantillons testés à l'état sec (après séchage à l'étuve). Le P_{80} et le P_{20} obtenus avec les courbes humides sont toujours supérieurs à ceux obtenus avec les courbes sèches (Figure A.5.2), et ce, pour les 7 échantillons testés.

Cette différence est particulièrement marquée pour le premier échantillon (ST1), collecté directement au bout du tuyau de déversement. En effet, les valeurs de P_{80} et P_{20} , qui sont respectivement d'environ 78% et 42% à l'état sec, passent à 81 % et 48% pour le même échantillon testé à l'état humide. Ces écarts pourraient être dus à l'agglomération des particules très fines. Bien que ces différences soient relativement faibles dans notre cas, en raison de la bonne préparation des échantillons, notamment l'homogénéisation, ces résultats indiquent qu'il serait préférable de réaliser le test granulométrique à l'état humide.



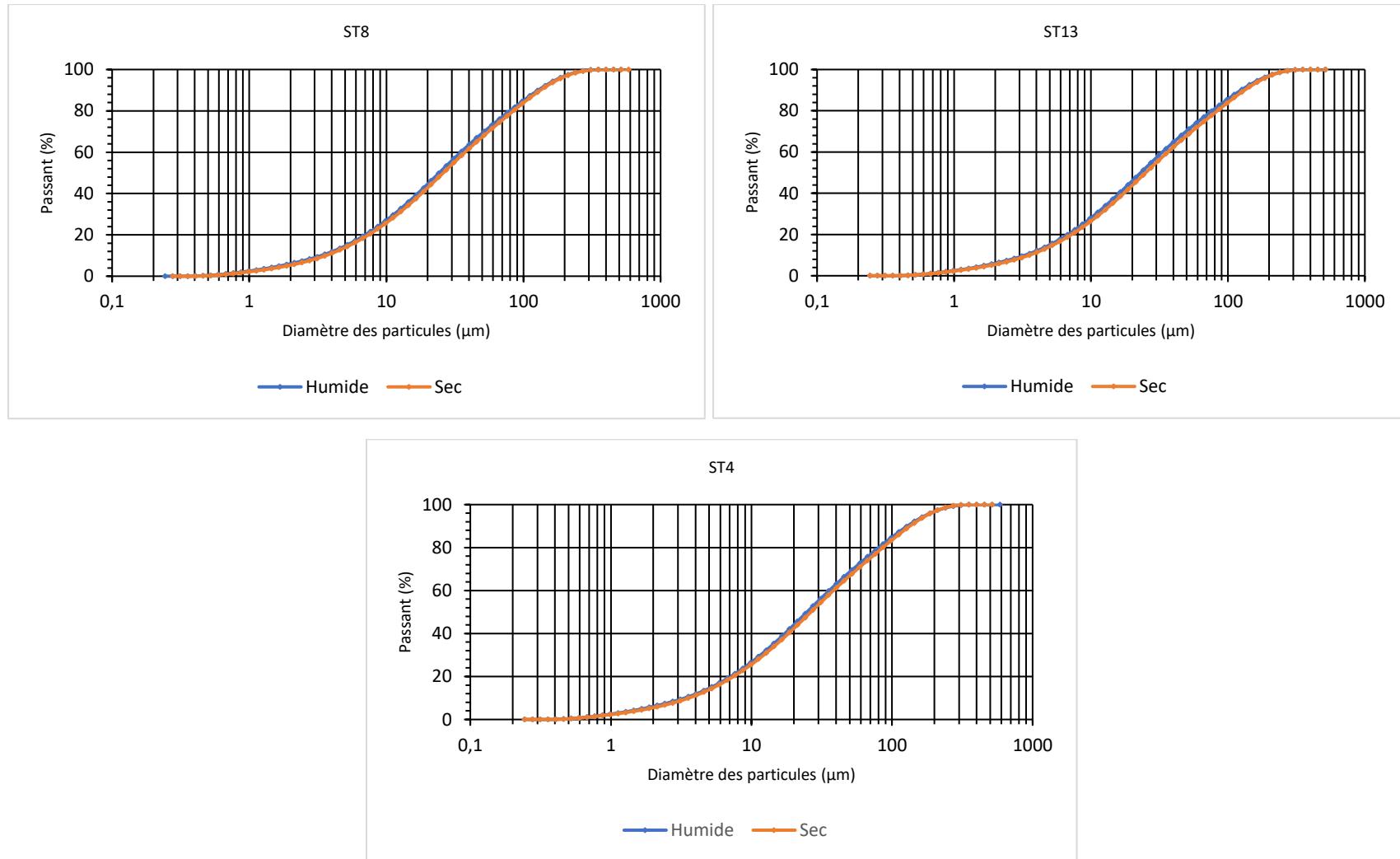


Figure A.5.2 Comparaison des courbes granulométriques des échantillons testés à l'état humide et à l'état sec.

ANNEXE B DIFFRACTOGRAMME OBTENUS AU DRX

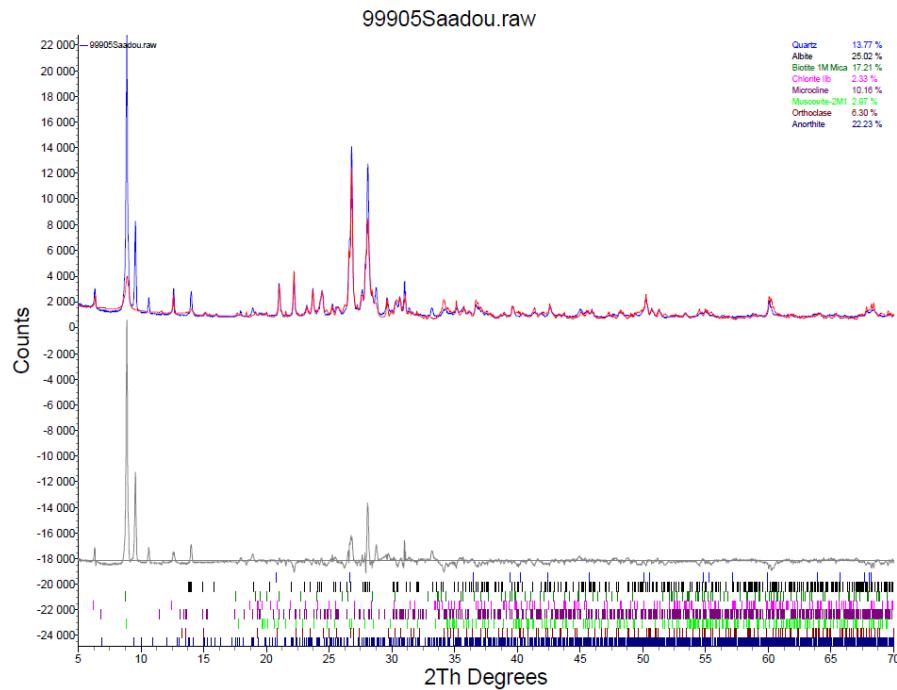


Figure B1 - Spectre et pourcentages des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST1.

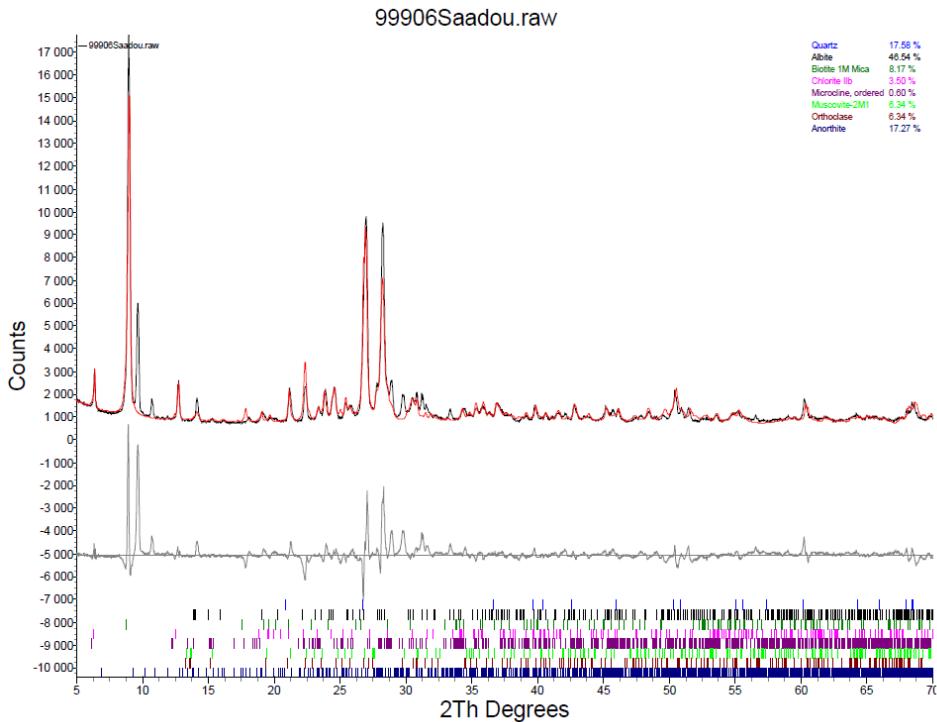


Figure B2 – Diffractogramme et % des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST2.

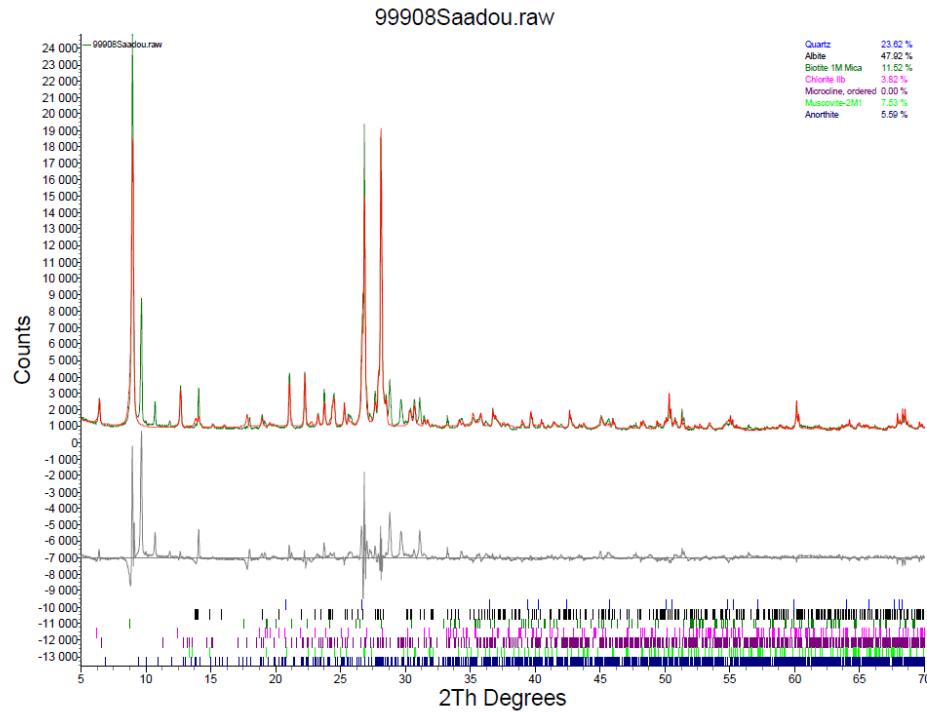


Figure B3 - Spectre et pourcentages des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST4.

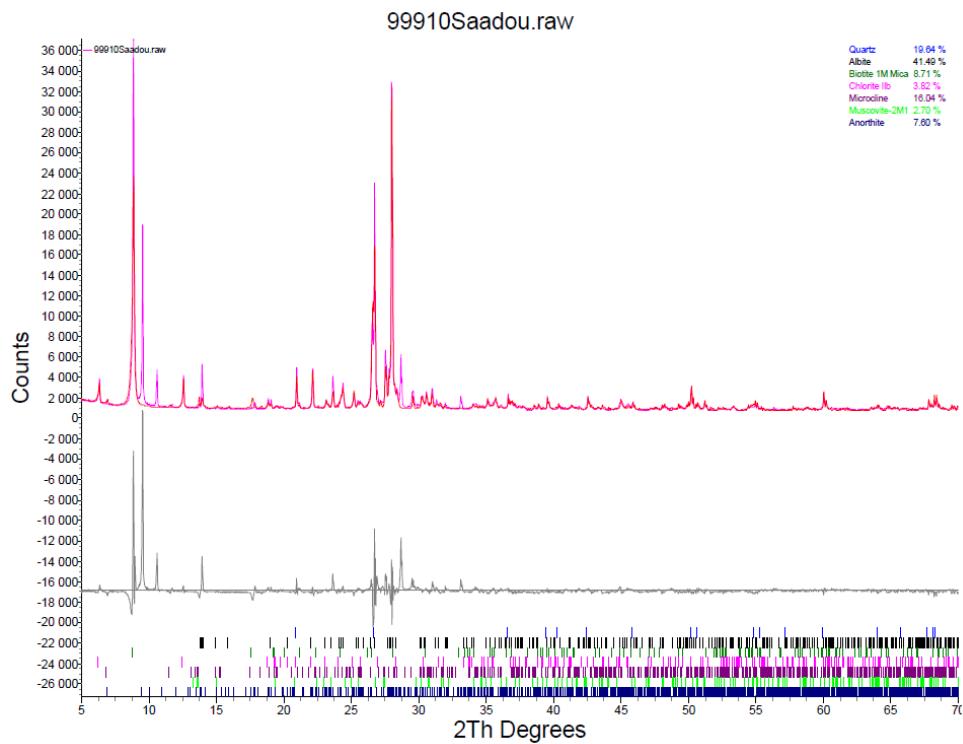


Figure B4 - Spectre et pourcentages des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST6.

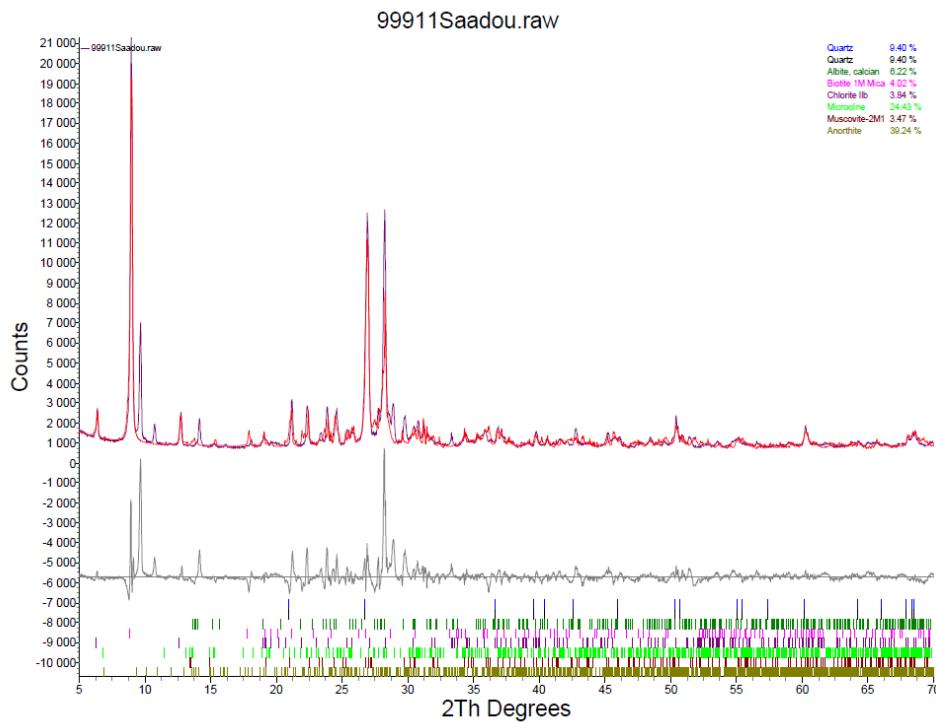


Figure B5 - Spectre et pourcentages des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST7.

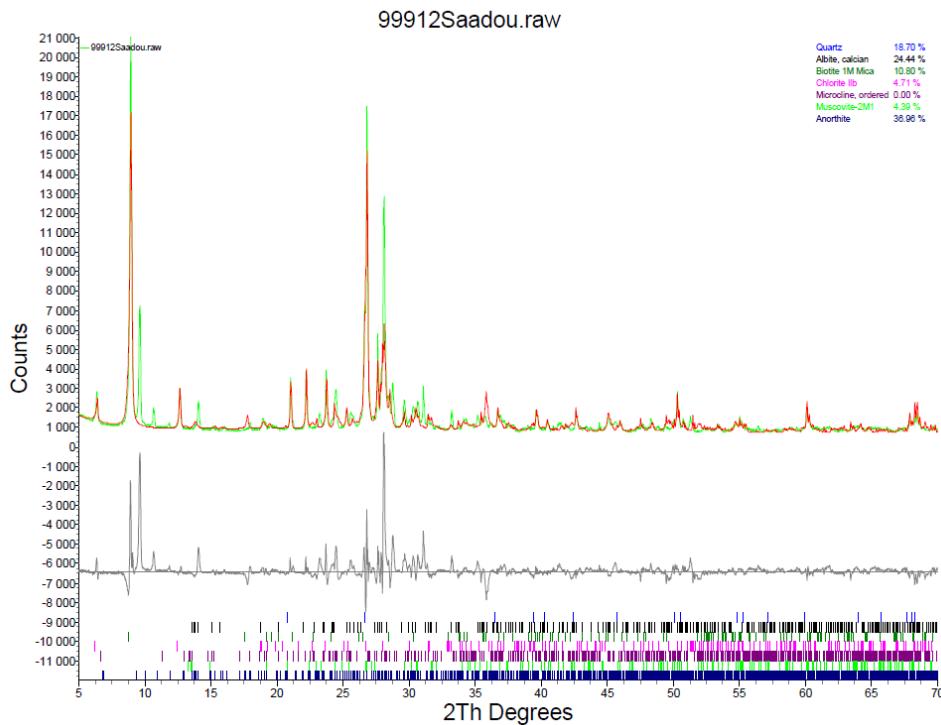


Figure B6 - Spectre et pourcentages des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST8.

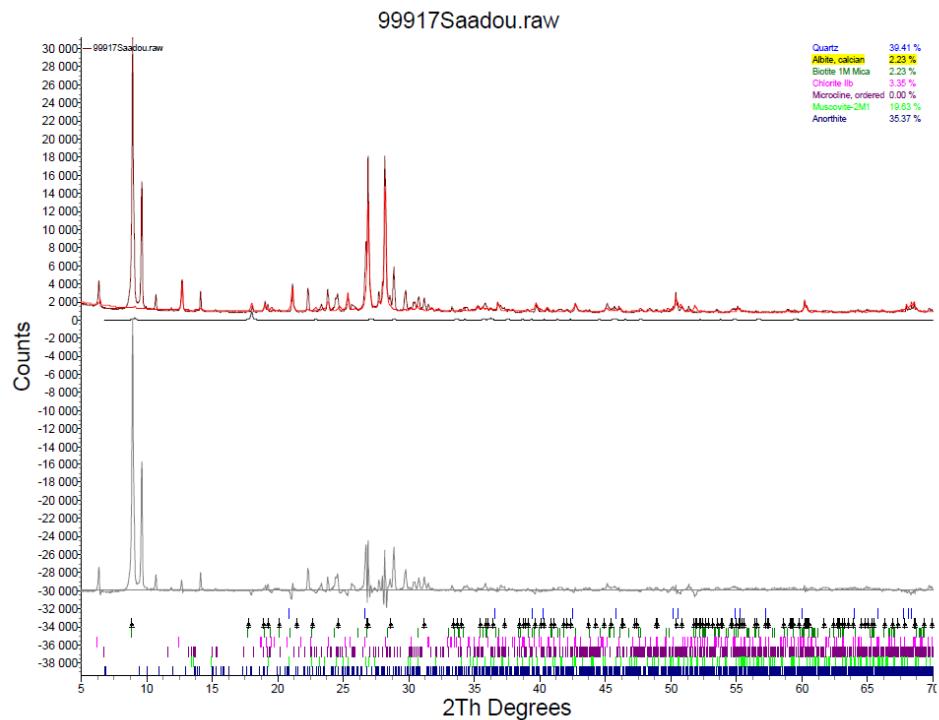
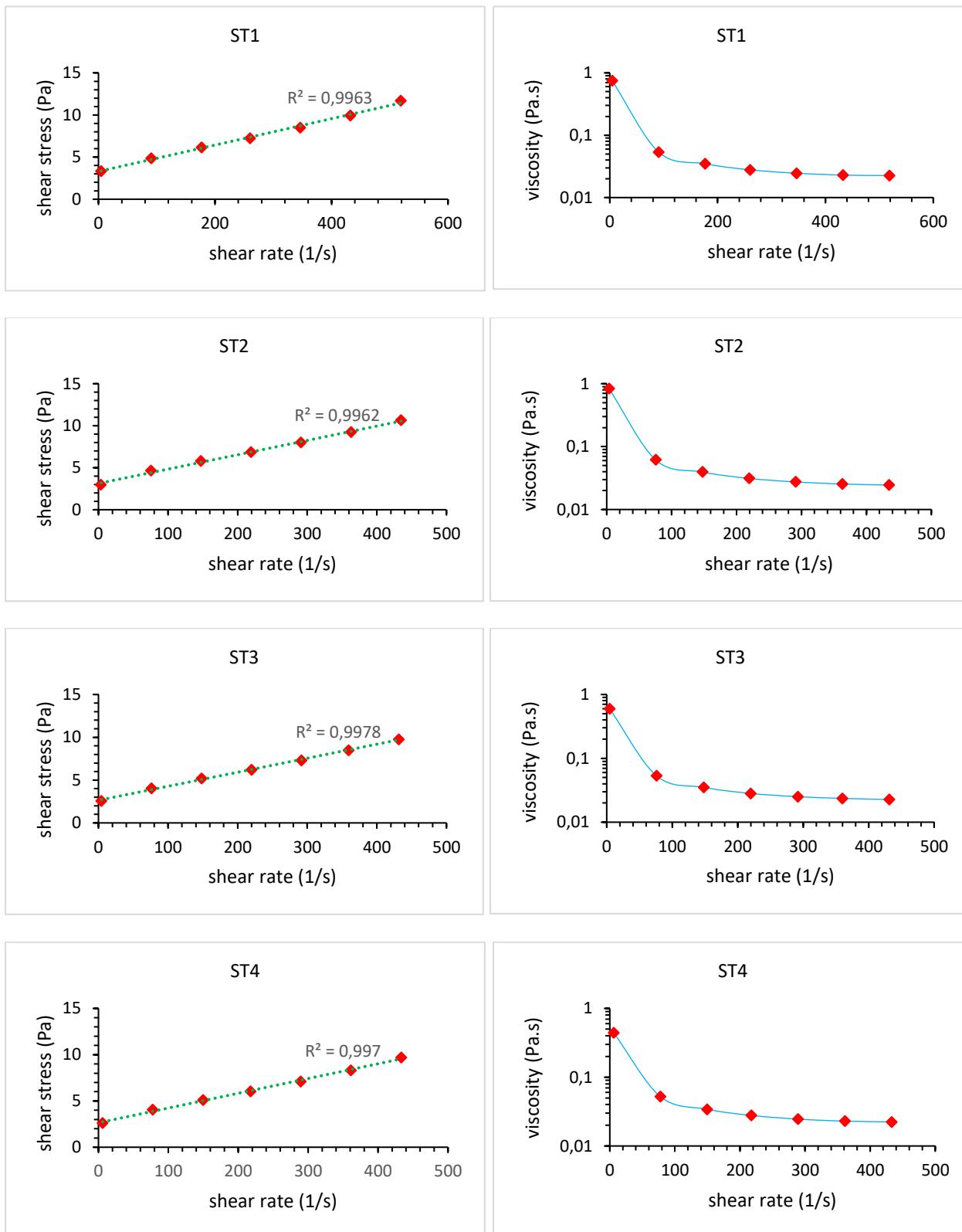
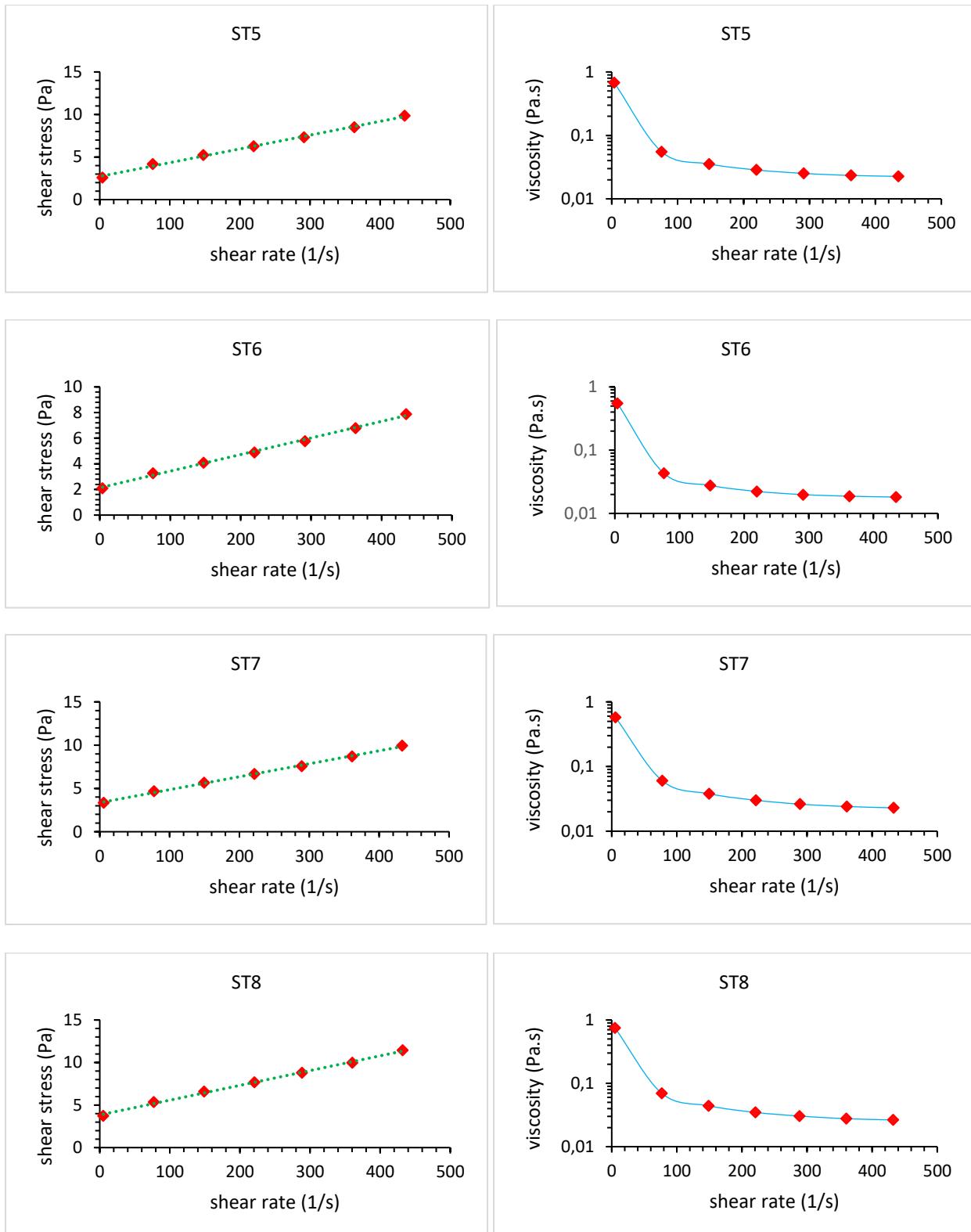
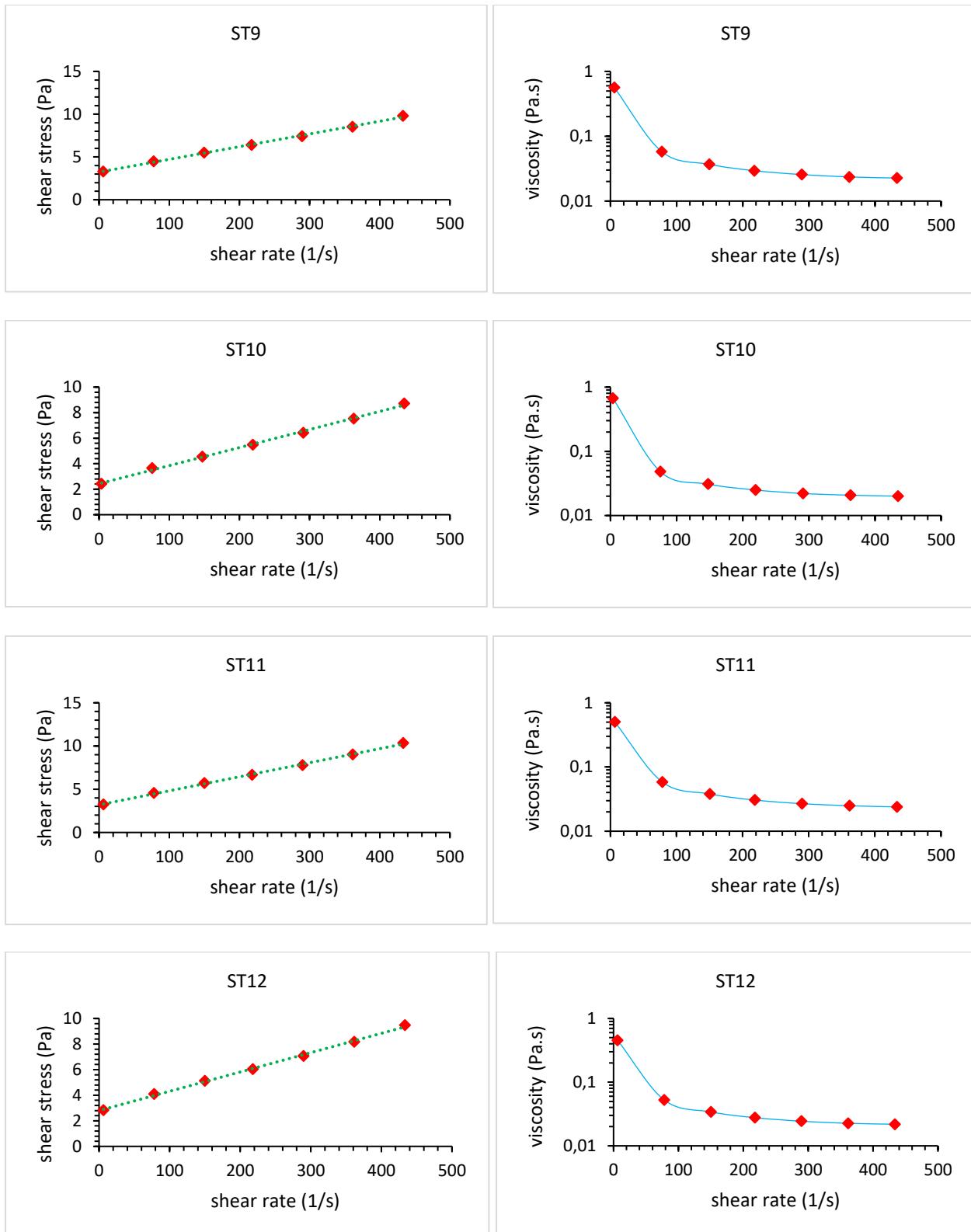


Figure B7 - Spectre et pourcentages des phases minérales identifiées pour l'échantillon ST13.

ANNEXE C RHÉOGRAMMES OBTENUS







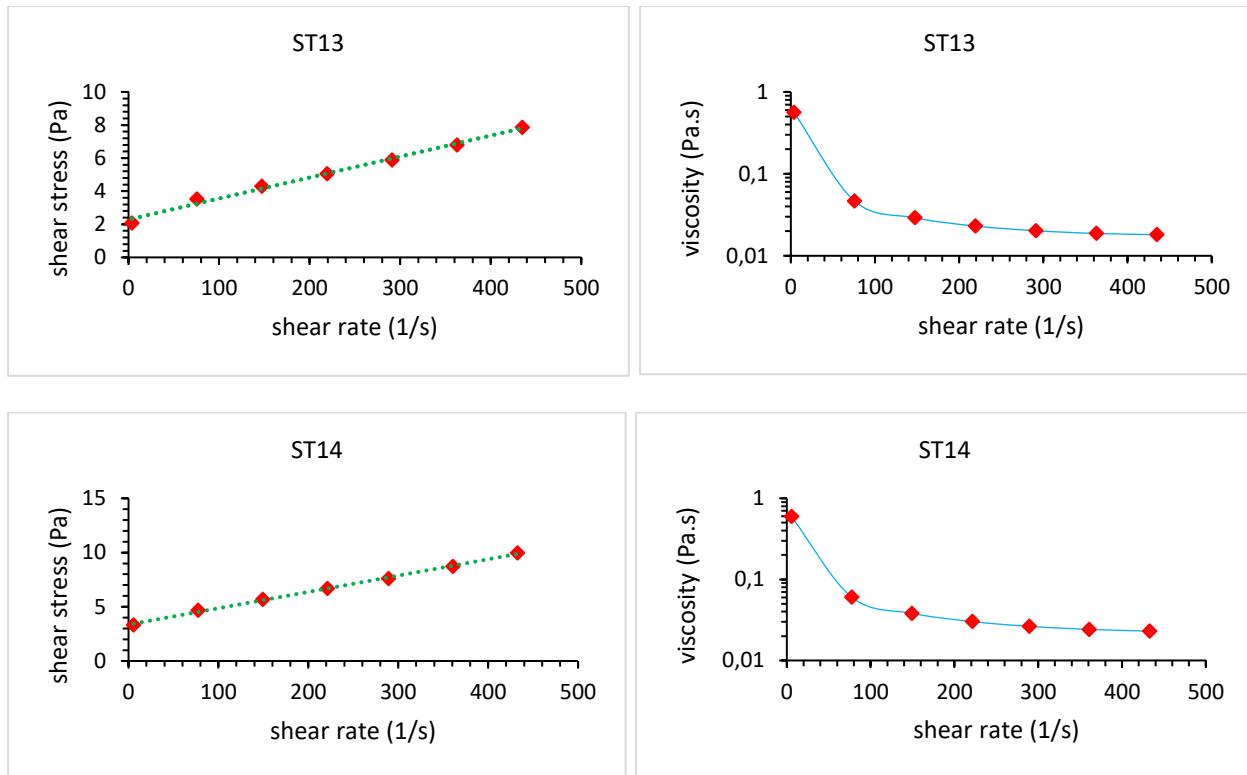
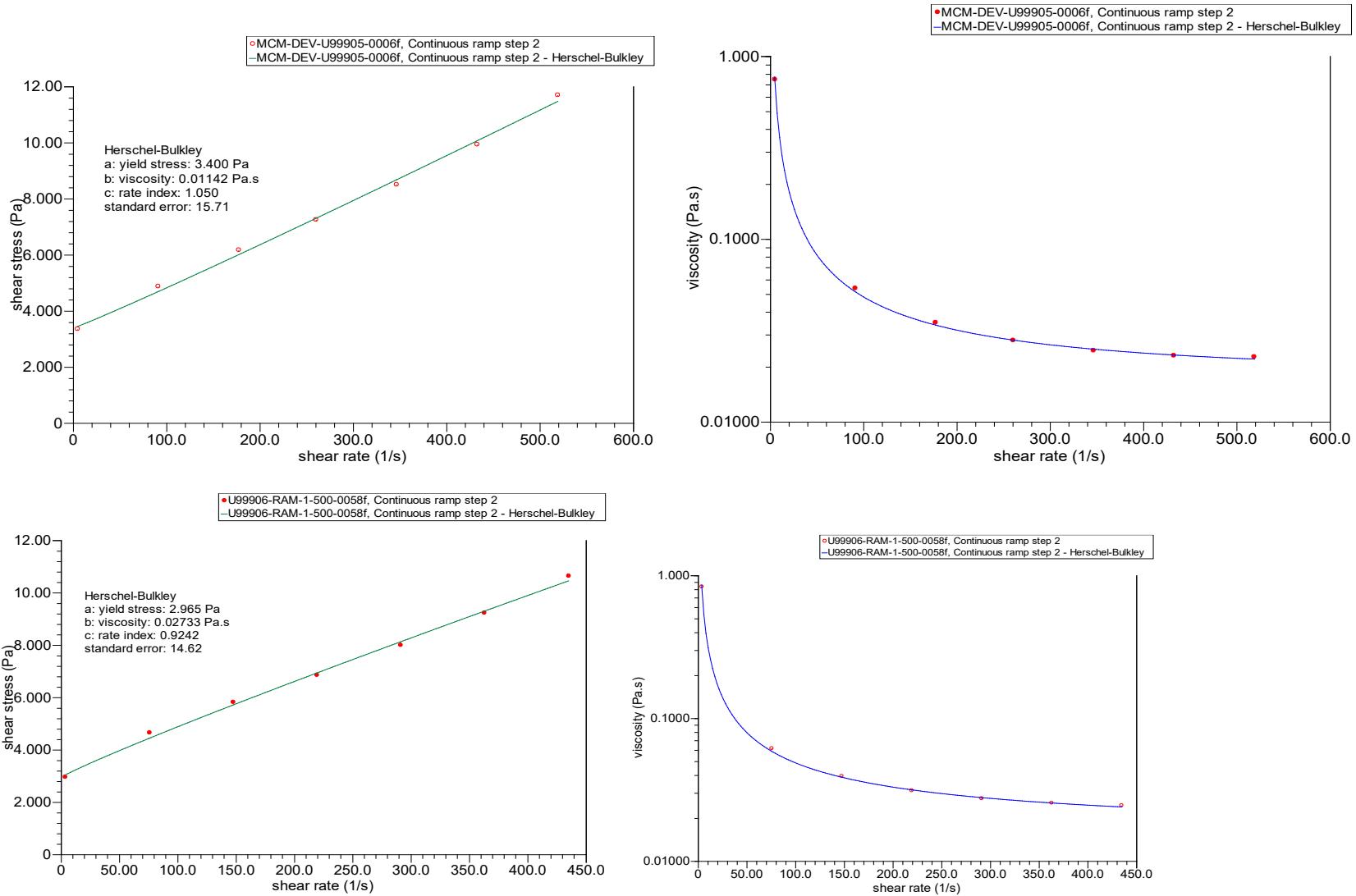
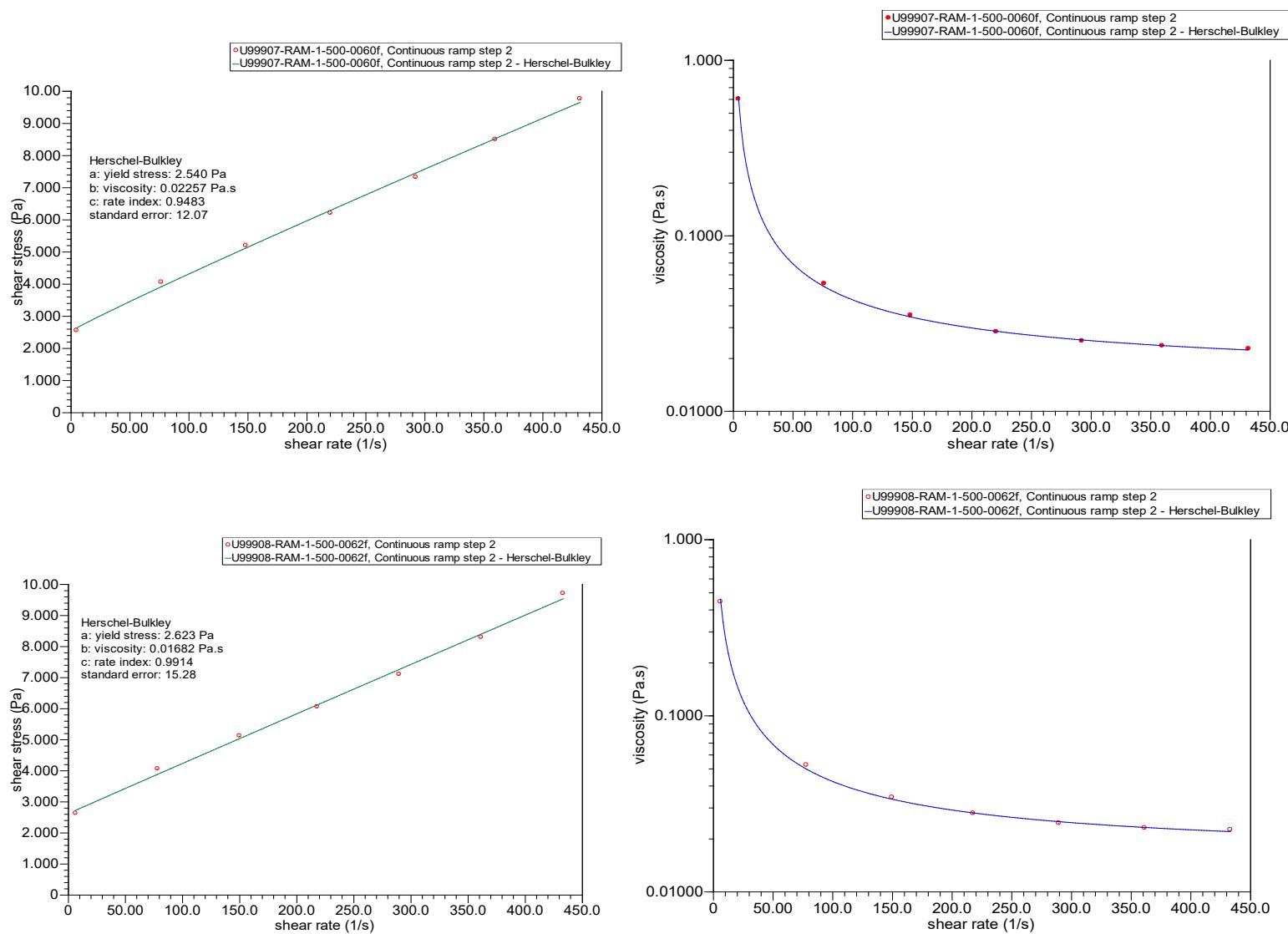
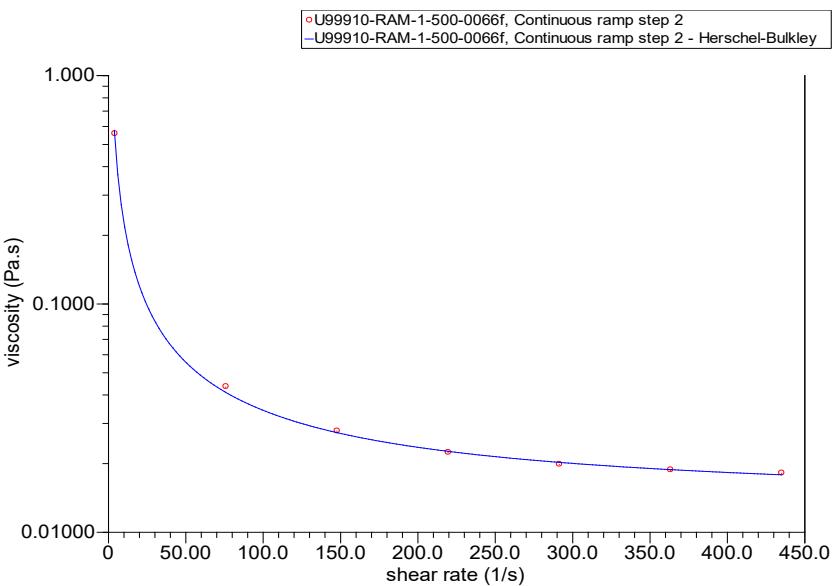
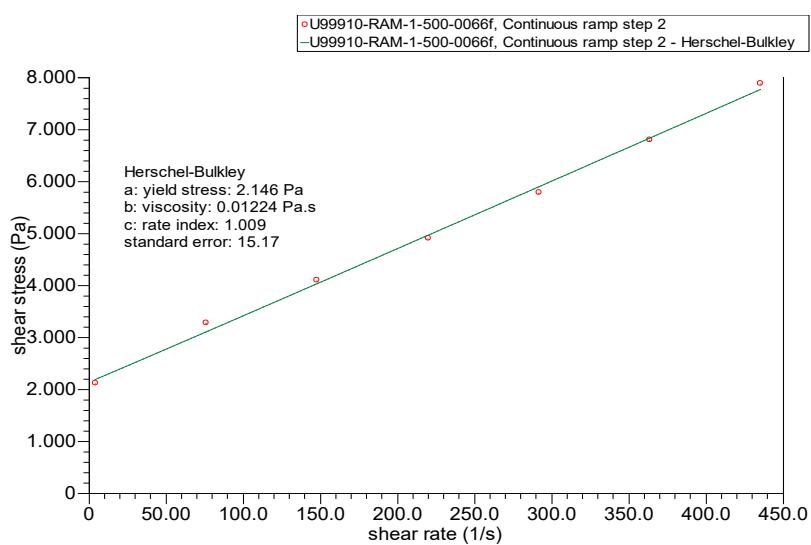
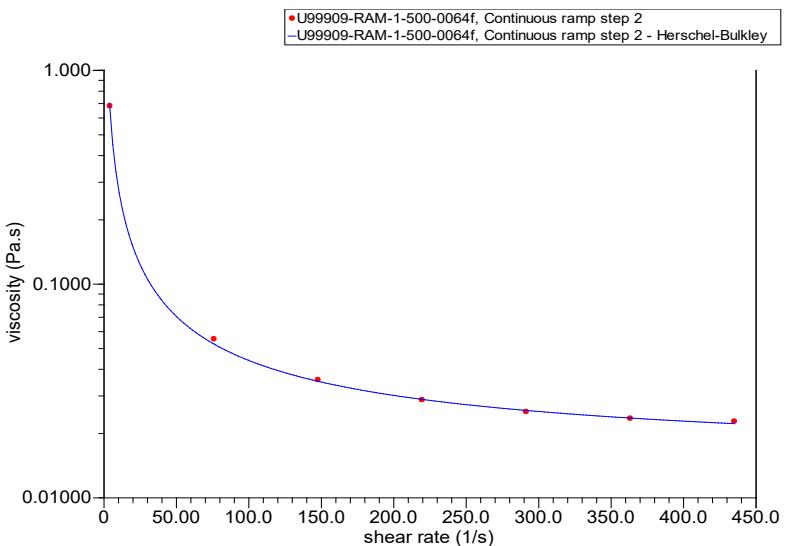
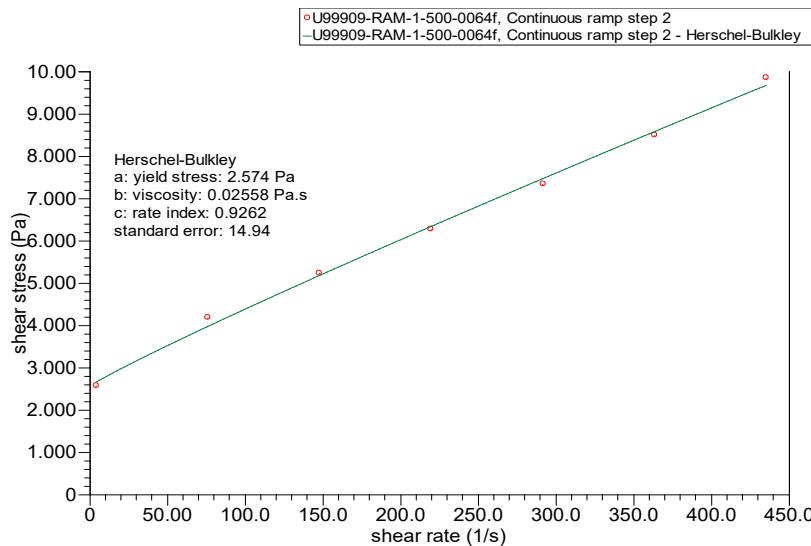
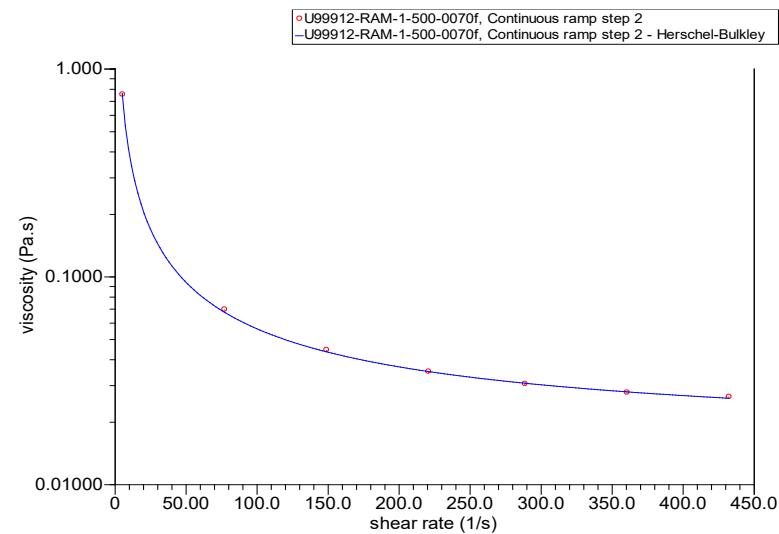
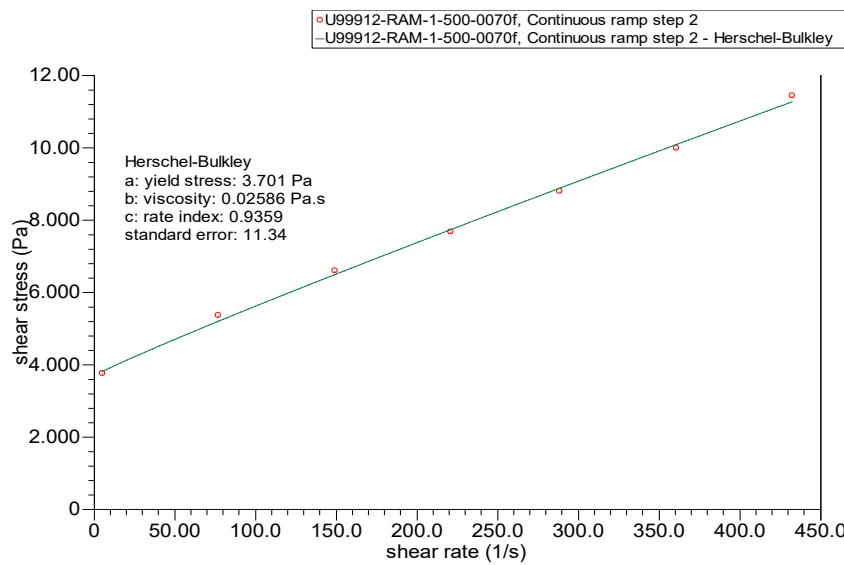
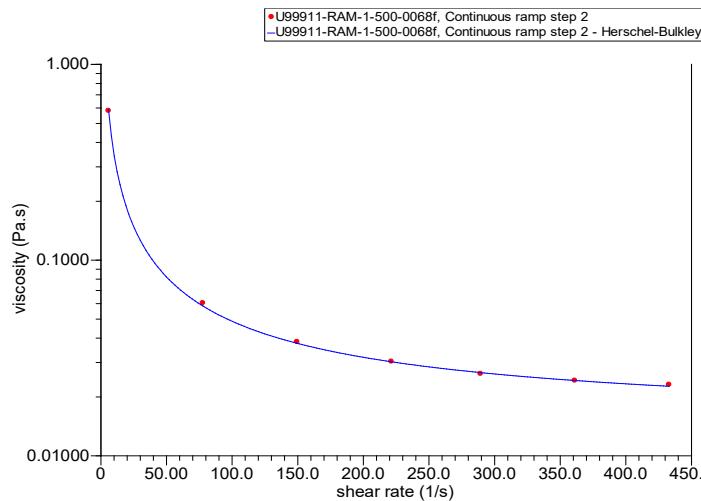
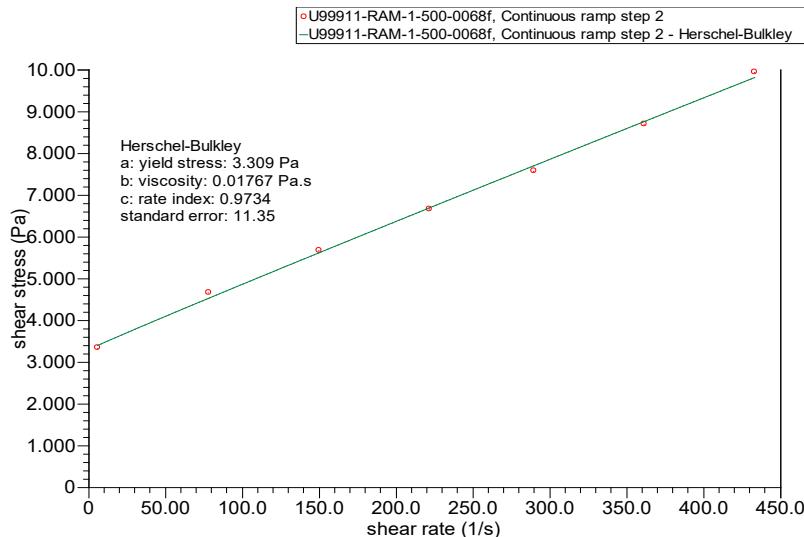


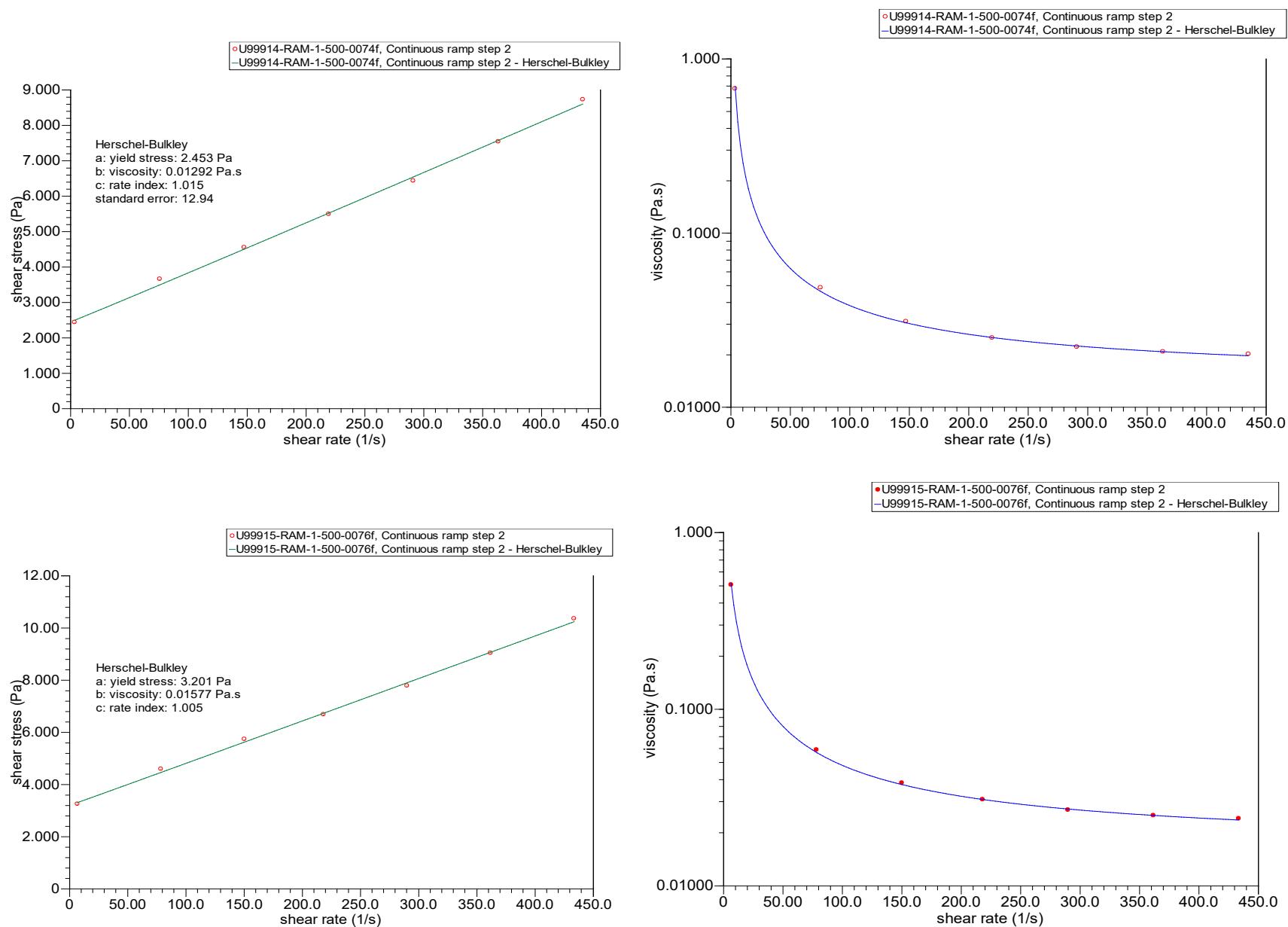
Figure C1 - Rhéogrammes des différents échantillons de résidus miniers de la MCM. a) Courbes d'écoulement, b) Courbes de viscosité

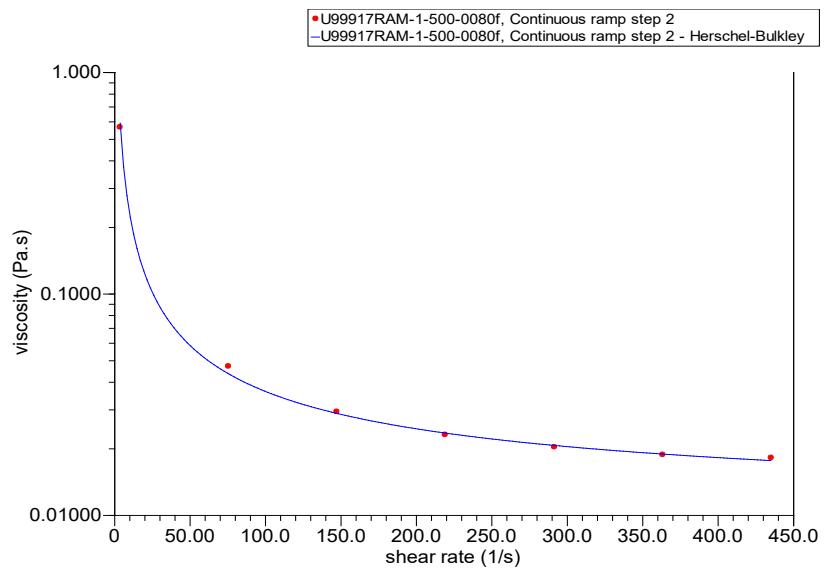
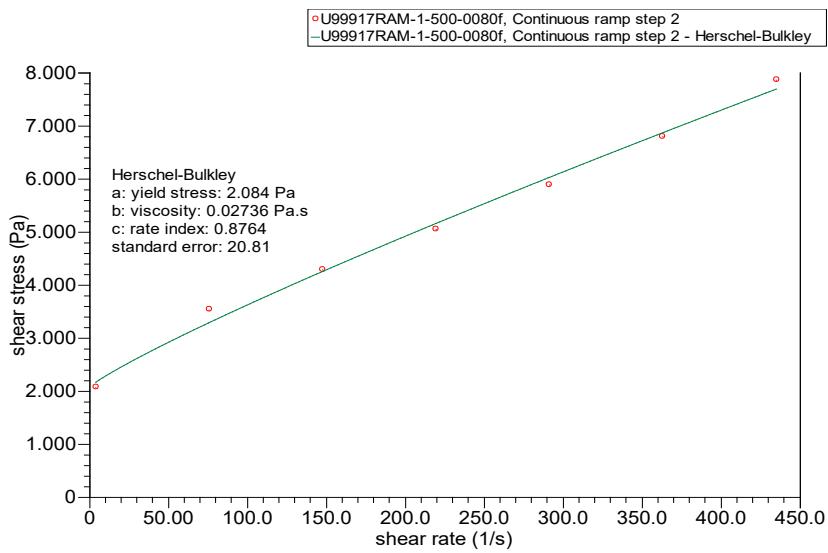
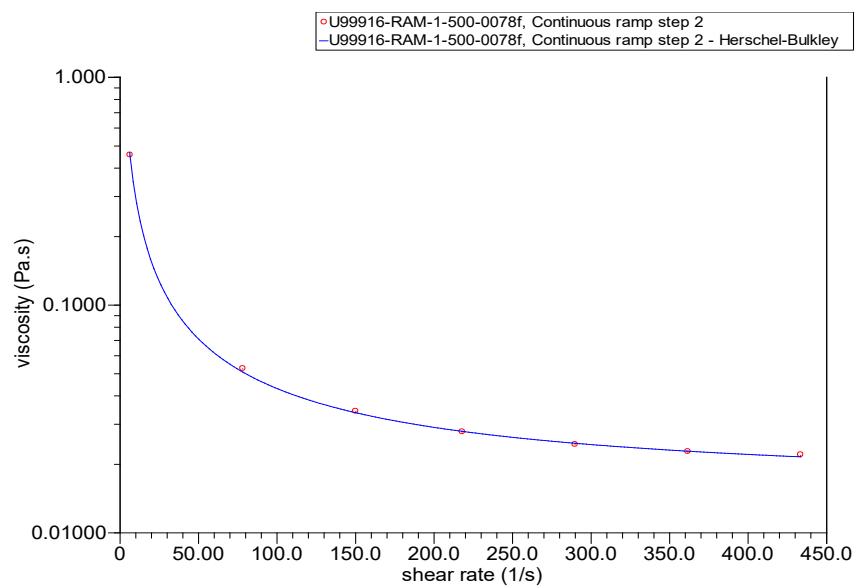
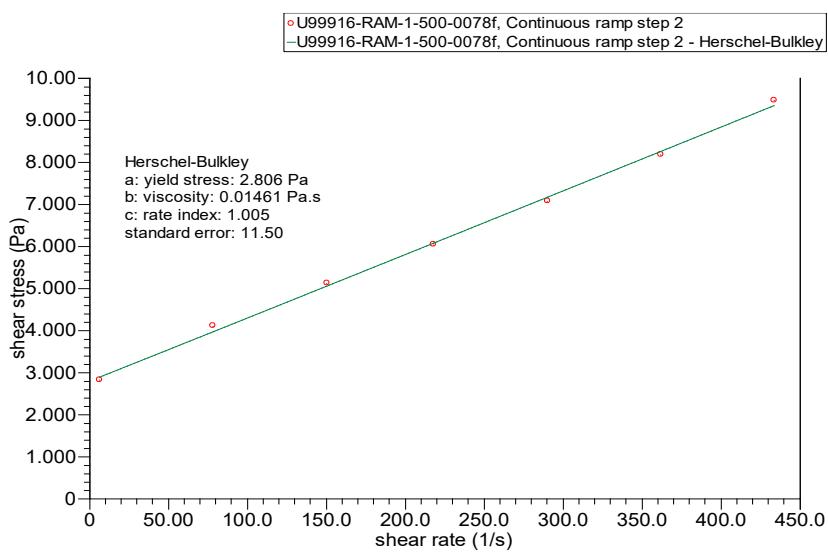


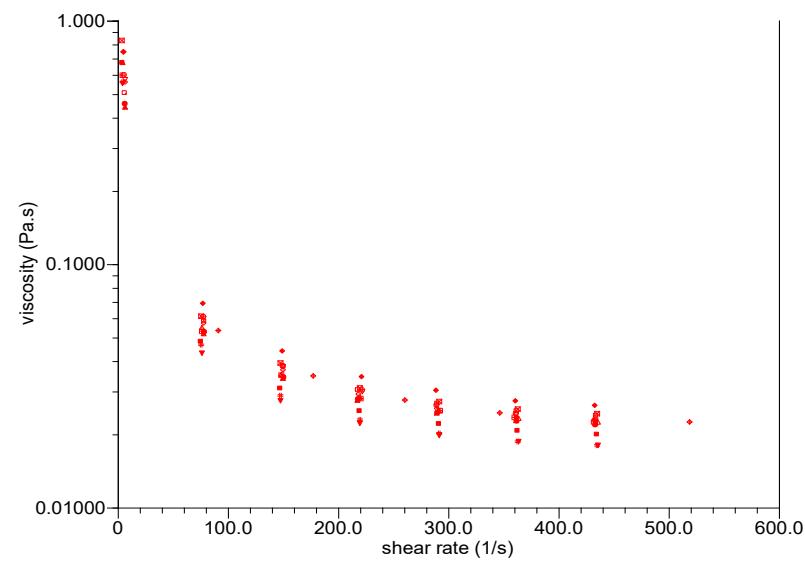
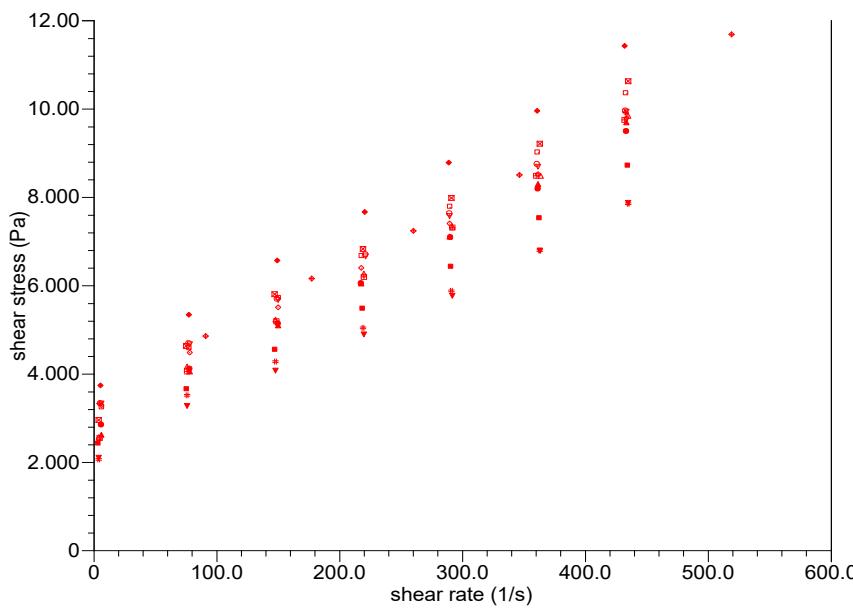
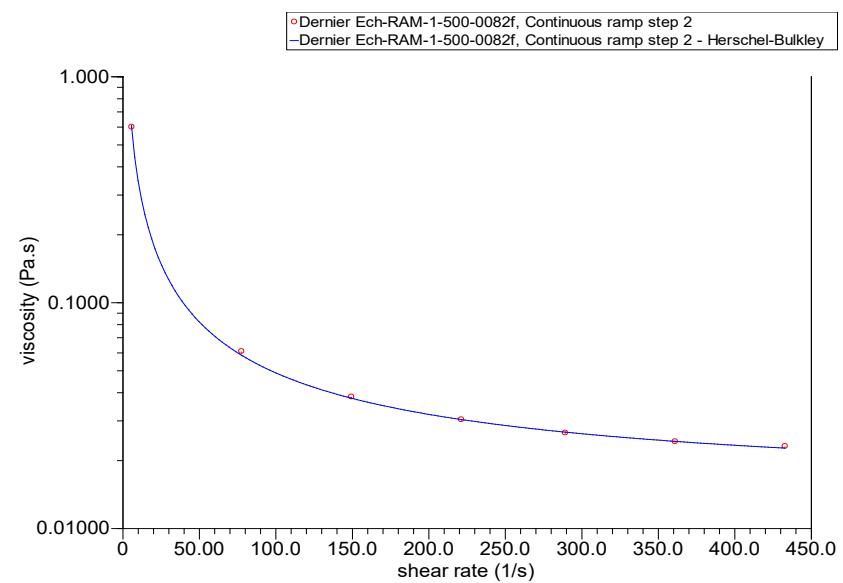
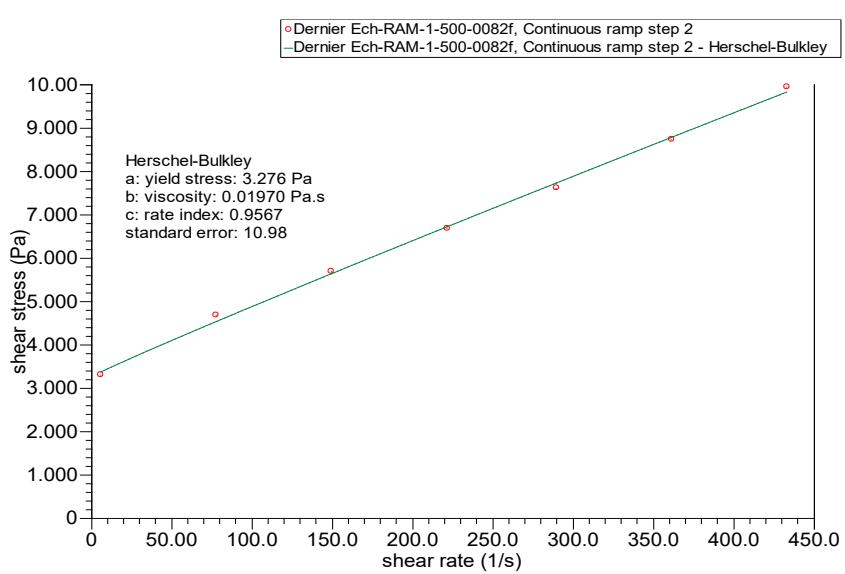


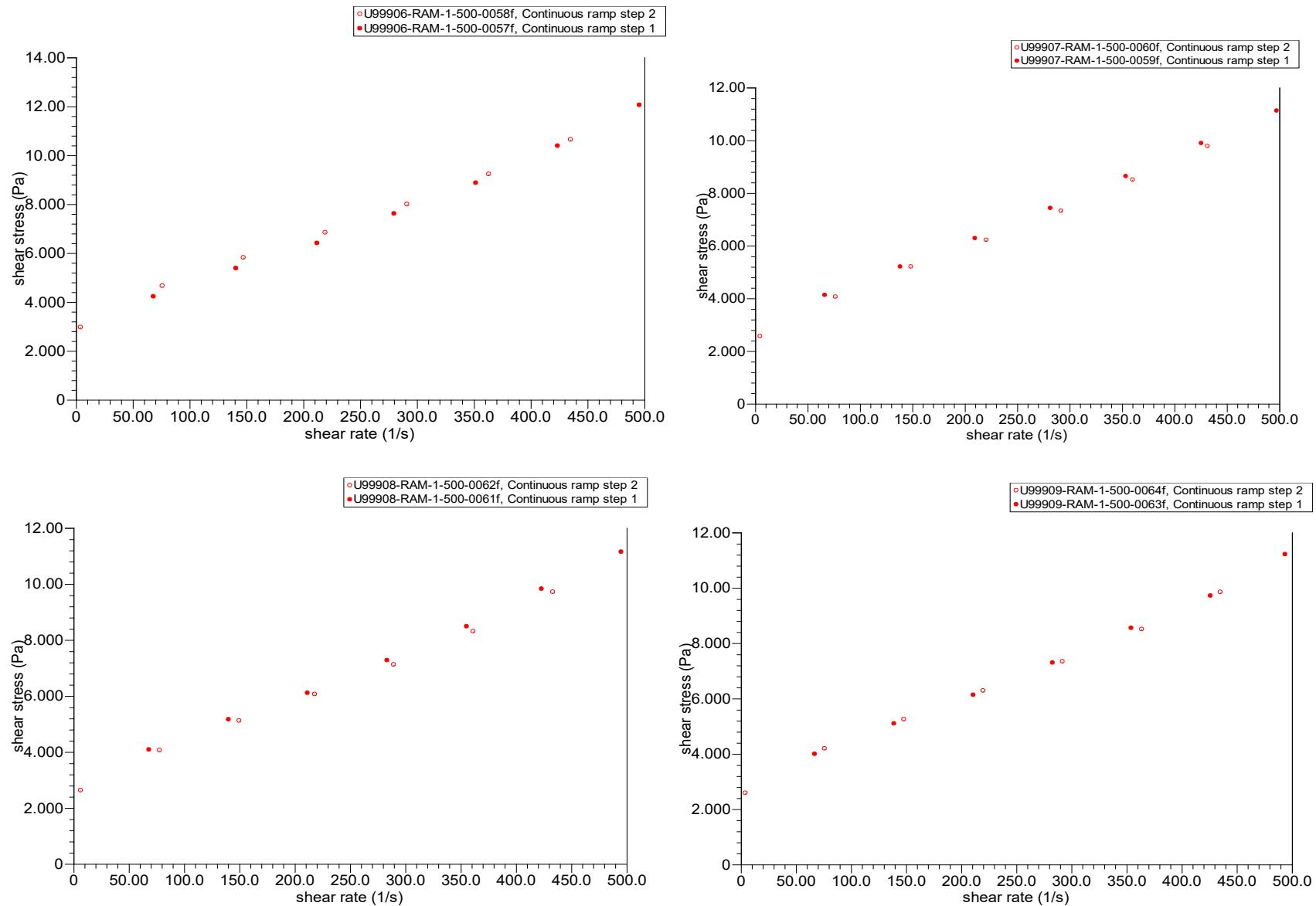


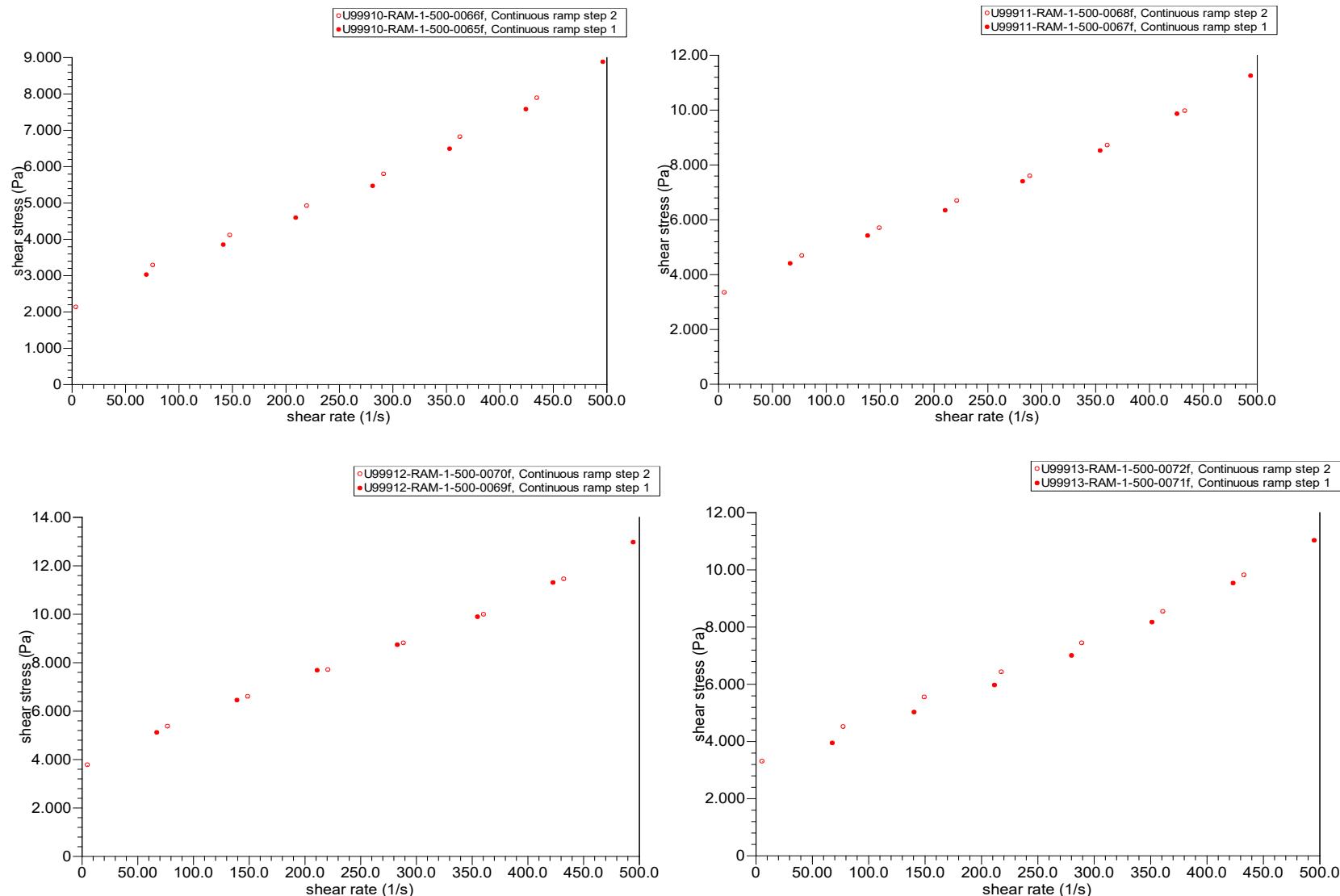


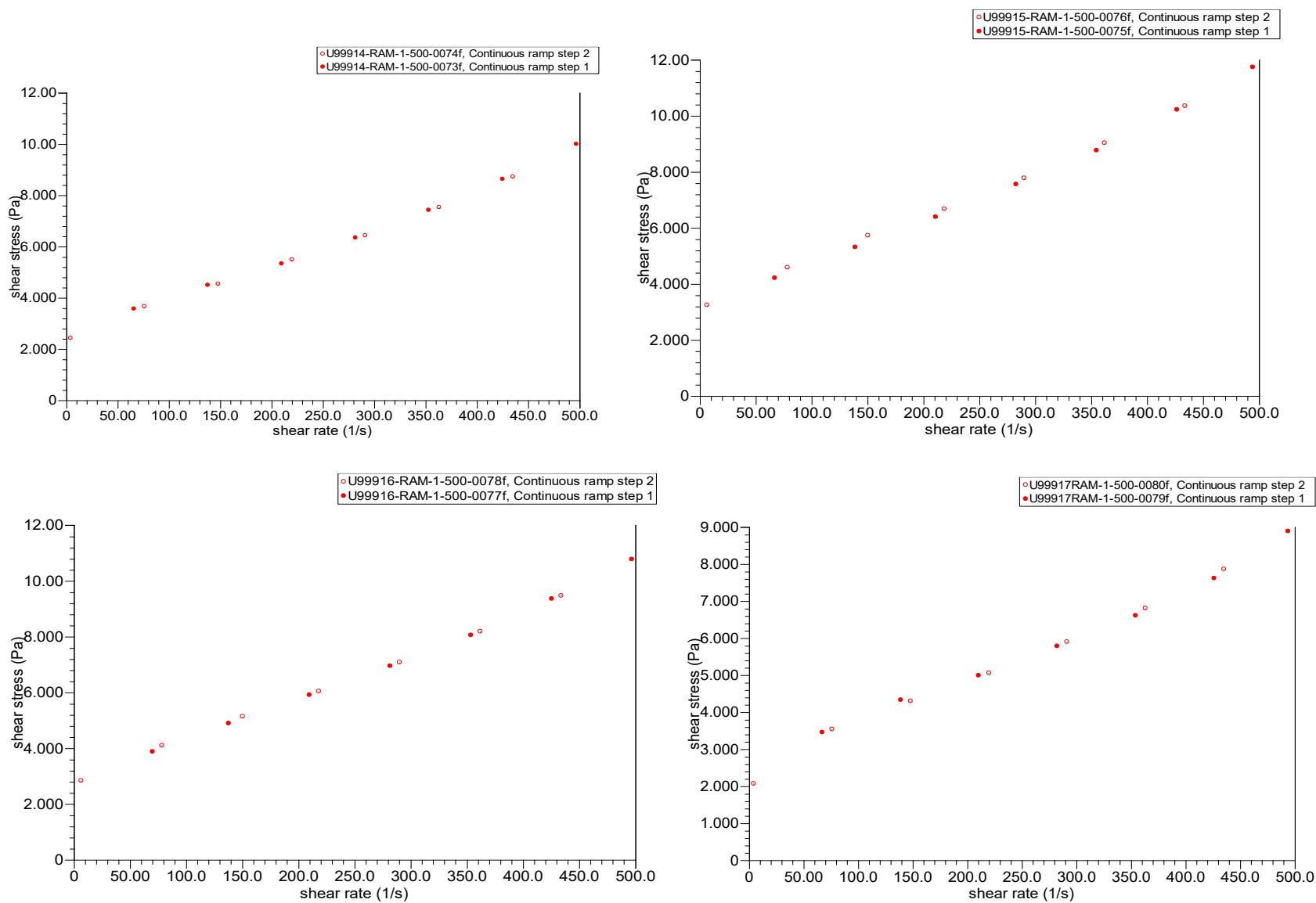


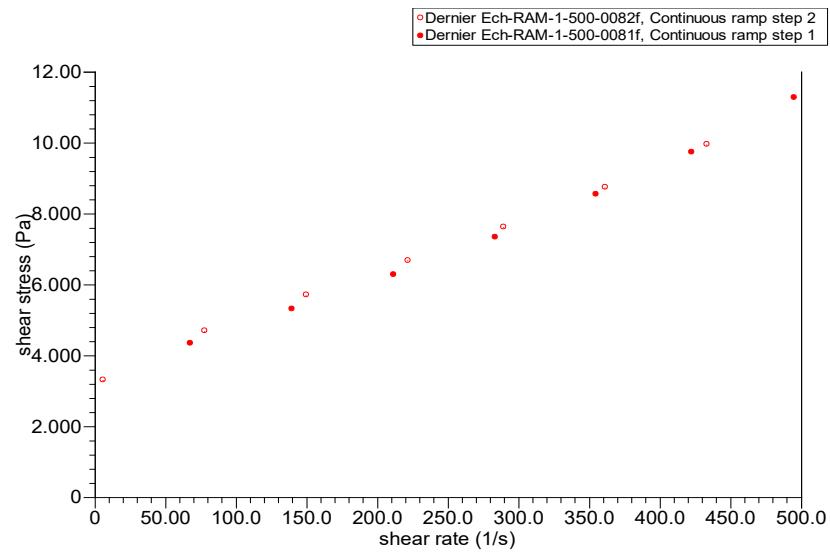












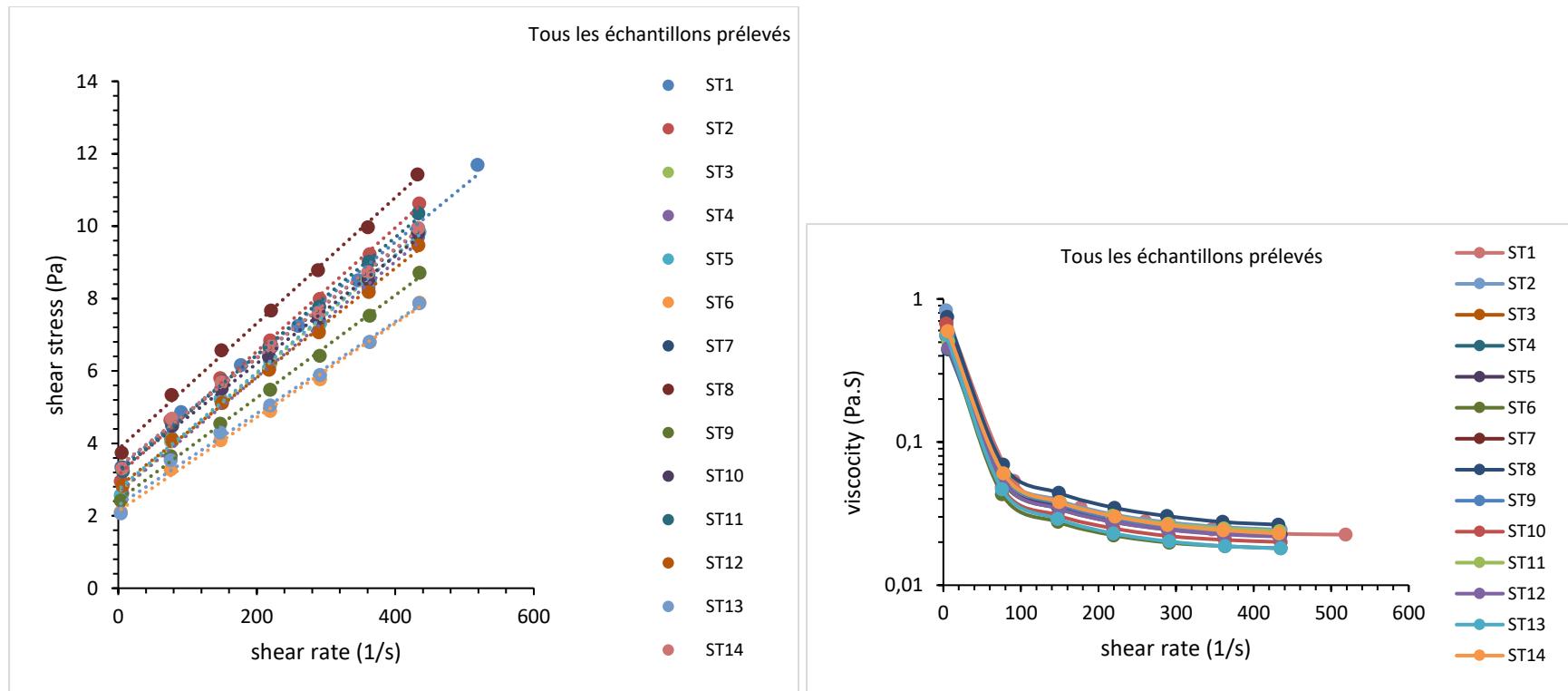


Tableau A. 5.1 Données des tests rhéologiques réalisés sur les différents échantillons.

Échantillon	shear rate (1/s)	shear stress (Pa)	viscosity (Pa.s)	time (s)	temperature (°C)	normal stress (Pa)
ST1	518,8	11,69	0,02253	12,9	21	0,4986
	432,6	9,924	0,02294	25,752	21	0,4984
	346,4	8,505	0,02456	38,588	21	0,5019
	260,1	7,244	0,02785	51,448	21	0,4982
	177	6,165	0,03483	64,308	21	0,4978
	90,73	4,862	0,05359	77,168	21	0,499
	4,472	3,34	0,7467	90,024	21	0,499
ST2	434,8	10,63	0,02445	8,6	21	0,5127
	362,9	9,22	0,02541	17,168	21	0,5161
	291,1	7,987	0,02744	25,752	21	0,5153
	219,2	6,843	0,03122	34,312	21	0,5157
	147,3	5,804	0,0394	42,884	21	0,5171
	75,43	4,638	0,06149	51,448	21	0,5154
	3,546	2,957	0,834	60,024	21	0,5183
ST3	431,5	9,763	0,02263	8,588	21	0,5161
	359,6	8,499	0,02363	17,22	21	0,515
	291,8	7,316	0,02508	25,732	21	0,5174
	219,9	6,203	0,02821	34,316	21	0,5136
	148,1	5,197	0,0351	42,888	21	0,5162
	76,15	4,053	0,05323	51,448	21	0,5143
	4,249	2,554	0,6011	60,036	21	0,516
ST4	433,1	9,695	0,02239	8,592	21	0,5153
	361,2	8,298	0,02298	17,192	21	0,5153
	289,3	7,107	0,02456	25,728	21	0,5152
	217,5	6,05	0,02782	34,312	21	0,5184
	149,6	5,11	0,03417	42,884	21	0,5169
	77,67	4,059	0,05226	51,448	21	0,5181
	5,91	2,621	0,4435	60,02	21	0,5178
ST5	435	9,841	0,02262	8,584	21	0,5166
	363,2	8,494	0,02339	17,164	21	0,5166
	291,3	7,334	0,02518	25,724	21	0,5162
	219,4	6,268	0,02857	34,332	21	0,5184
	147,7	5,234	0,03544	42,88	21	0,5189
	75,73	4,175	0,05513	51,484	21	0,5173
	3,788	2,569	0,6781	60,024	21	0,5199

Tableau A. 5.1 Données des tests rhéologiques réalisés sur les différents échantillons (suite).

Échantillon	shear rate (1/s)	shear stress (Pa)	viscosity (Pa.s)	time (s)	temperature (°C)	normal stress (Pa)
ST6	435	7,883	0,01812	8,596	21	0,4484
	363,1	6,795	0,01871	17,172	21	0,4477
	291,3	5,773	0,01982	25,736	21	0,4502
	219,5	4,897	0,02231	34,328	21	0,4513
	147,6	4,088	0,0277	42,896	21	0,4521
	75,71	3,273	0,04323	51,496	21	0,4513
	3,808	2,107	0,5533	60,036	21	0,451
ST7	432,9	9,941	0,02296	8,592	21	0,5224
	361,1	8,692	0,02407	17,204	21	0,5273
	289,2	7,574	0,02619	25,736	21	0,5263
	221,4	6,667	0,03011	34,312	21	0,5227
	149,5	5,671	0,03793	42,892	21	0,524
	77,66	4,664	0,06006	51,452	21	0,5261
	5,795	3,333	0,5753	60,06	21	0,5251
ST8	432,1	11,43	0,02645	8,596	21	0,565
	360,3	9,969	0,02766	17,172	21	0,5652
	288,5	8,782	0,03044	25,764	21	0,5661
	220,6	7,67	0,03476	34,316	21	0,565
	148,8	6,573	0,04418	42,896	21	0,5652
	76,9	5,338	0,06942	51,456	21	0,5669
	5,005	3,743	0,7479	60,032	21	0,5624
ST9	433,1	9,802	0,02263	8,592	21	0,5119
	361,2	8,526	0,0236	17,188	21	0,5117
	289,4	7,42	0,02564	25,736	21	0,5131
	217,5	6,398	0,02942	34,312	21	0,5131
	149,6	5,516	0,03686	42,888	21	0,5104
	77,73	4,486	0,05772	51,448	21	0,5151
	5,838	3,289	0,5634	60,028	21	0,5131
ST10	434,9	8,712	0,02003	8,576	21	0,5206
	363	7,522	0,02072	17,176	21	0,5194
	291,1	6,417	0,02204	25,72	21	0,5189
	219,3	5,479	0,02498	34,316	21	0,5186
	147,4	4,546	0,03084	42,86	21	0,5186
	75,53	3,644	0,04824	51,436	21	0,5222
	3,599	2,42	0,6725	60,016	21	0,5211

Tableau A. 5.1 Données des tests rhéologiques réalisés sur les différents échantillons (suite).

Échantillon	shear rate (1/s)	shear stress (Pa)	viscosity (Pa.s)	time (s)	temperature (°C)	normal stress (Pa)
ST11	433,5	10,35	0,02389	8,596	21	0,5193
	361,7	9,014	0,02492	17,164	21	0,5208
	289,9	7,775	0,02682	25,748	21	0,5196
	218,1	6,67	0,03059	34,304	21	0,5197
	150,2	5,717	0,03806	42,888	21	0,5178
	78,26	4,576	0,05847	51,444	21	0,5221
	6,397	3,231	0,505	60,024	21	0,5166
ST12	433,5	9,471	0,02185	8,592	21	0,5221
	361,6	8,179	0,02262	17,168	21	0,5184
	289,8	7,067	0,02439	25,728	21	0,5212
	217,8	6,036	0,02771	34,328	21	0,5214
	150	5,12	0,03413	42,884	21	0,5208
	78,05	4,099	0,05252	51,448	21	0,5233
	6,205	2,824	0,4552	60,024	21	0,5222
ST13	434,8	7,865	0,01809	8,588	21	0,4038
	363	6,8	0,01874	17,188	21	0,404
	291,2	5,89	0,02023	25,728	21	0,4063
	219,3	5,051	0,02304	34,352	21	0,405
	147,4	4,291	0,02911	42,888	21	0,404
	75,56	3,53	0,04672	51,448	21	0,4038
	3,673	2,068	0,5631	60,024	21	0,4037
St14	432,8	9,946	0,02298	8,624	21	0,5177
	360,8	8,73	0,02419	17,164	21	0,5175
	289,1	7,61	0,02632	25,752	21	0,5168
	221,2	6,68	0,0302	34,308	21	0,5147
	149,3	5,69	0,03812	42,884	21	0,5162
	77,47	4,678	0,06039	51,448	21	0,5174
	5,553	3,306	0,5953	60,028	21	0,5186