POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Évaluation de la ségrégation dans deux parcs à résidus inactifs situés en Abitibi

MARLÈNE DOLORES TEMGOUA

Département de Génie Civil, Géologique et des Mines

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

Génie minéral

Juillet 2021

© Marlène Dolores Temgoua, 2021.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

Évaluation de la ségrégation dans deux parcs à résidus inactifs situés en Abitibi

présenté par **Marlène Dolores TEMGOUA**

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

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

Carlos OVALLE, président
Mamert MBONIMPA, membre et directeur de recherche
Isabelle DEMERS, membre et codirectrice de recherche
Abdelkabir MAQSOUD, membre et codirecteur de recherche
Tikou BELEM, membre externe

DÉDICACE

À SUZANNE ET À ANATOLE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie les partenaires du projet de recherche pour leur financement à travers la subvention RDC de mes directeurs: CRSNG (conseil de recherches en sciences naturelles et en génie), mine Westwood (Corporation IAMGOLD), Mine Canadian Malartic, Mines Agnico Eagle Ltée. Ces partenaires miniers ont aussi donné l'accès aux sites d'étude.

J'adresse ma gratitude envers mon directeur de recherche, le professeur Mamert Mbonimpa. Sa disponibilité, son expertise et sa patience ont enrichi mes travaux de recherche et mon séjour au sein de l'UQAT. Je remercie aussi mes co-directeurs Isabelle Demers et Abdelkabir Maqsoud pour la supervision du projet.

Je remercie aussi les membres du jury pour la lecture et les remarques portées sur ce mémoire.

Ensuite, je remercie l'équipe pédagogique de l'UQAT pour leur amabilité, leur disponibilité et la fourniture des ateliers et outils accompagnant la recherche. Je remercie particulièrement les professeurs pour la clarté dans la dispensation des enseignements donnés lors des sessions d'hiver et automne 2019.

Puis, je suis reconnaissante à l'ensemble de l'équipe URSTM, spécialement Sylvette Akué Awoh, Yvan Poirier, Patrick Bernèche, Pierre-Alain Jacques, Joël Beauregard pour leur investissement physique, logistique et technique durant les phases de terrain et de laboratoire.

Par la suite, je remercie l'étudiant en doctorat, Faneva Rarison, de m'avoir aidé à analyser statistiquement plusieurs de mes résultats.

Enfin, je remercie les étudiants Zahra Driouky, Jules Darankoum, Achraf Janah pour leur aide incommensurable au laboratoire.

RÉSUMÉ

Le dépôt hydraulique des rejets (avec un pourcentage massique solide ≤ 45 %) dans les parcs à résidus peut être accompagné de la ségrégation qui est la différenciation granulométrique, chimique, minéralogique et hydrogéotechnique observée le long du parc de la digue de dépôt jusqu'à l'étang d'eau. Ainsi, la ségrégation peut affecter la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée (NPS) avec une monocouche de protection en favorisant, par exemple, la baisse du degré de saturation dans les résidus plus grossiers de la zone proche du point de dépôt. La variation des paramètres physiques, chimiques, minéralogiques et hydrogéotechniques devrait être considérée dans la conception de la technique de la nappe phréatique surélevée avec une monocouche de protection.

L'objectif du projet de recherche est d'évaluer l'ampleur de la ségrégation dans les parcs à résidus miniers non actifs en déterminant la distribution spatiale des paramètres physiques, chimiques, minéralogiques et hydrogéotechniques des résidus échantillonnés au niveau de 12 stations reparties en 3 rangées sur le parc 3 Est Doyon/Westwood et sur le parc 3 du site Manitou /Goldex. Les rangées sont désignées R1, R2, R3. Les stations sur chaque rangée sont S1, S2, S3, S4 sachant que S1 est la plus proche de la digue et S4 la plus éloignée. Au niveau des zones étudiées sur les deux sites, ces propriétés ne sont pas distinctivement distribuées en réponse à la ségrégation comme décrit théoriquement dans la littérature et comme escompté.

Sur le parc 3 Est Doyon, une stratification de résidus de couleur différente a été observée. Chaque échantillon de résidus a été repéré par sa position par rapport à la surface du parc. Les analyses physiques ont été effectuées sur 121 échantillons. Les résidus de la zone d'échantillonnage sont fins. En effet, le pourcentage de fines (P_{80}) est globalement supérieur à 50 % à l'exception de 11 échantillons prélevés à une profondeur comprise entre 100 et 125 cm sur différentes rangées pour lesquels P_{80} varie entre 26 et 48 %. La granulométrie, la densité relative des grains solides (G_s) et le pourcentage de minéraux lourds (pyrite, rutile) diminuent en s'éloignant de la digue 1 du parc 3 Est, tant en surface qu'en profondeur seulement pour les résidus d'une des trois rangées, la rangée R2 (la distribution est aléatoire pour les rangées R1 et R3). P_{80} variait, par exemple, pour la rangée R2 entre 28 et 80 % pour la station S1 et entre 47 et 100 % pour la station S4 situé à 67 m de S1. Le diamètre médian (D_{50}) variait respectivement entre 29 µm et 155,2 µm et entre 12 µm et 85 µm pour ces mêmes stations. Sur une distance de 179 m qui sépare les stations S1 des rangées R2 et

R3, P_{80} varie entre 28 et 80 % pour la station S1 de la rangée R2 et entre 38 et 93 % pour la station S1 de la rangée R3. Le pourcentage de diminution du rutile et de la pyrite sur une distance de 67 m, de la station S1 à S4 de la rangée R2, était respectivement de 38 % et 23 % à une profondeur de 50 cm et 33 % et 37 % à 125 cm de profondeur. La conductivité hydraulique (k_{sat}) est plus élevée à la station S1 ($k_{sat} = 8{,}1\times10^{-5}$ cm/s) et diminue progressivement vers la station S4 ($k_{sat} = 2{,}03\times10^{-5}$ cm/s) de la rangée R2. Les valeurs mesurées de k_{sat} sont $8{,}1\times10^{-5}$ cm/s, $5{,}2\times10^{-5}$ cm/s; $2{,}6\times10^{-5}$ cm/s; $2{,}03\times10^{-5}$ cm/s respectivement pour les stations R2S1, R2S2, R2S3, R2S4. Ces valeurs sont néanmoins du même ordre de grandeur parce que les résidus appartiennent à la même classe granulométrique. Les pressions d'entrée d'air (ψ_a) obtenues successivement sur les stations S1, S2, S3 et S4 de la rangée R2 sont respectivement de 14 kPa, 19 kPa, 22 kPa et 23 kPa pour les échantillons de surface. Généralement, ψ_a de la station S1 est inférieur à celui de la station S4.

Sur le parc 3 du site Manitou/Goldex, la monocouche faite de résidus Goldex était homogène sur 125 cm de profondeur. Les caractérisations physiques ont été effectuées sur 126 échantillons. Aucune différence significative n'a été observée après comparaison des valeurs de P_{80} et G_s. Globalement pour tous les échantillons, G_s varie entre 2,73 et 2,93. En effet, le pourcentage de fines (P_{80}) global est supérieur à 50 %. La distribution de la granulométrie sur le parc était aléatoire. P_{80} variait entre 30 et 92 % pour la station S1 et entre 45 et 100 % pour la station S4 de la rangée R2. D_{50} est compris entre 15 µm et 61 µm et entre 13 µm et 93 µm pour ces mêmes stations. Ces stations S1 et S4 sont éloignées de 117 m. Sur une distance de 529 m qui sépare les rangées R1 et R3, P_{80} variait entre 50 et 81 % et D_{50} varie entre 30 µm et 104 µm au niveau de la station S1 à 60 cm de profondeur.

Les résidus les plus grossiers et les plus lourds se sont déposés au niveau des stations proches de la digue 1 sur le parc 3 Est Doyon/Westwood. Les variations observées sur le parc 3 Manitou/Goldex étaient aléatoires si bien qu'une tendance claire n'a pas pu être déterminée. Pour les sites considérés, les distributions transversale et longitudinale des paramètres étudiés auraient pu être précisées davantage si la séquence de dépôt des résidus miniers et les chemins d'écoulement étaient connus.

Mots clés : ségrégation, tendance, diamètre médian, pourcentage de fines, minéraux lourds, conductivité hydraulique saturée, pression d'entrée d'air

ABSTRACT

Hydraulic deposition of tailings (with a pulp density < 45 %) in tailings storage facilities (TSF) can be accompanied by the segregation, which is the particle size, chemical, mineralogical and hydrogeotechnical differentiation observed along the TSF from the deposition dike to the water pond. Thus, segregation may affect the performance of the elevated water table (EWT) technique coupled with a protective monolayer cover by promoting, for example, lower saturation levels in the coarser tailings in the area near the deposition point. Variation in physical, chemical, mineralogical, and hydrogeotechnical parameters should be considered in the design of the EWT technique with a protective monolayer cover if the underlying tailings and the cover tailings have been deposited hydraulically.

This paper aims to evaluate the extent of segregation in non-active TSF by assessing the spatial distribution of physical, chemical, mineralogical, and hydrogeotechnical characteristics of the tailings sampled at 12 stations grouped in 3 rows at the Doyon/Westwood TSF 3 East and the Manitou/Goldex TSF 3 site. The rows were named R1, R2, R3. The stations on a row are S1, S2, S3, S4. S1 is the nearest station to the dike of the TSF and S4 is the farthest one. Over the study areas at both sites, these properties are not distinctively distributed in response to segregation as described theoretically in the literature and as expected.

At Doyon TSF 3 East, a layering (by color) of different types of tailings was observed. Each tailings sample was identified by its position to the surface of the TSF. Physical testing was performed on 121 samples. No significant differences were observed after comparing the results from one station (or one row) to the next. The tailings from the sampling area are fine. Indeed, the percentage of fines (P_{80}) is globally higher than 50% except for 11 samples (located on stations R2S1, R3S1, R1S2, R2S3, R2S4 at 100 to 125 cm depth) for which P_{80} varies between 26 and 48%. Nevertheless, the particle size, the specific gravity and the percentage of heavy minerals (pyrite, rutile) decrease away from dike 1, both at the surface and at depth for the tailings in row 2. P_{80} ranged, for instance, in row 2 (R2) from 28 to 80 % for station S1 and from 47 to 100 % for station S4. The median diameter (D_{50}) ranged from 29 µm to 155.2 µm and from 12 µm to 85 µm for the stations previously cited. Over 179 m, P_{80} varied between 28 and 80% for station R2S1 and between 38 and 93% for station R3S1. D_{50} is between 29 µm and 155.2 µm and between 16 µm and 106.5 µm for these same locations. The mass percentage of rutile and pyrite decreases respectively by 38% and 23%

from station R2S1 to R2S4 at 50 cm depth and by 33 % and 37 % at 125 cm depth. R2S1 and R2S4 are spaced of 67 m. Saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) is highest at station R2S1 and gradually decreases towards station R2S4. K_{sat} is highest at R2S1 and gradually decreases toward R2S4. The measured k_{sat} are 8.1×10^{-5} cm/s, 5.2×10^{-5} cm/s; 2.6×10^{-5} cm/s; 2.03×10^{-5} cm/s respectively for stations R2S1, R2S2, R2S3, R2S4. The results are in the same order of magnitude because the tailings belong to the same particle size class. The predicted air entry values (ψa) obtained at R2S1, R2S2, R2S3 and R2S4 are successively 14 kpa, 19 kpa, 21 kpa, 23 kpa for samples located at the surface of the TSF. Generally, there is a decreasing tendency from S1 to S4.

At Manitou TSF 3, the Goldex single-layer cover was homogeneous over a depth of 125 cm. Physical analyses were conducted on 126 samples. No significant differences were observed after comparing the results of the analyses. G_S varies between 2.73 and 2.93 and the tailings in the sampling area are fine. Indeed, P_{80} is greater than 50%. The distribution of particle size across the TSF was random. P_{80} varied between 30 and 92% for R2S1 and between 45 and 100% for R2S4. D_{50} ranged from 15 µm to 61 µm and from 13 µm to 93 µm for these same stations. R2S1 and R2S4 are 117 m apart. Over 529 m, P_{80} was found between 50 and 81% and D_{50} between 30 µm and 104 µm from station R1S1 to R3S1 at 60 cm depth.

The coarsest and heaviest tailings were deposited at stations near Dike 1 on Doyon TSF 3 East. The variations observed at TSF 3 Manitou were random so that a clear tendency could not be determined. For the sites considered, the interaction of particle size parameters with hydrogeotechnical properties and the influence of depth on physical quantities could have been further clarified if the tailings deposition sequence and flow channels could be known.

Keywords: segregation, tendency, median diameter, percentage of fines, heavy minerals, saturated hydraulic conductivity, air entry pressure

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XIII

LISTE DES FIGURES XIV

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXII

LISTE DES ANNEXES XXIV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1 Contexte de l'étude 1

2 Problématique 4

3 Hypothèses de recherche 5

4 Objectifs du projet de recherche 5

5 Structure du mémoire 6

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 7

2.1 Caractéristiques des résidus en pulpe 7

2.1.1 Propriétés physiques 7

2.1.2 Propriétés rhéologiques 9

2.2 Dépôt hydraulique des résidus miniers en pulpe 11

2.2.1 Transport des résidus miniers en pulpe 11

2.2.2 Méthodes de dépôt hydraulique des résidus 11

2.2.3 Construction des digues de confinement des parcs à résidus miniers 13

2.3 Ségrégation 14

2.3.1 Sédimentation 14

2.3.2 Ségrégation transversale 17

2.3.3 Pente de dépôt 20

2.3.4 Impact de la ségrégation verticale sur les propriétés physiques 23

2.3.5 Impact de la ségrégation transversale sur les propriétés physiques 25

2.3.6 Impact de la ségrégation transversale sur la conductivité hydraulique saturée 28

2.3.7 Impact de la ségrégation sur la technique de la nappe phréatique surélevée avec monocouche 30

2.4 Préparation des résidus miniers non ségrégant 31

2.4.1 Ajout des floculants et coagulants 31

2.4.2 Densification des résidus 32

2.5 Récapitulatif et justification de l'étude 33

CHAPITRE 3 MATÉRIELS ET MÉTHODES 34

3.1 Sites d'étude 34

3.1.1 Site Manitou/Goldex 34

3.1.2 Site Doyon/Westwood 35

3.2 Échantillonnage des résidus 37

3.2.1 Méthodologie 37

3.2.2 Stations d'échantillonnage sur le parc 3 du site Manitou/Goldex 39

3.2.3 Stations d'échantillonnage sur le parc 3 Est du site Doyon/Westwood 40

3.3 Préparation des résidus en laboratoire 42

3.3.1 Conditionnement des résidus 42

3.3.2 Observation des couches de résidus 42

3.3.3 Préparation des échantillons 44

3.4 Caractérisations physiques 47

3.4.1 Analyse granulométrique 47

3.4.2 Densité relative des grains 50

3.5 Caractérisations chimiques et minéralogiques 51

3.5.1 Caractérisation chimique par ICP-AES 51

3.5.2 Caractérisation minéralogique par DRX 51

3.6 Caractérisations hydrogéotechniques 52

3.6.1 Détermination et prédiction de la conductivité hydraulique saturée 52

3.6.2 Détermination et prédiction de la courbe de rétention d'eau 54

3.7 Analyse de la distribution des paramètres 58

CHAPITRE 4 RÉSULTATS 60

4.1 Parc 3 Est du site Doyon/Westwood 60

4.1.1 Distribution minéralogique des résidus 60

4.1.2 Distribution des éléments chimiques 64

4.1.3 Densité relative des grains solides G_s 66

4.1.4 Distributions granulométriques 70

4.2 Parc 3 du site Manitou/Goldex 81

4.2.1 Distribution transversale des minéraux 81

4.2.2 Densité relative des grains solides G_s 82

4.2.3 Distributions granulométriques 84

CHAPITRE 5 DISCUSSION 96

5.1 Distribution transversale des propriétés géotechniques 96

5.2 Distribution des minéraux et lien avec la densité des grains solides (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 98

5.3 Distribution longitudinale des paramètres physiques (Parc 3 Est Doyon/Westwood). 100

5.4 Distribution longitudinale des paramètres physiques (Parc 3 Manitou/Goldex) 105

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 111

6.1 Conclusion.....111

6.2 Recommandations 112

RÉFÉRENCES..... 113

ANNEXES 122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques des résidus épaissis (Aubertin et al., 2002; *Cooke, 2006) 32

Tableau 3.1 Quelques caractéristiques chimiques des résidus Doyon à la sortie de l'usine de concentration (Demers et al., 2008) 37

Tableau 3.2 Nombre d'échantillons collectés pour chaque station sur les sites d'étude 44

Tableau 3.3 Étiquettes apposées sur les échantillons de résidus Goldex en fonction de la profondeur par rapport à la surface du parc 3 Manitou.....45

Tableau 3.4 Étiquettes apposées sur les échantillons de résidus Doyon en fonction de la profondeur par rapport à la surface du parc 3 Est du site Doyon/Westwood 46

Tableau 4.1 Paramètres des courbes granulométriques enveloppes de chaque rangée (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 72

Tableau 4.2 Paramètres des courbes granulométriques enveloppes de chaque station (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 73

Tableau 4.3 Paramètres des courbes granulométriques enveloppes de chaque rangée (Parc 3 Manitou/Goldex) 85

Tableau 4.4 Paramètres granulométriques des courbes enveloppes de chaque station (Parc 3 Manitou/Goldex) 87

Tableau 5.1 Conductivités hydrauliques saturées mesurées et prédite pour les résidus de la rangée R2 du parc 3 Est Doyon 96

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma conceptuel de la technique de la NPS avec monocouche (adaptée de Aubertin et al., 1999 et Ouangrawa et al., 2010).....3

Figure 2.1 Aspect des résidus en pulpe (Bussière, 2007).....8

Figure 2.2 Courbes granulométriques des échantillons de résidus sur un parc à résidus d'une mine québécoise (Bussière, 2007).....9

Figure 2.3 Principaux types de rhéogrammes des fluides non-newtoniens : a) $\tau = f(\gamma)$ avec ou sans seuil de cisaillement τ_0 (adapté de Ferraris, 1999), b) $\eta = f(\gamma)$ (adapté de Marchesse, 2019) 10

Figure 2.4 Méthodes de dépôt par : a) lances à robinet (Vick, 1984); b) dépôt ponctuelle (Vick, 1984); c) hydrocyclone (https://www.goldfields.com/deposition-techniques.php).....12

Figure 2.5 Écoulement à la sortie du tuyau au point de dépôt (Blight, 2010).....17

Figure 2.6 Trajectoire des résidus lors du dépôt hydraulique (Conlin, 1989).....18

Figure 2.7 Analogie entre le mode de formation de : a) delta en environnement marin et b) plage et étang d'eau dans un parc à résidus miniers (Conlin, 1989) 19

Figure 2.8 Chenaux méandriformes dans un parc à résidus : a) méandres et b) vagues stationnaires dans un méandre (Blight, 2010). 20

Figure 2.9 Profil concave de la pente de la plage (adapté de Melent'ev et al., 1973).....21

Figure 2.10 Profils de la pente en fonction du pourcentage solide massique lors d'un flume test (Küpper, 1991) 21

Figure 2.11 Variation de la pente de la plage de résidus ségrégant et non-ségrégant (Robinsky, 1978).....22

Figure 2.12 Profils verticaux de la teneur en sable SC à différentes périodes lors d'essais de sédimentation en colonnes de pulpes de sable, kaolinite et silt à différentes valeurs de FWR (%), SFR et C_w: a) FWR = 10, SFR = 1, C_w = 18,8 %; b) FWR = 10, SFR = 4, C_w = 35,7 %, c) FWR = 40, SFR = 1, C_w = 57,1 %, d) FWR = 15, SFR = 1, C_w = 26,1 % et e) FWR = 15, SFR = 4, C_w = 46,9 (Mihiretu, 2009).....24

Figure 2.13 Profils de SC en fonction du pourcentage d'argile et de silt dans des suspensions avec C_w = 33,3% après 15 min de sédimentation (Mihiretu, 2009) 25

Figure 2.14 Variation du pourcentage de particules fines en fonction de la distance au point de dépôt (Vick, 1990).....26

Figure 2.15 Distribution de la taille médiane des particules dominantes (D_{50}) le long de la distance du point de dépôt (tiré de Blight & Steffen (1979)).....27

Figure 2.16 Échantillons prélevés sur la monocouche Goldex du parc 2 : a) Localisation des échantillons 2.1 et 2.5, b) Courbes granulométriques des échantillons 2.1 et 2.5 (Demers et al., 2017).....28

Figure 2.17 Distribution de la granulométrie des particules et de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} à travers un parc à résidus (adapté de MEND 2.17.1, 1996).....29

Figure 2.18 Variation de la conductivité hydraulique saturée transversale et verticale avec la distance au point de dépôt (adapté de Vick, 1990) 30

Figure 3.1 Image satellitaire des parcs à résidus 1, 2, 3 et 4 du site Manitou/Goldex (le parc 3 fait l'objet de cette étude) 35

Figure 3.2 Image satellitaire des parcs 1, 2, 3 Ouest et 3 Est du site Doyon (le parc 3 Est fait l'objet de cette étude).....36

Figure 3.3 Insertion des cylindres avec : a) le godet d'une pelle mécanique (site Manitou) et b) un marteau piqueur (site Doyon) (photos de l'auteure) 38

Figure 3.4 Échantillonnage des résidus : a) Excavation des cylindres b) Cylindres pleins de résidus (photos de l'auteure).....38

Figure 3.5 Description des couches de résidus : a) absence de strates sur la monocouche du parc 3 Manitou/Goldex; b) présence de strates sur le parc 3 Est Doyon (photos de l'auteure).....39

Figure 3.6 Stations d'échantillonnage des résidus Goldex sur le parc 3 du site Manitou/Goldex (stations placées sur une image satellitaire) 40

Figure 3.7 Stations d'échantillonnage des résidus sur le parc 3 Est Doyon (stations placées sur une image satellitaire) 41

Figure 3.8 Apparence typique des résidus échantillonnés sur le parc 3 Est du site Doyon /Westwood sur des stations : a) R3S2, b) R3S3, c) R2S1, d) R1S2, e) R1S3, f) R1S4 42

Figure 3.9 Profils verticaux des carottes de résidus du parc 3 Est du site Doyon/Westwood pour les trois rangées d'échantillonnage 43

Figure 3.10 Exemples d'hétérogénéités internes aux morceaux de résidus 43

Figure 3.11 Granulomètre laser Malvern Panalytical Mastersizer S avec l'unité de dispersion automatisée DIF2012 (laboratoire de IRME-UQAT) 47

Figure 3.12 Principe de diffraction laser dans un Malvern Mastersizer S 48

Figure 3.13 Spectre de diffraction : a) des grosses particules, b) des fines particules 49

Figure 3.14 Schéma du dispositif du pycnomètre à hélium (Adapté de Rozenbaum, 1999) 50

Figure 3.15 Schéma du dispositif de l'essai à charge variable (adapté de Holtz et Kovacs, 1981) 53

Figure 3.16 Vue des stations de prélèvement des échantillons pour la détermination expérimentale en laboratoire de k_{sat}. 54

Figure 3.17 Parties d'une cellule Tempe (Martin, 2003) 56

Figure 3.18 Groupes de variables sur le plan transversal.....58

Figure 3.19 Groupes de variables sur le plan longitudinal.....58

Figure 4.1 Distribution du pourcentage massique des minéraux en fonction de la distance par rapport à la digue 1 pour des échantillons prélevés aux intervalles de profondeurs de : a) 0 - 20 cm, b) 20 - 50 cm (Rangée 2 du Parc 3 Est Doyon/Westwood) 61

Figure 4.2 Distribution du pourcentage massique des minéraux en fonction de la distance par rapport à la digue 1 pour des échantillons prélevés aux intervalles de profondeurs de : a) 70 - 100 cm, b) 100 - 125 cm (Rangée 2 du Parc 3 Est Doyon/Westwood) 61

Figure 4.3 Pourcentage de pyrite en fonction de la profondeur sur la rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 62

Figure 4.4 Distribution du pourcentage de pyrite en fonction de la distance par rapport à la digue 1 à différentes profondeurs : a) 0-20 cm, b) 20-50 cm, c) 70-100 cm, d) 100-125 cm (Rangée 2 du Parc 3 Est Doyon/Westwood) 63

Figure 4.5 Profils verticaux des pourcentages massiques des éléments chimiques des stations de la rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....64

Figure 4.6 Distribution transversale du pourcentage massique dans les résidus de la rangée 2 de 0 à 40 cm de profondeur en fonction de la distance entre les stations : a) Al, b) Fe, c) S, d) Ca (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....65

Figure 4.7 Profil vertical des densités G_s sur : a) rangée R1, b) rangée R2 et c) rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 66

Figure 4.8 Distribution transversale de G_S sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....68

Figure 4.9 Distribution transversale de G_S sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....69

Figure 4.10 Distribution transversale de G_S sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....70

Figure 4.11 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus de : a) Rangée R1, b) Rangée R2, c) Rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 71

Figure 4.12 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus des stations : a) R3S1, b) R2S1, c) R1S1, d) R3S3, e) R1S4, f) R2S4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....72

Figure 4.13 Distribution verticale du diamètre médian D_{50} sur la : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....74

Figure 4.14 Profil vertical de P_{80} sur la : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 75

Figure 4.15 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 76

Figure 4.16 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 77

Figure 4.17 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 77

Figure 4.18 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 78

Figure 4.19 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 78

Figure 4.20 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 79

Figure 4.21 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 79

Figure 4.22 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 80

Figure 4.23 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 80

Figure 4.24 Distribution transversale du pourcentage massique des minéraux dans les résidus Goldex prélevés en surface (0-20 cm) sur la rangée 1 (Parc 3 Manitou/Goldex) 81

Figure 4.25 Profil vertical des densités G_s sur : a) rangée R1, b) rangée R2 et c) rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex) 82

Figure 4.26 Distribution transversale de G_S des résidus de la rangée R1 aux profondeurs de : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 83

Figure 4.27 Distribution transversale de G_S sur la rangée 2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 83

Figure 4.28 Distribution transversale de G_S sur la rangée 3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 84

Figure 4.29 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus : a) Rangée R1, b) Rangée R2, c) Rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex) 85

Figure 4.30 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus : a) R1S1, b) R2S1, c) R3S1 (Parc 3 Manitou/Goldex).....86

Figure 4.31 Distribution verticale du diamètre médian D_{50} : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex) 88

Figure 4.32 Profil vertical de P_{80} : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex) 89

Figure 4.33 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 90

Figure 4.34 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 90

Figure 4.35 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 91

Figure 4.36 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 92

Figure 4.37 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 93

Figure 4.38 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 93

Figure 4.39 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 94

Figure 4.40 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 94

Figure 4.41 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex) 95

Figure 5.1 Courbes de rétention d'eau mesurées et prédites pour les résidus de la rangée 2 du parc 3 Est du site Doyon/Westwood 97

Figure 5.2 Pourcentages massiques de la pyrite et du rutile sur les stations 1 et 4 à différentes profondeurs de la rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood).....99

Figure 5.3 Pourcentages massiques de quelques minéraux moyennement lourds sur les stations 1 et 4 à différentes profondeurs de la Rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 100

Figure 5.4 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 101

Figure 5.5 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 101

Figure 5.6 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 102

Figure 5.7 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 4 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 102

Figure 5.8 Distribution longitudinale de G_S sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 103

Figure 5.9 Distribution longitudinale de D_{50} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 104

Figure 5.10 Distribution longitudinale de P_{80} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood) 105

Figure 5.11 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex) 106

Figure 5.12 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex) 106

Figure 5.13 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex) 107

Figure 5.14 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 4 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex) 107

Figure 5.15 Distribution longitudinale de G_S sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (parc 3 Manitou/Goldex) 108

Figure 5.16 Distribution longitudinale de D_{50} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Manitou/Goldex) 109

Figure 5.17 Distribution longitudinale de P_{80} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Manitou/Goldex) 110

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
α	Paramètre de la concavité de la pente de dépôt [-]
δ	Hauteur de la couche des résidus déposés dans le parc [L]
C_U	Coefficient d'uniformité [-]
C_w	Pourcentage solide massique [%]
d	Profondeur du niveau phréatique par rapport à la base des résidus réactifs [L]
D_{10}	Diamètre de tamis correspondant à un pourcentage passant cumulé de 10% [L]
D_{30}	Diamètre de tamis correspondant à un pourcentage passant cumulé de 30% [L]
D_{50}	Diamètre de tamis correspondant à un pourcentage passant cumulé de 50% [L]
D_{60}	Diamètre de tamis correspondant à un pourcentage passant cumulé de 60% [L]
DMA	Drainage Minier Acide
e	Indice des vides [-]
g	Accélération gravitationnelle [$L.T^{-2}$]
G_s	Densité relative des grains [-]
e	Indice des vides [-]
F_S	Fines content ou teneur en fines [%]
FWR	Fines to water ratio ou ratio fines/eau [%]
h	Hauteur d'un point sur la plage par rapport à l'étang d'eau [L]
H	Distance entre le point de dépôt et un point de la plage [L]
h_{co}	Remontée capillaire équivalente [L]
i	Pente de dépôt [-]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [$L.T^{-1}$]
kPa	kilo pascal
MDDEP	Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs

MFT	Mature Fine Tailings
mm	Millimètre
NPS	Nappe phréatique surélevée
NPGA	Non Potentiellement générateur d'acide
η	Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)
θ	Teneur en eau volumique [$L^3.L^{-3}$]
ρ	Masse volumique [$M.L^{-3}$]
ρ_s	Masse volumique des particules solides [$M.L^{-3}$]
ρ_w	Masse volumique de l'eau [$M.L^{-3}$]
pH	Potentiel d'hydrogène [-]
Q_p	Débit volumique d'écoulement des particules [L^3T^{-1}]
Q_w	Débit volumique d'écoulement de l'eau [L^3T^{-1}]
RDC	Recherche et de développement coopérative
SC	Sand content ou teneur en sable [%]
SFR	Sand to fines ratio ou ratio sable/fines [%]
S_r	Degré de saturation [%]
ψ	Succion matricielle [$M.L^{-1}.T^{-2}$] ou [L]
t°C	Température [°C]
V	Volume [L^3]
ψ_a	Pression d'entrée d'air [$M.L^{-1}.T^{-2}$] ou [L]
ψ_r	Succion résiduelle [$M.L^{-1}.T^{-2}$] ou [L]
w	Teneur en eau (%)
X	Distance entre le point de dépôt et l'étang d'eau [L]
Y	Hauteur de dépôt par rapport à l'étang d'eau [L]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Construction des digues 122

Annexe B Diagramme ternaire de gestion des résidus miniers 123

Annexe C Dispositifs pour essais de sédimentation 124

Annexe D Détermination de G_s à l'aide du pycnomètre à hélium Micromeritics Accupyc 1330 125

Annexe E Suivi de l'essai et démontage de la cellule tempe (ASTM D3152-72) 126

Annexe F Pourcentage massique des mineraux sur les échantillons de la rangée 2 du parc 3 Est Doyon/Westwood 128

Annexe G Caractérisation chimique en partie pour million (ppm) des résidus du parc 3 Est Doyon/Westwood 130

Annexe H Densités relatives des grains solides des résidus des stations du parc 3 Est Doyon /Westwood 131

Annexe I Distribution transversale de la densités relatives des grains solides des résidus des stations du parc 3 est Doyon /Westwood 132

Annexe J Paramètres C_U, D_{10}, D_{90}, P_{44}, et P_{80} des résidus des stations du parc 3 Est Doyon/Westwood 133

Annexe K Distribution transversale de D_{50} et P_{80} des résidus des stations du parc 3 est Doyon /Westwood 134

Annexe L Pourcentage massique des minéraux prélevés en surface (0-20 cm) sur les stations de la rangée 1 du parc 3 Manitou/Goldex 136

Annexe M Densités relatives des grains solides des résidus des stations du parc 3 du site Manitou/Goldex 137

Annexe N Distribution transversale des densités relatives des grains solides des résidus des stations du parc 3 du site Manitou/Goldex 138

Annexe O Paramètres C_U, D_{10}, D_{90}, P_{44}, et P_{80} des résidus sur les stations (Manitou/Goldex) . 139

Annexe P Distribution transversale de D_{50} et P_{80} des résidus des stations du parc 3 Manitou/Goldex 140

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1 Contexte de l'étude

L'industrie minière du Québec exploite les métaux de base (Fer, Cobalt, Nickel, Cuivre, Plomb, Zinc), les matériaux de carrière (sable, gravier, argile, calcaire) et les métaux précieux (or, argent). Les gisements sont parfois des complexes polymétalliques ou des veines hydrothermales de quartz-pyrite-or. L'exploitation minière consiste à récupérer des masses minérales ou de minerai qui subissent ensuite le traitement minéralurgique. Le minerai est concassé, broyé puis traité dans des concentrateurs afin d'en libérer la substance utile par séparation gravimétrique ou magnétique ou par flottation. Les produits de la concentration sont le minerai économiquement rentable (ou le concentré) et les résidus miniers. Par la suite, le concentré est purifié pour accroître sa teneur en métal. Une partie des rejets miniers peut être renvoyée sous terre pour le remblayage dans les mines souterraines. L'autre partie est entreposée en surface dans des parcs à résidus miniers. Une autre fraction peut être utilisée comme matériaux de construction des digues ou pour des recouvrements au-dessus des résidus miniers dans les parcs à résidus selon la nature des résidus.

Un parc à résidus est une aire d'entreposage ceinturée partiellement ou entièrement par des digues. Celles-ci peuvent être construites avec des matériaux d'emprunt (comme pour les réservoirs d'eau) selon la méthode aval, amont ou de l'axe central ou avec des résidus miniers pour la méthode amont. Ces digues sont rehaussées au cours du dépôt. Conventionnellement, les résidus miniers étaient déposés par voie hydraulique, c'est-à-dire en pulpe. Ces résidus sont fins, saturés et leur pourcentage solide massique (rapport masse solide sur masse humide totale des résidus) varie entre 25% et 45% (Bussière, 2007). Le dépôt peut être ponctuel, par lances à robinets ou par hydrocyclone (Vick, 1984). Les résidus en pulpe sont aussi caractérisés par une faible résistance au cisaillement et un potentiel de liquéfaction élevé (Vick, 1990; Bussière, 2007; Mihiretu, 2009). Ainsi, les digues doivent être construites de manière à faciliter le drainage et résister à l'augmentation des pressions interstitielles. Toutefois, des cas de ruptures de digues et des problèmes d'instabilité géotechnique dont certains sont liés au dépôt hydraulique surviennent et sont régulièrement répertoriés sur le site internet http://www.wise-uranium.org/mdaf.html et documentés par exemple par : Aubertin et al. (2002); Azam & Li (2010); Caldwell et al. (2015);

Oboni & Oboni (2020); Chovan et al. (2021). La densification des résidus (Robinsky, 1999; Davies, 2011) est une approche d'entreposage développée pour remédier à ces problèmes.

L'un des problèmes associés au dépôt hydraulique des résidus est la ségrégation (Blight, 1983; Vick, 1990; Lottermoser, 2007). La ségrégation est la différenciation granulométrique, minéralogique et hydrogéotechnique observée dans la direction de dépôt. D'abord, la fraction grossière des résidus se dépose près de la zone de dépôt formant une zone appelée plage. Puis, la fraction de taille intermédiaire se dépose progressivement plus loin. Enfin, la fraction fine, entrainée par la charge d'eau, se dépose très loin de la zone de dépôt où elle reste en suspension. L'étang d'eau peut se former au milieu (cas des paddocks) ou à une extrémité du parc (côté colline ou travers-vallée). L'ampleur de la ségrégation dépend, entre autres paramètres, du pourcentage solide massique de la pulpe, et de la proportion de particules grossières dans la pulpe.

Les rejets miniers qui contiennent des sulfures métalliques (pyrite, pyrrhotite…) sont susceptibles de générer de l'acidité par oxydation en présence d'oxygène de l'air et d'eau de ruissellement ou des précipitations. Les effluents acides peuvent migrer en surface et en milieu souterrain et s'écouler dans les alentours du parc. Il s'agit de drainage minier acide (DMA). La qualité du DMA dépend de la présence de minéraux capables de neutraliser la réaction d'oxydation (carbonates, silicates…). Le DMA se caractérise par de l'acidité (pH < 6 selon le système Global Acid Rock Drainage Guide parrainé par le Réseau international pour la Prévention de l'acide (INAP) (Bussière & Guittonny, 2020), des concentrations élevées en sulfates, en métaux (Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Al, Cd, Fe…) et en métalloïdes (As, Sb, Te…). Les conséquences du DMA sont l'absence de végétation, l'acidification des cours d'eau, la dégradation de la faune, etc. La Directive 019 (MDDEP, 2012) exige un suivi environnemental des effluents miniers. Lorsque ceux-ci sont acides, il est nécessaire de les traiter avant de les rejeter dans l'environnement. Pour cela, des techniques de traitement passif et/ou actif sont utilisées pour l'amélioration de la qualité des effluents miniers acides. Le but est d'augmenter le pH pour précipiter les contaminants toxiques. La Directive 019 exige aussi des travaux de restauration sur les parcs à résidus à la fermeture de la mine.

Les techniques de restauration consistent en l'exclusion de l'eau et/ou de l'oxygène et/ou des sulfures. L'une d'elles est la technique de la nappe phréatique surélevée (NPS) combinée à une monocouche de protection (MEND, 1996). La Figure 1.1 est un schéma conceptuel de la technique.

Le principe de la technique est d'assurer le maintien des résidus réactifs presque saturés par le rehaussement et le contrôle du niveau de la nappe phréatique (Ouangrawa et al., 2010). La profondeur du niveau phréatique par rapport à la base des résidus réactifs est notée d. La valeur de d doit être inférieure à la pression d'entrée d'air (ψ_a) des résidus sous-jacents (MEND 1996; Orava et al. 1997; Aubertin et al., 1999; Dagenais 2005). ψ_a correspond à la pression à partir de laquelle le drainage des macropores commence (ex. Ouangrawa et al., 2009; Cosset, 2009; Pabst, 2011). L'étude de Ouangrawa et al. (2009) fixe la valeur de $d < ½ \psi_a$. Le maintien de la nappe phréatique à cette position permet d'assurer la saturation des résidus frais (non oxydés). Quand les résidus sont déjà oxydés, une oxydation indirecte peut intervenir. À ce moment, la nappe phréatique doit être maintenue proche de la surface des résidus (Bussière et al., 2008).

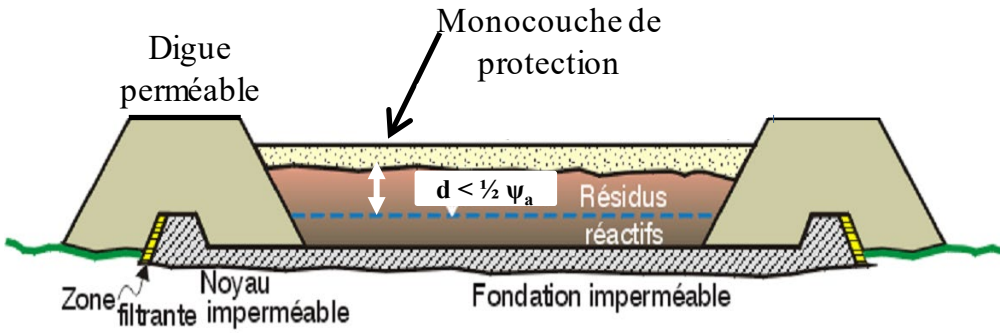


Figure 1.1 Schéma conceptuel de la technique de la NPS avec monocouche (adapté de Aubertin et al., 1999 et Ouangrawa et al., 2010)

En gardant les résidus miniers presque saturés, il est possible de limiter la diffusion de l'oxygène car le coefficient de diffusion de l'oxygène est 10000 fois inférieur dans l'eau que dans l'air (Aachib et al., 2004). Le flux d'oxygène atteignant les résidus doit être inférieur à 50 g $O_2/m^2/an$ (Aubertin et al., 1999; Dagenais et al., 2002). La monocouche a pour but de maintenir constant le niveau rehaussé de la nappe phréatique en contrôlant l'évaporation et l'infiltration de l'eau vers les résidus. La monocouche peut être constituée de matériaux grossiers (sable, gravier) ou de résidus miniers (désulfurés ou des résidus miniers non générateurs de DMA).

La mise en œuvre de la NPS avec monocouche est envisagée sur 2 des 3 parcs de l'ancienne mine Doyon (liée à Westwood par la Corporation IAMGOLD) car les résidus dans le parc sont sulfureux et générateurs de DMA (Demers et al., 2008; Miller et al., 1991; Rey, 2019). Les résidus sulfureux de la mine Doyon furent déversés avec un pourcentage solide variant entre 43-45 % (Demers,

2008). Des essais cinétiques en colonnes démontrent que l'utilisation des résidus désulfurés comme monocouche rendrait la NPS efficace (Demers et al., 2008; Rey et al., 2020). Les sulfures résiduels participent à la réduction du flux d'oxygène parvenant aux résidus sous-jacents en consommant l'oxygène atmosphérique sans générer d'acide aussi longtemps que les minéraux neutralisants présents dans la monocouche ne s'épuisent pas avant les sulfures (Demers et al., 2008; Rey et al., 2020). La taille des résidus désulfurés joue un rôle dans la migration d'oxygène (Refsgaard et al., 1991; Elberling et al., 1993; Lefebvre et al., 2001; Rey, 2020). Plus la granulométrie de la monocouche est fine, plus la pression d'entrée d'air (et donc la remontée capillaire) augmente et plus la migration d'oxygène est limitée vers les résidus sous-jacents. Par exemple, dans une cellule expérimentale, le flux d'oxygène maximum atteignant les résidus est plus faible pour une couverture (faite de résidus désulfurés) silteuse que pour une couverture sableuse (Rey et al., 2020).

Depuis 2009, la technique de la NPS avec une monocouche a été placée sur les parcs 2 et 3 du site orphelin Manitou localisé à environ 15 km au sud-est de la ville de Val-d'Or en Abitibi-Témiscamingue (Québec). Les résidus non potentiellement générateurs d'acide (NPGA) de la mine Goldex (Mines AGNICO EAGLE Ltée) forment la monocouche de protection. La monocouche a une épaisseur minimum de 1 m et a été déposée sous forme de pulpe à 50% solide (Demers et al., 2017; Ethier et al., 2018). Demers et al. (2017) ont montré les variations physiques et hydrogéotechniques sur la monocouche du parc 2 du site Manitou/Goldex. Le pourcentage des particules de sable diminue de 40 % à 3 % lorsqu'on s'éloigne de la digue de dépôt (sur une distance d'environ 480 m) (Demers et al., 2017). De plus, la conductivité hydraulique saturée mesurée (k_{sat}) varie même si la différence n'est que d'un seul ordre de grandeur. Près de la digue, $k_{sat} = 6{,}38\times10^{-5}$ cm/s et loin de la digue, $k_{sat} = 5{,}2\times10^{-6}$ cm/s (Demers et al., 2017).

2 Problématique

Lorsque le recouvrement monocouche est construit avec des résidus NPGA déposés hydrauliquement, la ségrégation peut apparaitre tant dans la monocouche que dans les résidus sous-jacents. Le profil du parc devient alors hétérogène et anisotrope. Cette différenciation granulométrique, minéralogique et hydrogéotechnique engendre une différenciation localisée des mouvements de fluides (eau et oxygène). En effet, la conductivité hydraulique, la capacité de rétention d'eau et le niveau phréatique sont les paramètres hydrogéotechniques qui contrôlent les flux d'eau et d'oxygène dans les résidus. La conductivité hydraulique est plus élevée et la capacité

de rétention d'eau plus faible dans la zone de plage du fait de la présence d'un réseau de pores plus grossier que dans la zone des particules fines. De ce fait, une désaturation marquée et une diminution du niveau de la nappe phréatique peuvent être observées dans la plage contrairement à la zone des particules fines où la consolidation des résidus est lente et le niveau phréatique élevé. Le niveau de la nappe phréatique est influencé par la variation de la conductivité hydraulique saturée et de la capacité de rétention d'eau résultant de la ségrégation.

Sachant que l'efficacité de la NPS dépend de la profondeur de la nappe phréatique à un endroit donné du parc (Ouangrawa et al., 2009 ; Pabst, 2011), une désaturation marquée dans la zone de plage pourrait faciliter plus la diffusion de l'oxygène dans les résidus réactifs, ce qui augmenterait le risque d'oxydation alors que la zone à résidus fins resterait saturée. La ségrégation peut alors influencer l'efficacité de la technique de la NPS. Il est donc important de prendre en compte les variations des propriétés hydrogéotechniques induites par la ségrégation dans la conception de la technique de la NPS. Cela est seulement possible lorsque l'ampleur de la ségrégation sur les parcs à résidus existants est préalablement évaluée en termes de distribution de propriétés physique, minéralogique, chimique et hydrogéotechnique.

3 Hypothèses de recherche

Les hypothèses formulées dans le cadre de ce projet sont les suivantes :

- La taille des particules des résidus diminue dans la direction de dépôt (entre la digue et l'étang d'eau)
- Les particules de résidus les plus denses se déposent près des points de dépôt
- La capacité de rétention d'eau augmente dans la direction de dépôt
- La perméabilité à travers le parc diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la digue de dépôt

4 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal du projet est d'évaluer l'ampleur de la ségrégation dans des parcs à résidus miniers. Les objectifs spécifiques fixés sont d'évaluer la distribution spatiale de :

- La taille des particules

- La densité relative des grains solides
- La minéralogie et la chimie des résidus
- La conductivité hydraulique saturée et la capacité de rétention d'eau.

5 Structure du mémoire

Ce mémoire est divisé en six chapitres. Le chapitre 1 comprend le contexte de l'étude, la problématique et les objectifs qui constituent l'introduction. Le chapitre 2 présente la revue de littérature sur le dépôt hydraulique des résidus, la ségrégation et les moyens de rendre non ségrégant les résidus. Dans la première section, sont mentionnées d'abord, les propriétés physiques et rhéologiques qui caractérisent les résidus en pulpe lors de leur transport depuis l'usine de concentration jusqu'au lieu d'entreposage. La deuxième section explique les méthodes de dépôt des résidus en pulpe et leur impact sur la distribution granulométrique des résidus. La troisième partie fait ressortir les phénomènes physiques qui interviennent lors du transport des particules des résidus miniers, la sédimentation étant l'un d'eux. La quatrième section liste quelques techniques de floculation et de densification pour rendre les résidus miniers non ségrégant. La dernière section met l'emphase sur l'intérêt de cette étude. Celle-ci est une phase préliminaire d'un projet qui intègre, entre autres, l'influence de la ségrégation sur la technique de restauration de la nappe phréatique surélevée.

Le chapitre 3 présente les matériels et les méthodes utilisés. Il s'agit des instruments et des protocoles d'échantillonnage, des caractérisations physique, chimique, minéralogique et hydrogéologique et la méthode d'interprétation des résultats obtenus par comparaison à l'aide du test statistique ANOVA. Le chapitre 4 présente les résultats obtenus sur le parc 3 Est Doyon et le parc 3 Manitou/Goldex. Le chapitre 5 est une discussion générale des travaux notamment sur la distribution spatiale des paramètres et les résultats de comparaison des paramètres entre les groupes d'échantillons. Dans ce chapitre, sont aussi mises en évidence l'influence des minéraux lourds sur la densité relative des grains solides et les conductivités hydrauliques saturées et les pressions d'entrée d'air qui sont liés à la granulométrie. Le chapitre 6 expose les conclusions et les recommandations.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente d'abord les caractéristiques des pulpes de résidus miniers et leur dépôt hydraulique conventionnel. Après avoir décrit le phénomène de ségrégation qui peut en résulter, son impact sur les propriétés physique, minéralogique, chimique, hydrogéotechnique est documenté. Finalement, l'impact de la ségrégation sur la technique de NPS ainsi que les conditions de préparation des résidus qui ne sont pas ségrégant sont présentés.

2.1 Caractéristiques des résidus en pulpe

2.1.1 Propriétés physiques

Les résidus en pulpe peuvent être caractérisés par leur granulométrie, densité relative des grains (G_s), forme des grains, pourcentage solide massique de la pulpe (C_w) et la teneur en eau massique (w). Ces propriétés dépendent du gisement et de la minéralurgie. La distribution granulométrique peut être représentée par le pourcentage des particules inférieures à 80 µm (P_{80}) ou à 2 µm (P_2), les diamètres laissant passer 10 %, 30 %, 50 % ou 60 % des particules appelés respectivement D_{10}, D_{30}, D_{50} et D_{60} et le coefficient d'uniformité (C_U). C_U détermine l'irrégularité ou l'uniformité de la distribution granulométrique (équation 2.1). Les résidus peuvent contenir des sulfures (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite …). La valeur de G_s augmente avec la teneur en pyrite (G_s est autour de 5). Le pourcentage solide massique est le rapport de la masse du solide (M_s) sur la masse totale humide (M_t) de la pulpe (voir équation 2.2). C'est un paramètre qui décrit indirectement la teneur en eau massique des résidus telle que définie par l'équation 2.2.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{2.1}$$

$$C_w = \frac{M_s}{M_t} = \frac{1}{1+w} \tag{2.2}$$

Il est question, dans ce travail, de résidus issus des mines en roche dure des gisements polymétalliques. À la sortie de l'usine de concentration, les résidus en pulpe, tels que présentés sur la Figure 2.1 , sont caractérisés par : 25 % < C_w < 45 %, 122 % < w < 300 %, un état lâche et une granulométrie fine et hétérogène (Robertson, 1987; Blight, 1987; Vick, 1990; Bussière, 2007; Mihiretu, 2009). Les résidus peuvent contenir des grains de la taille du sable, du silt et de l'argile. De manière générale, la taille maximale des résidus miniers ne dépasse pas 1000 µm (Fitton, 2007;

Bussière, 2007). Ici, le sable représente la portion grossière (particules > 80 µm) et les particules d'argile et de silt, la portion fine (particules < 80 µm) dans les résidus. L'argile a un comportement plastique tandis que le silt a un comportement peu ou pas plastique. Les paramètres granulométriques typiques des résidus issus de 9 mines en roches dures du Canada à la sortie de l'usine de concentration sont : 1 µm < D_{10} < 4 µm; 10 µm < D_{60} < 50 µm; 8 < C_U <18 ; 70 % < P_{80} < 97 %, 5 % < P_2 < 14 % (Bussière, 2007). Ils sont généralement classés comme des silts de faible plasticité ou ML (ASTM D2487-17).

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

La Figure 2.2 présente la distribution granulométrique typique des résidus post-dépôt hydraulique. Treize échantillons (S1 à S13) ont été prélevés sur un parc à résidus d'une mine du Québec. Les caractéristiques sont : 0,9 µm < D_{10} < 6 µm; 10 µm < D_{60} < 80 µm; 10 < C_U <30; 60 % < P_{80} < 100 %, 4 % < P_2 < 20 % (Bussière, 2007). L'hétérogénéité observée dépend de la zone de prélèvement. Néanmoins, les résidus sont classés comme des silts non plastiques. La fraction grossière observée dans la zone la plus proche de la digue de dépôt est généralement classée comme des silts sableux (ASTM D2487-17).

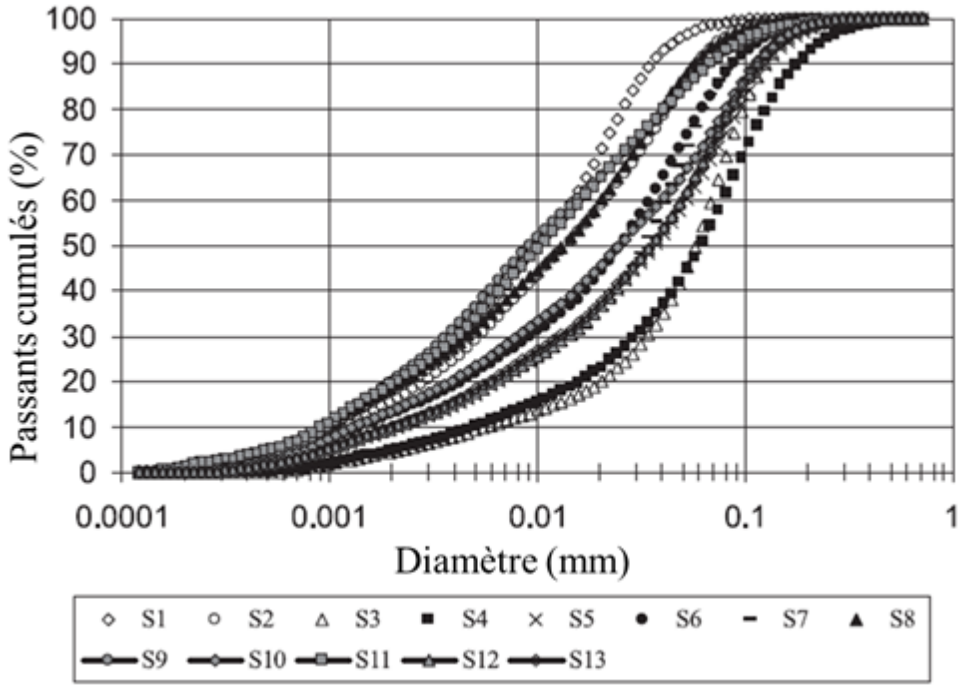


Figure 2.2 Courbes granulométriques des échantillons de résidus sur un parc à résidus d'une mine québécoise (Bussière, 2007)

2.1.2 Propriétés rhéologiques

De manière générale, il existe deux types de fluides du point de vue rhéologique: les fluides newtoniens (comme l'eau) et les fluides non-newtoniens (comme la pulpe de résidus miniers fins). La Figure 2.3a décrit les comportements typiques à l'aide de courbe d'écoulement ou rhéogramme (relation contrainte de cisaillement τ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$) des fluides non-newtoniens. La viscosité dynamique étant définie par $\eta = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$ (pente des courbes), ces rhéogrammes peuvent aussi être représentés en termes de courbes de viscosité (relation η en fonction de $\dot{\gamma}$) (Figure 2.3b). Les comportements rhéologiques décrits sur la Figure 2.3 sont indépendants du temps (Ouattara, 2017). Pour les fluides newtoniens, η est constant à une température donnée (Figure 2.3b). Comme expliqué par Barnes et al. (1989), pour les fluides dilatants, η augmente avec $\dot{\gamma}$ et pour les fluides pseudo-plastiques η diminue avec $\dot{\gamma}$ (Figure 2.3b). Un fluide dilatant est une suspension caractérisée par une forte concentration de particules solides qui sont proches les unes des autres (notes de cours, Belem, 2019). Un fluide pseudo-plastique est une suspension constituée de grosses particules gonflées de solvant ou dissoutes (notes de cours,

Belem, 2019). L'écoulement de certains fluides ne peut être amorcé qu'après avoir exercé une contrainte (τ_0) appelée de seuil de cisaillement ou d'écoulement (Ouattara, 2017).

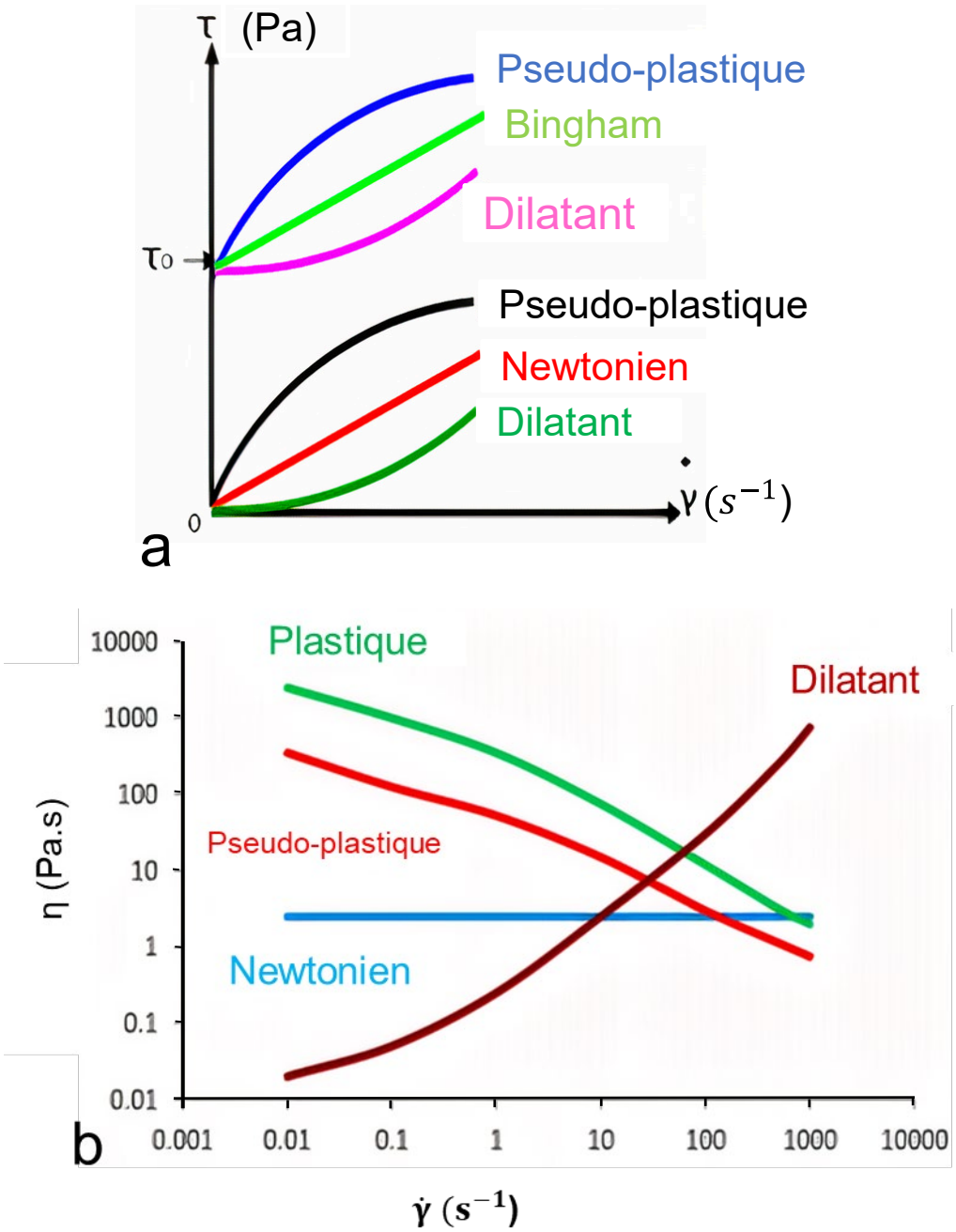


Figure 2.3 Principaux types de rhéogrammes des fluides non-newtoniens : a) $\tau = f(\dot{\gamma})$ avec ou sans seuil de cisaillement τ_0 (adapté de Ferraris, 1999), b) $\eta = f(\dot{\gamma})$ (adapté de Marchesse, 2019)

Le design d'un système de transport des résidus miniers implique, en général, la connaissance du seuil de cisaillement et de la viscosité qui vont contrôler les pertes de charge et les pressions de pompage à travers un réseau de pipelines. η et τ_0 dépendent de la densité relative des grains, de la granulométrie, de la forme des grains, de la minéralogie et du pourcentage solide des résidus (notes de cours, Belem, 2019; Cooke, 2006).

Il convient de mentionner que la sédimentation des particules solides des résidus miniers en écoulement dépend de leurs propriétés rhéologiques et de la vitesse d'écoulement des résidus (Talmon et Huisman, 2005; Eltilib et al., 2011; Wang et al., 2018). Toute tentative de compréhension du processus de ségrégation des résidus doit donc tenir compte de la rhéologie et de l'hydrodynamique de l'écoulement des résidus durant le dépôt.

2.2 Dépôt hydraulique des résidus miniers en pulpe

2.2.1 Transport des résidus miniers en pulpe

Les résidus miniers en pulpe s'écoulent par gravité et/ou grâce à l'utilisation de pompes centrifuges dépendamment de l'élévation de l'usine de concentration par rapport au parc, de la longueur des pipelines et des pertes de charges évaluées. La vitesse d'écoulement des résidus dans les pipelines varie entre 1 et 3 m/s (Cabrera, 1979; Vick, 1990) dépendamment des caractéristiques de la pulpe, des dimensions des conduites et des conditions d'opérations des mines. Cette vitesse favorise un modèle d'écoulement pseudo-homogène à l'intérieur des conduites, c'est-à-dire que la vitesse d'écoulement des particules est supérieure à leur vitesse de sédimentation (Cabrera, 1979; Conlin, 1989; Vick, 1990). Il ne devrait donc pas y avoir de sédimentation de particules dans les conduites, et quelle que soit la granulométrie, les résidus devraient idéalement rester en suspension.

2.2.2 Méthodes de dépôt hydraulique des résidus

La méthode conventionnelle de stockage des résidus miniers est le dépôt hydraulique des résidus sous forme de pulpe. Elle présente plus un avantage économique qu'elle ne participe à la stabilité des aires d'entreposage (Robertson, 1987). Le dépôt hydraulique des résidus peut se faire par lances à robinet (Figure 2.4a), par dépôt ponctuel (Figure 2.4b) ou hydrocyclones (Figure 2.4c).

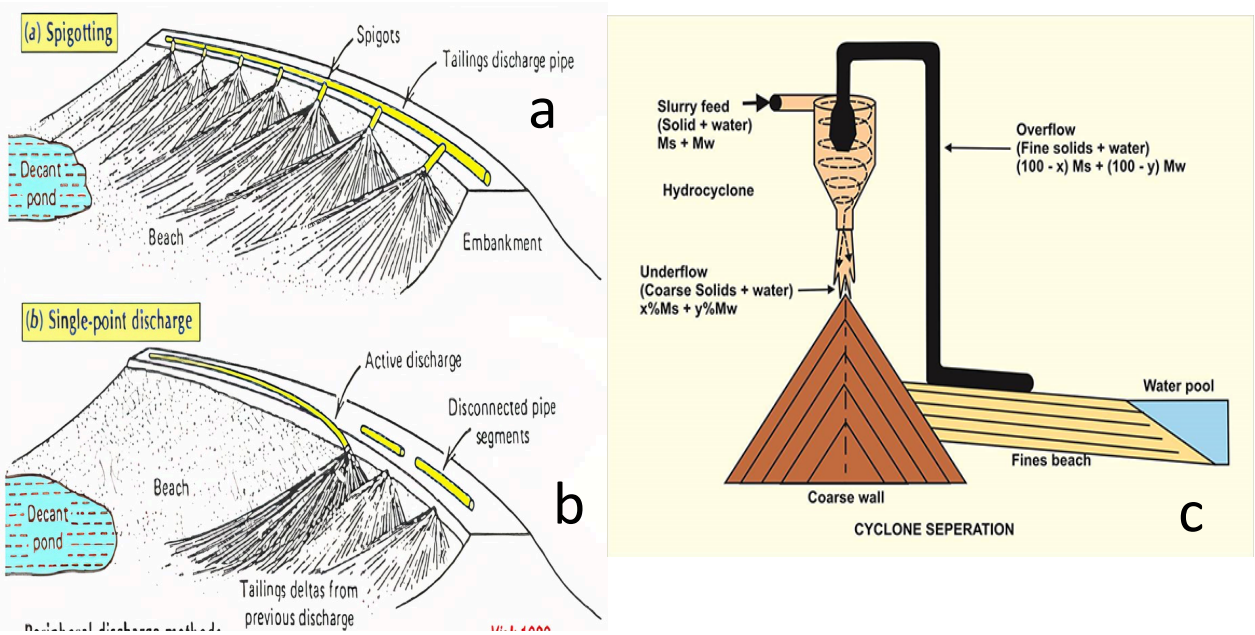


Figure 2.4 Méthodes de dépôt par : a) lances à robinet (Vick, 1984); b) dépôt ponctuel (Vick, 1984); c) hydrocyclone (https://www.goldfields.com/deposition-techniques.php)

Le dépôt par lances à robinet se fait à partir de lances espacées de 2 à 3 m et connectées le long du pipeline placé sur la crête des digues de confinement des rejets miniers (Blight, 2010). Le plan de dépôt impose une rotation cyclique du point de dépôt sur la digue. Les avantages de cette rotation sont de favoriser le drainage de la zone de dépôt antérieure et contrôler la hauteur des résidus sur le parc. Selon la configuration des digues, l'étang d'eau peut se retrouver au milieu du parc ou à l'extrémité opposée à la digue de dépôt.

Le dépôt ponctuel se fait à partir d'un seul endroit de la digue à la fois. Le plan de dépôt oblige la déconnexion et la relocalisation périodique de l'extrémité ouverte du tuyau. Cela favorise le drainage, la sédimentation et la consolidation des résidus anciennement déposés pendant que le dépôt se poursuit dans les autres zones du parc. Cela prévient aussi l'obstruction du tuyau du fait de l'accumulation des particules grossières devant celui-ci. L'étang d'eau est astreint à l'extrémité du parc.

Le dépôt par hydrocyclone est indiqué quand la pulpe contient une fraction de particules grossières plus importante que les particules fines (Antunes & Medronho, 1992) et que les particules grossières (la sousverse ou *underflow* en anglais) sont destinées à la construction des digues pendant que les particules fines (la surverse ou *overflow* en anglais) remplissent le parc.

2.2.3 Construction des digues de confinement des parcs à résidus miniers

Les parcs à résidus sont des aires d'entreposage des résidus ceinturées partiellement ou entièrement de digues, dépendamment de la topographie du site (Aubertin et al., 2015). Les règles de sélection du site sont régies au Québec par la Directive 019 (MDDEP, 2012). Les digues de confinement des résidus peuvent être construites avec des résidus miniers, des matériaux d'emprunt ou des roches stériles en fonction de leur granulométrie, leur résistance mécanique, du coût de leur mise en place et de leur disponibilité tout en assurant la stabilité à long terme des digues. La stabilité des digues peut être menacée par les fluctuations incontrôlées du niveau phréatique, le développement des surpressions interstitielles, les percolations à travers les digues, l'érosion interne, la liquéfaction, les débordements en crête, etc. (Aubertin et al., 2002).

Les méthodes de construction des digues sont : la méthode amont, la méthode aval et la méthode centrale. Les caractéristiques communes à ces méthodes sont la construction d'une digue amorce, l'élévation des digues et l'introduction des ouvrages de décantation pour contrôler la nappe phréatique (voir Annexe A). Les digues sont construites successivement les unes sur les autres dépendamment de la séquence de dépôt (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002). Les digues sont construites avec la partie grossière des résidus quand les matériaux d'emprunt ne sont pas disponibles (à un coût raisonnable). Pour les trois méthodes, il est nécessaire que la zone proche de la digue soit essentiellement constituée de la fraction grossière des résidus. Le granoclassement induit par la ségrégation lors du dépôt hydraulique des résidus devient alors d'une grande utilité. La séparation de la fraction grossière des résidus est renforcée avec l'utilisation d'un hydrocyclone surtout pour les méthodes avale et centrale (Vick, 1990; Aubertin et al., 2002). L'objectif est d'utiliser la perméabilité de ces particules pour favoriser le drainage et la consolidation afin d'assurer la stabilité des digues. En effet, la plage consolidée est la fondation sur laquelle reposent les digues pour les méthodes amont et centrale. Dans la méthode amont, la plage ne doit pas contenir moins de 40 à 60 % de sable (Vick, 1990). Pour faciliter l'accumulation du sable près des digues lors du dépôt par lances à robinet, des fosses peu profondes sont creusées devant les robinets (Vick, 1990). Sachant que la vitesse d'écoulement chute au point de dépôt, les particules grossières et denses s'entassent près des digues. La largeur de la plage et l'éloignement de l'étang d'eau participent aussi à réduire les pressions interstitielles sur les digues.

2.3 Ségrégation

Lors du dépôt hydraulique des résidus miniers, différents phénomènes simultanés de transport (déplacement transversal des particules) et de dépôt des particules (sédimentation dynamique) ont lieu et ce, en fonction des vitesses d'écoulement des résidus et de leurs propriétés physiques et rhéologiques. La ségrégation est le fruit de tous ces processus. Une fois l'écoulement des résidus arrêté, la sédimentation se poursuit en mode statique.

2.3.1 Sédimentation

2.3.1.1 Principes

Deux principaux processus post-déposition sont observés dans un parc à résidus : la sédimentation qui intervient rapidement pendant et après l'écoulement et la consolidation qui est un processus plus lent. La sédimentation est le phénomène de dépôt des particules sous l'effet de la gravité. Il s'agit de la ségrégation verticale. La consolidation est le phénomène de tassement d'un dépôt de particules sédimentées par évacuation du liquide interstitiel sous l'action du poids propre des particules et/ou par un chargement extérieur (Mittal & Morgenstern, 1975). À cause de la teneur en eau élevée des résidus en pulpe, les particules se déposent librement sans entrave les unes entre les autres. La vitesse de sédimentation d'un grain isolé (supposé sphérique) dans un liquide newtonien dépend du poids propre du grain et de la viscosité dynamique du liquide. Elle est définie par la loi de Stokes (équation 2.3; Stokes, 1851; Mihiretu, 2009). Les grains de même taille se déposent avec la même vitesse de sédimentation dans un même liquide et les particules plus grosses et denses se déposent plus vite que les particules fines et légères, respectivement. La vitesse de sédimentation est donnée par :

$$V_S = \frac{D^2 \times g \times (\rho_s - \rho_f)}{18\eta} \tag{2.3}$$

V_S (m/s) est la vitesse de sédimentation, D (m) est le diamètre de la particule, g (m/s^2) est l'accélération gravitationnelle, ρ_s (kg/m^3) est la masse volumique de la particule solide, ρ_f (kg/m^3) est la masse volumique du fluide, η (Pa.s) est la viscosité dynamique du fluide.

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 de type Bingham par exemple

(voir section 2.1.2), la vitesse de sédimentation en condition d'écoulement laminaire est donnée par (van Rhee, 2002) :

$$V_S = \frac{D^2 \times g \times (\rho_s - \rho_f)}{18\eta} - D \times \frac{\tau_0}{\eta}\left(1 + \frac{\pi}{12}\right) \quad (2.4)$$

τ_0 est le seuil d'écoulement (voir section 2.1.2). Cette équation montre que la vitesse de sédimentation diminue lorsque τ_0 augmente. D'autres équations existent dans la littérature pour les autres types de fluides non-newtoniens (par exemple : Talmon & Huisman, 2005; Mihiretu, 2009)

2.3.1.2 Caractéristiques physiques des résidus miniers

En plus des propriétés physiques générales des résidus miniers, définies à la section 2.1.1, d'autres caractéristiques physiques décrivent les résidus en phase de sédimentation/ségrégation transversale. Azam & Scott, (2005) et Mihiretu, (2009) utilisent ces paramètres, en laboratoire, durant des essais statiques en colonne et les essais dans un canal d'écoulement. Ils sont exprimés en pourcentage (%).

- "Fines content" (F_S) ou teneur en fines

$$F_S = \frac{M_{FS}}{M_{FS} + M_{SS}} \quad (2.5)$$

M_{FS} est la masse de fines dans la pulpe et M_{SS} est la masse de sable dans la pulpe.

- "Fine to water ratio" (FWR) ou ratio fines/eau

$$FWR = \frac{M_{FS}}{M_{FS} + M_w} \quad (2.6)$$

M_w est la masse d'eau dans la pulpe

- "Sand to fines ratio" (SFR) ou ratio sable/fines

$$SFR = \frac{M_{SS}}{M_{FS}} = \frac{1 - F_S}{F_S} \quad (2.7)$$

- "Sand content" (SC) ou teneur en sable

$$SC = \frac{M_{SS}}{M_{FS} + M_{SS}} \quad (2.8)$$

$$SC = 1 - F_S \quad (2.9)$$

L'utilisation des paramètres FC, SI, et FCER pour caractériser la ségrégation hydraulique nécessite la connaissance de certaines caractéristiques initiales de la pulpe de départ.

Les paramètres C_w (équation 2.2), F_S et FWR peuvent être introduits dans un diagramme ternaire de gestion des résidus (Scott & Cymerman, 1984; Azam & Scott, 2005). Ce diagramme sert à prédire, à priori, les limites de ségrégation, de pompabilité, de sédimentation et de consolidation des résidus miniers (voir Annexe B). Le diagramme ternaire est un triangle composé de 3 sommets correspondant au sable, aux fines et à l'eau. Les axes correspondent à C_w à gauche (avec $C_w = 0$ pour l'eau), FWR à droite avec FWR = 0 pour l'eau) et F_S en bas (avec F_s =10 pour le sable).

2.3.1.3 Types d'essais de sédimentation

Les mécanismes de transport et de sédimentation des résidus dans un parc à résidus peuvent être analysés en laboratoire dans un canal d'écoulement (flume test), dans des colonnes verticales (standpipe tests) ou dans des cellules de terrain. Des résidus miniers ou des matériaux d'emprunt peuvent être utilisés. La kaolinite est utilisée à la place de l'argile, la silice pour remplacer le sable et le silt. Les essais en colonne sont réalisés en mode statique tandis que les deux autres sont en mode dynamique. L'essai dans un canal d'écoulement ouvert permet d'observer les caractéristiques de l'écoulement et d'évaluer la pente de dépôt des résidus. L'essai en colonne permet d'évaluer la ségrégation verticale. Les procédures complètes des essais sont données par Küpper (1991) et Mihiretu (2009).

Pour l'essai en colonne (Annexe C), une pulpe homogénéisée est introduite dans une colonne de volume donné. Les caractéristiques initiales de la pulpe tel que C_w, FWR, SFR (équations 2.2, 2.6, 2.7, respectivement) sont connues. Puis, à des intervalles de temps choisis, des échantillons de pulpe sont récupérés à différentes hauteurs de la colonne. Un intervalle de temps matérialise le temps de sédimentation de la suspension. Une colonne est requise pour chaque temps d'échantillonnage.

L'essai au flume (Annexe C) simule le régime hydrodynamique qui a lieu lors du transport des résidus. Le canal d'écoulement est alimenté avec une pulpe homogénéisée. Les objectifs de l'essai sont de déterminer post-essai (après le drainage du canal) la pente et/ou la géométrie de dépôt, la répartition de la granulométrie et de la densité relative des grains solides) selon les conditions initiales de dépôt (pourcentage solide massique de la pulpe, la granulométrie et du débit d'alimentation et d'écoulement).

Les cellules de terrain sont construites en connectant des conduites, à des espacements déterminés, sur un pipeline principal. Les dimensions et les espacements typiques sont donnés par Küpper (1991). L'essai consiste à déterminer la géométrie de la plage après le dépôt. Plusieurs essais sont réalisés en faisant varier le débit d'écoulement et le pourcentage massique de la pulpe. Le débit d'écoulement des résidus est contrôlé à partir des robinets fixés sur chaque lance.

Au terme des essais, les caractéristiques physiques des résidus, telles que décrites aux sections 2.1.1 et 2.3.1.2, sont déterminées. Par exemple, les valeurs de C_w et SC sont calculées et des profils de la variation de C_w et SC sont tracés en fonction de la hauteur (position des plateaux) dans l'essai en colonne ou de la zone de prélèvement dans le canal d'écoulement ou dans les cellules de terrain. Des échantillons prélevés le long du canal d'écoulement et dans les cellules de terrain peuvent en plus être soumis à des essais triaxiaux.

2.3.2 Ségrégation transversale

Une fois sortis du tuyau de dépôt (point A sur la Figure 2.5 ci-après), les résidus atteignent le parc, en premier lieu, au point de dépôt B (Figure 2.5) qui se trouve en-dessous des lances. L'énergie cinétique, déployée par la pompe, diminue à la sortie des tuyaux. Le transfert des résidus des tuyaux vers le parc produit un jet dont la puissance dépend de l'élévation du pipeline par rapport au point B. Le jet des résidus dans le parc peut créer une dépression dans laquelle s'accumulent les résidus comme montré sur la Figure 2.5.

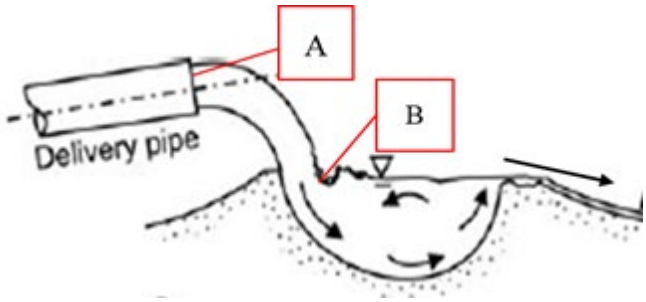


Figure 2.5 Écoulement à la sortie du tuyau au point de dépôt (Blight, 2010)

L'énergie mécanique diminue aussi à cause de la transformation d'une partie de l'énergie cinétique en énergie de pression et des pertes de charge induites par la viscosité dynamique et l'abrasivité des résidus dans le tuyau (Vick, 1990). La cavité participe à réduire davantage l'énergie cinétique

des résidus. Or, ordinairement les grosses particules ont besoin de plus d'énergie que les particules fines pour rester en suspension. La dissipation de l'énergie cinétique favorise donc le dépôt et la sédimentation rapide de la portion grossière près du point B. Le reste des particules en suspension s'écoulent en s'éloignant du point de dépôt.

L'écoulement des résidus en pulpe dans le parc est comparable au mode de formation des deltas en environnement marin (Bentel, 1981; Conlin, 1989; Vick, 1990; Blight, 2010). Un delta est un dépôt de sédiment émergeant à l'embouchure d'un fleuve et divisant celle-ci en chenaux de plus en plus ramifiés. Le delta présente un granoclassement régressif des sédiments à travers les 3 zones le constituant qui sont : la plaine deltaïque, le front du delta et le prodelta. Dans le parc à résidus, l'écoulement des résidus se fait sous 3 façons : initialement selon un schéma méandriforme, par la suite à travers un réseau de chenaux entrelacés et enfin selon des trajectoires droites parallèles (Figure 2.6). Le passage d'un comportement à l'autre traduit un granoclassement décroissant des résidus. Les mécanismes de formation de la plaine deltaïque sont analogues à ceux de la plage jusqu'à la démarcation de l'étang d'eau, tandis que ceux du front de delta et du prodelta correspondent à ceux dans l'étang d'eau (Figure 2.7).

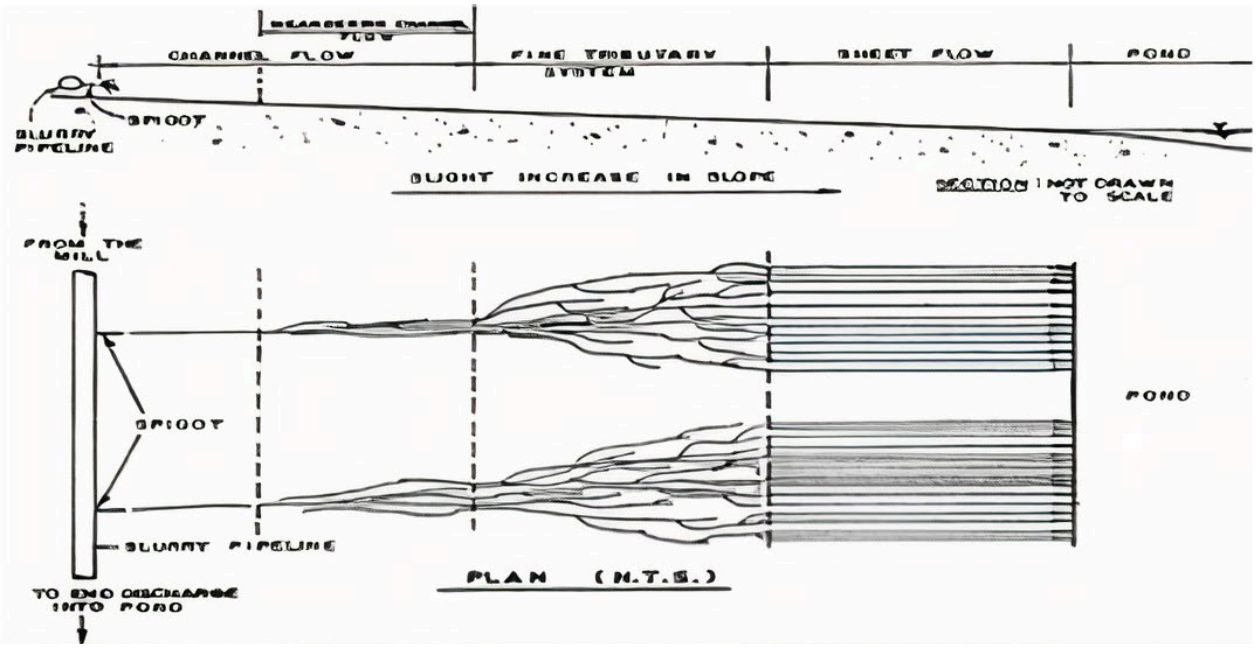


Figure 2.6 Trajectoire des résidus lors du dépôt hydraulique (Conlin, 1989)

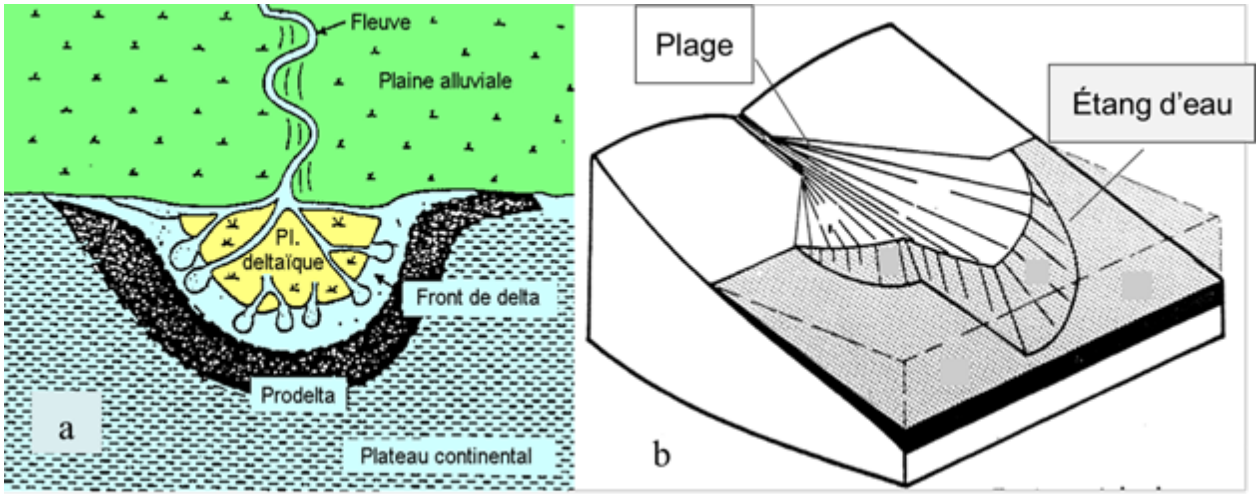


Figure 2.7 Analogie entre le mode de formation de : a) delta en environnement marin et b) plage et étang d'eau dans un parc à résidus miniers (Conlin, 1989)

Après le point de dépôt, les particules sont entrainées le long de chenaux principaux qui empruntent une trajectoire méandriforme. Le chenal ici représente une voie de passage créée par l'écoulement des résidus et le méandre décrit la forme sinueuse du chenal (Figure 2.8a). L'écoulement décrit un processus continu et dynamique de migration des chenaux associé à des événements d'érosion et de dépôt, d'abandon et de reprise des chenaux. Lors de l'écoulement dans le parc à résidus miniers, les particules qui sédimentent créent des méandres. Plusieurs fronts de stratification se forment donc selon la taille et la densité des particules. Sur le bord convexe d'un méandre, il y a dépôt de particules tandis que sur le bord concave, il y a érosion du chenal. Plus les particules se déposent dans les méandres, plus la vitesse d'écoulement diminue. Des vagues de type stationnaire se forment dans les méandres (Figure 2.8b) quand la suspension, à la rencontre d'un amas de particules ou d'une sinuosité, se déplace dans la direction opposée à l'écoulement. Ces vagues permettent de réduire de surcroît la vitesse d'écoulement des résidus (Blight, 2010). Par conséquent, les particules les plus grosses et lourdes sédimentent en premier et proche de la zone de dépôt, autrement dit de la plage (Blight, 2010). Cependant, une fraction de particules fines se retrouve dans la plage, capturée entre les pores du sable (Mihiretu, 2009; Talmon et al., 2014).

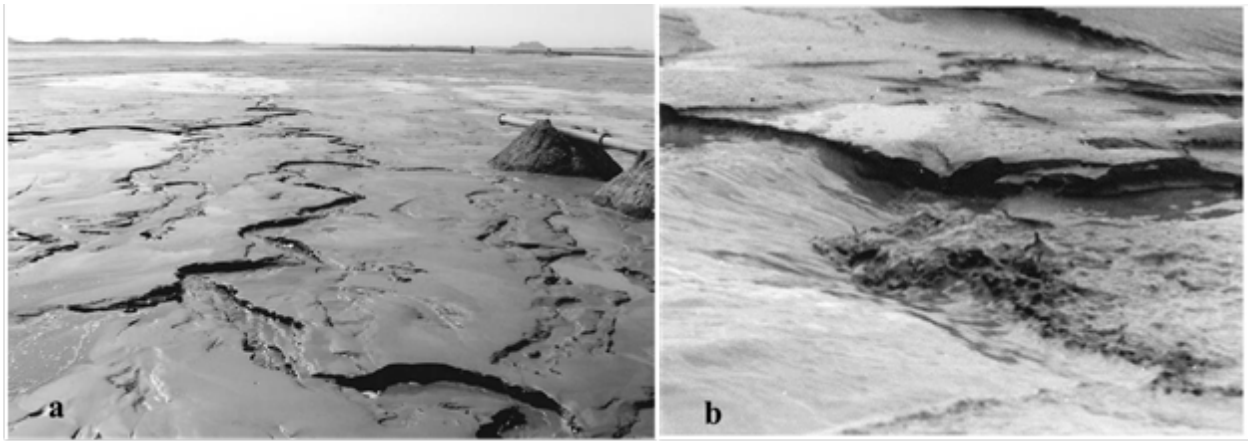


Figure 2.8 Chenaux méandriformes dans un parc à résidus : a) méandres et b) vagues stationnaires dans un méandre (Blight, 2010).

En s'éloignant de la plage, au fur et à mesure que le dépôt continue, la quantité de particules en suspension augmente dans le parc. La suspension contient la portion de particules de tailles intermédiaire (silt et grains fins de sable) et fine. Les chenaux méandriformes se convertissent en plusieurs petits chenaux entrelacés, comme le montre la Figure 2.6. Les mêmes mécanismes de sédimentation mentionnés ci-dessus ont lieu. À l'approche de l'étang d'eau, la pente tend à s'aplanir jusqu'à 0,1% (Conlin, 1989; Vick, 1990).

La charge des résidus qui avance plus loin contient une fraction fine. Le réseau de chenaux entrelacés se transforme en trajectoires droites parallèles (Figure 2.6). Les résidus restent en suspension et sont saturés (Li et al., 2002) et il se forme un étang d'eau.

2.3.3 Pente de dépôt

La pente formée par le dépôt hydraulique des résidus peut être représentée par un profil concave dans un plan qui utilise une hauteur normalisée pour l'axe vertical (Melent'ev et al., 1973). La hauteur normalisée est obtenue en divisant la hauteur h d'un point sur la plage par rapport à l'étang par la hauteur Y de dépôt par rapport à l'étang (Figure 2.9). L'équation du profil (équation 2.10) permet de prédire l'allure spécifique de la pente de dépôt des parcs, de calibrer la hauteur de dépôt idéale, de prévoir la position de l'étang d'eau et d'évaluer la capacité de stockage du parc en cas de précipitations et lors des dépôts subséquents.

$$\frac{h}{Y} = \left(1 - \frac{H}{X}\right)^{\alpha} \qquad (2.10)$$

α est le paramètre de la concavité de la pente (Melent'ev et al., 1973, Månsson, 2014) qui est caractéristique des résidus et du mode de dépôt (δ équivaut à 1,4 pour les mines de cuivre, 1,5 pour les mines de diamant, 2 pour les mines de platine et 4 pour les mines d'or en Afrique du Sud (Blight & Bentel, 1983), H [L] est la distance entre le point de dépôt et un point de la plage et X [L] est la distance entre le point de dépôt et l'étang d'eau.

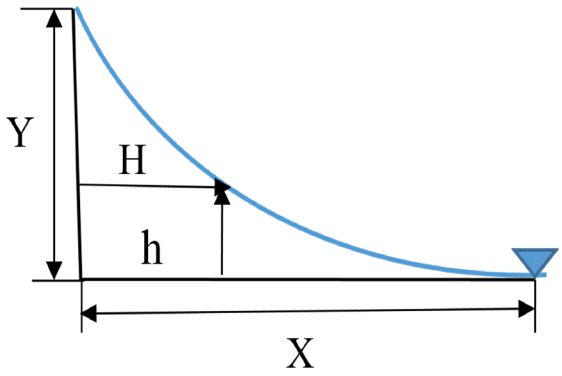


Figure 2.9 Profil concave de la pente de la plage (adapté de Melent'ev et al., 1973)

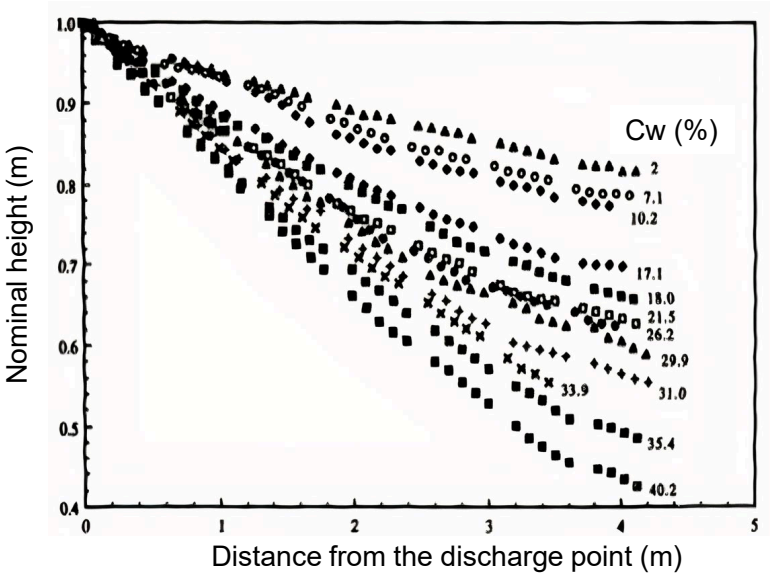


Figure 2.10 Profils de la pente en fonction du pourcentage solide massique lors de flume tests (Küpper, 1991)

Au fil des dépôts successifs, la plage s'élargit et développe une pente qui varie entre 0,5 et 1 % (voire 2 % sur la Figure 2.11) (Robinsky, 1978; Conlin, 1989; Vick, 1990; Fitton, 2007). La formation de la pente d'une plage est analogue à celle de la plaine abyssale (Conlin, 1989; Vick,

1990, voir section 2.3.2). L'équation 2.11 de Lane (1955) exprime la pente i d'une plaine abyssale en environnement marin :

$$i \sim (Q_P \times D_{50})/Q_W \tag{2.11}$$

Q_p [L^3T^{-1}] est le débit volumique d'écoulement des particules, Q_w [L^3T^{-1}] est le débit volumique d'écoulement de l'eau, D_{50} [L] est le diamètre médian des particules.

La pente de la plaine augmente quand le volume de l'eau diminue ou quand la quantité de solide ou la taille des particules augmente. La Figure 2.10 présente les pentes des plages post-essais. Pour C_w = 2 %, la pente est plus faible que pour C_w = 40,2 % (Küpper, 1991). Pour faciliter la comparaison des profils de la plage, la position du point le plus haut sur la plage a été normalisée à 1 m sur l'axe des ordonnées pour tous les essais (Küpper, 1991). La Figure 2.11 explique le comportement des résidus lors du dépôt en fonction du pourcentage solide massique (Robinsky, 1978). Les résidus ségrégant présentent des pentes < 2 % lorsque C_w < 52 % et les pentes de la plage des résidus ne présentant pas de ségrégation (C_w > 52 %) sont supérieures à 2 %. Les résultats présentés dans cette Figure sont spécifiques aux résidus utilisés dans l'étude de Robinsky (1978). Il faut aussi mentionner que la rhéologie des résidus influence aussi la pente (Fitton, 2007; Simms et al., 2011) et la ségrégation (Talmon & Huisman 2005; Mihiretu, 2009), mais la rhéologie n'est pas prise en compte sur la Figure 2.11.

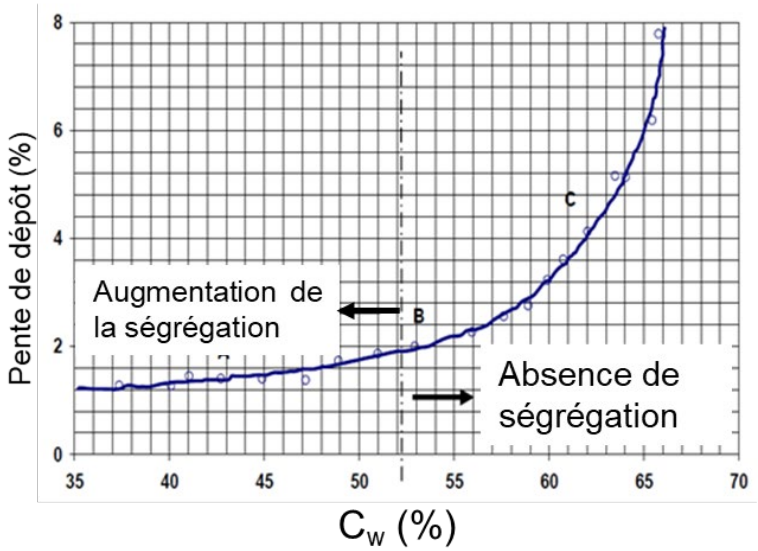


Figure 2.11 Variation de la pente de la plage de résidus ségrégant et non-ségrégant (Robinsky, 1978).

2.3.4 Impact de la ségrégation verticale sur les propriétés physiques

La Figure 2.12 montre les profils verticaux de la teneur en sable ou Sand content (SC) obtenus pour des essais de sédimentation en colonne réalisés par Mihiretu (2009). Ces essais étaient réalisés sur des pulpes formées de silice (180-250 µm), kaolinite (argile) et silt. Les valeurs initiales de FWR, SFR et C_w étaient variées lors des essais. Les particules de sable se déposent dans le fond de la colonne pendant que les particules fines se retrouvent dans les plateaux les plus hauts (Figure 2.12). Néanmoins, après séchage et tamisage, quelques particules de sable sont capturées dans les plateaux du haut de la colonne. Ce cas se présente quand les valeurs C_w et FWR sont faibles (FWR ≈ 10 %) (Figure 2.12a). Cela s'explique par les interactions électrochimiques entre les particules. En effet, la sédimentation de ces particules de sable se trouve entravée par la sédimentation lente de la portion fine qui les entoure (Mihiretu, 2009; Talmon, 2014). De plus, puisque les particules de sable sédimentent rapidement, c'est le seuil de cisaillement des fines qui commande la sédimentation dans la suspension (voir équation (2.4)). Lorsque FWR > 30 %, les essais réalisés révèlent aussi la présence des particules fines dans le bas de la colonne.

Plus la valeur de FWR augmente, plus les profils verticaux de SC ont une allure verticale, indiquant que la valeur de SC ne varie pas beaucoup dans toute la colonne. Par exemple, pour SFR = 1, SC varie de 5 à 80 % pour FWR = 10% et SC varie de 49 à 51 % pour FWR = 40 % (Figure 2.12a et Figure 2.12c). L'augmentation de FWR accroît la valeur de C_w et donc la densification des résidus. Ainsi, l'expérience démontre que l'augmentation des fines dans les résidus permet de minimiser la ségrégation (Mihiretu, 2009) en raison de propriétés rhéologiques (ex. augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité) que les fines confèrent aux résidus. Par ailleurs, le temps de sédimentation (temps nécessaire pour avoir une variation négligeable de SC au bas de la colonne) varie avec la densification de la pulpe. La sédimentation arrive au bout de quelques secondes pour FWR = 10 % et de 24 heures lorsque FWR = 40 (Figure 2.12a et c).

La Figure 2.13 montre l'impact du pourcentage de fines dans la pulpe et de l'hétérogénéité granulométrique des suspensions (avec un pourcentage initial C_w =33%) sur la ségrégation verticale pendant 15 min. Plus la granulométrie est hétérogène, plus la ségrégation est marquée. Lorsque la pulpe contient uniquement de l'argile, le profil vertical montre que la différentiation du sable dans la colonne est moins évidente et que la ségrégation diminue. Plus la proportion d'argile diminue, plus l'allure de la courbe change et le degré de ségrégation augmente.

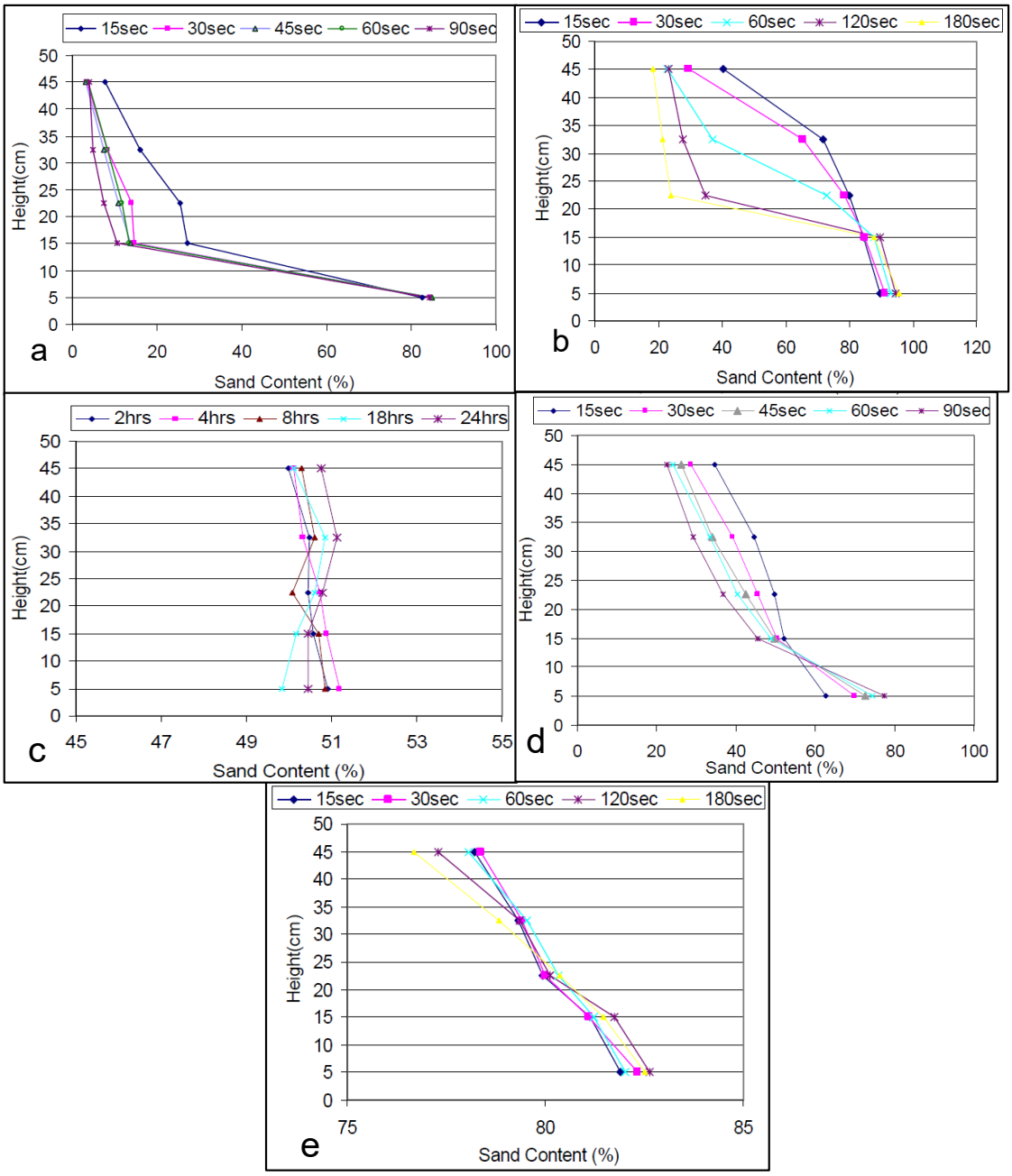


Figure 2.12 Profils verticaux de la teneur en sable SC à différentes périodes lors d'essais de sédimentation en colonnes de pulpes de sable, kaolinite et silt à différentes valeurs de FWR (%), SFR et C_w: a) FWR = 10, SFR = 1, C_w = 18,8 %; b) FWR = 10, SFR = 4, C_w = 35,7 %, c) FWR = 40, SFR = 1, C_w = 57,1 %, d) FWR = 15, SFR = 1, C_w = 26,1 % et e) FWR = 15, SFR = 4, C_w = 46,9 (Mihiretu, 2009)

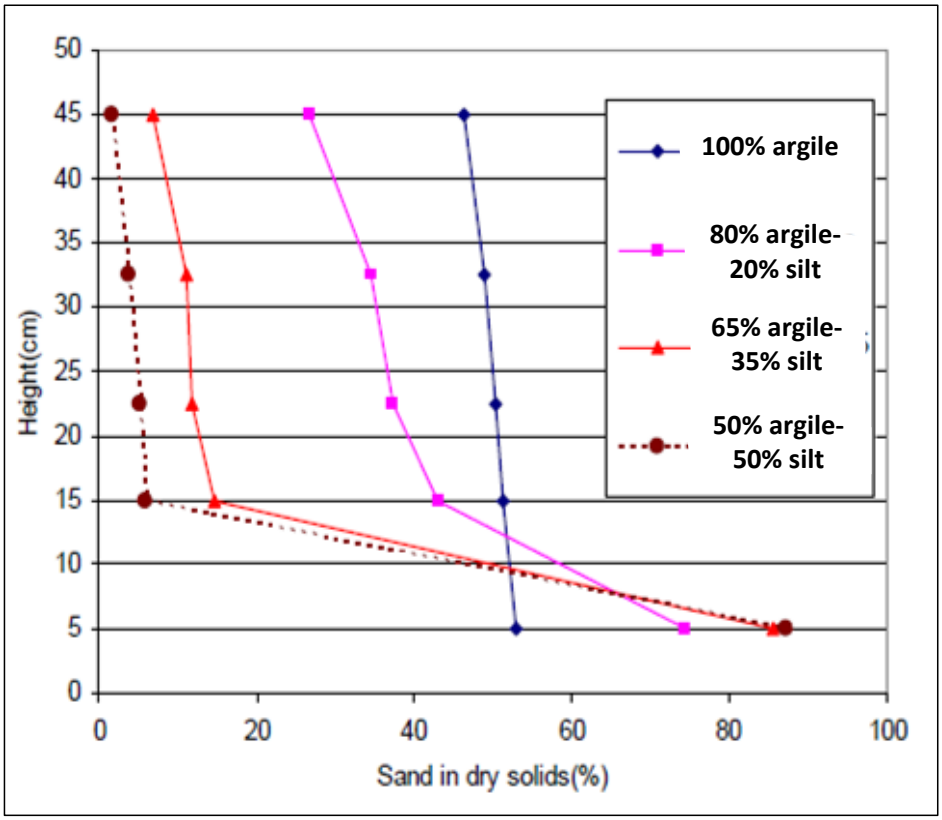


Figure 2.13 Profils de SC en fonction du pourcentage d'argile et de silt dans des suspensions avec C_w = 33,3% après 15 min de sédimentation (Mihiretu, 2009)

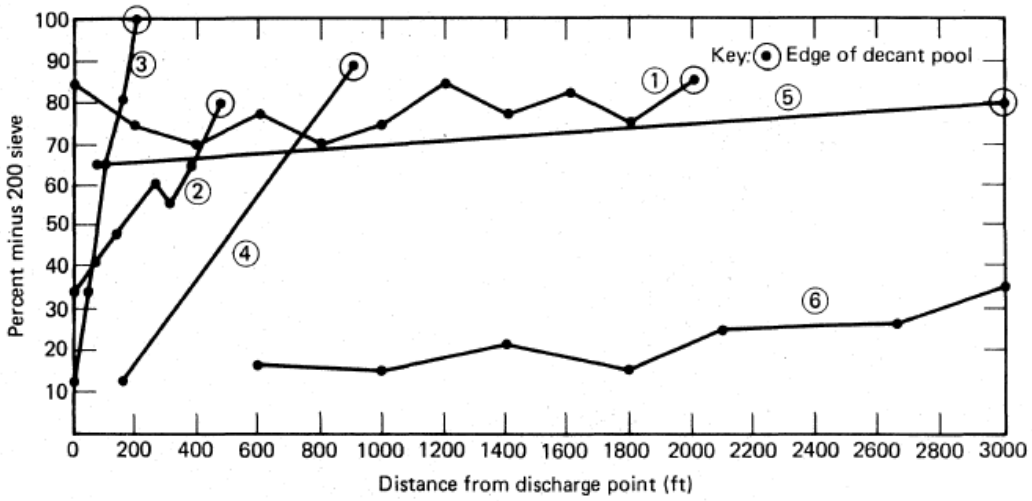
Finalement, Mihiretu (2009) montre que la ségrégation verticale d'une suspension est renforcée lors des essais de sédimentation en colonne lorsque :

- FWR diminue avec SFR constant (Figure 2.12a et Figure 2.12c)
- SFR diminue avec FWR constant (Figure 2.12a et Figure 2.12b)
- C_w diminue avec SFR constant (Figure 2.12a et Figure 2.12c)
- C_w est faible (Figure 2.12a, d, b, c et e)
- Le pourcentage de fines diminue avec C_w constant (Figure 2.13)
- La granulométrie est hétérogène (Figure 2.13)

2.3.5 Impact de la ségrégation transversale sur les propriétés physiques

La Figure 2.14 présente la distribution du pourcentage des particules fines des plusieurs types de résidus en fonction d'éloignement par rapport au point de dépôt (Vick, 1990). Le pourcentage des particules fines augmente avec la distance à partir du point de dépôt. Dans le cas de résidus à C_w =

30 % avec G_s = 2,7 et contenant 38 % de fines à la sortie de l'usine (courbe 4, seulement 12 % de fines à 200 m du point de dépôt tandis qu'à 900 m, il y a environ 90 % de fines. Dans un autre cas de résidus à C_w = 50 % avec G_s = 2,7 et contenant 60 % de fines à la sortie de l'usine (courbe 5), les particules fines sont présentes de manière homogène (entre 75 et 80 %) le long du parc à résidus miniers. Dans le cas de résidus à C_w < 40 %, avec G_s = 3,4 et contenant 75 % de fines à la sortie de l'usine (courbe 3), environ 12 % de fines sont proche du point de dépôt et 100 % de particules fines est atteint à seulement 200 m. Ces résultats indiquent que les valeurs initiales de G_s, C_w et du % de fines influencent la ségrégation transversale.



Curve	Tailings type	G	%–200, Mill discharge	Pulp density of mill discharge	Source
1	gold	–	–	–	Blight and Steffen, 1979
2	copper	2.7	45	45	Volpe, 1979
3	lead-zinc slimes	3.4	75	< 40	Unpublished
4	–	2.7	38	30	Soderberg and Busch, 1977
5	–	2.7	60	50	Soderberg and Busch, 1977
6	copper	3.0	–	–	Unpublished

Figure 2.14 Variation du pourcentage de particules fines en fonction de la distance au point de dépôt (Vick, 1990)

Blight & Steffen (1979) présentent la distribution de D_{50} (diamètre correspondant à 50% de passants sur la courbe granulométrique) des échantillons prélevés en différents repères à partir du point de dépôt dans des parcs à résidus de différentes mines (Figure 2.15). La courbe est représentée par le rapport $D_{50}/D_{50,max}$ en fonction de la distance par rapport au point de dépôt. $D_{50,max}$ est le diamètre médian des résidus à la sortie des conduites au moment du dépôt. La distribution de D_{50} peut être exprimée par la relation empirique ci-après (Blight & Steffen, 1979):

$$D_{50} = \left[\frac{C_1 \delta^{2/3} i}{KH}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.12}$$

C_1 est une constante, δ est la hauteur de la couche des résidus déposés, i est la pente de dépôt hydraulique, H est la distance d'un point à partir du point de dépôt et K est un paramètre lié aux caractéristiques rhéologiques et qui est propre à chaque type de résidus miniers. Ce dernier paramètre K peut être défini par la relation suivante (Blight & Steffen, 1979) :

$$K = \frac{C \times (\rho_s - \rho_w) \times g}{18\eta} \tag{2.13}$$

C est une constante, ρ_s [$M.L^{-3}$] est la masse volumique des particules solides, ρ_w [$M.L^{-3}$] est la masse volumique du fluide (eau), g [$L.T^{-2}$] est l'accélération gravitationnelle et η est la viscosité dynamique du fluide.

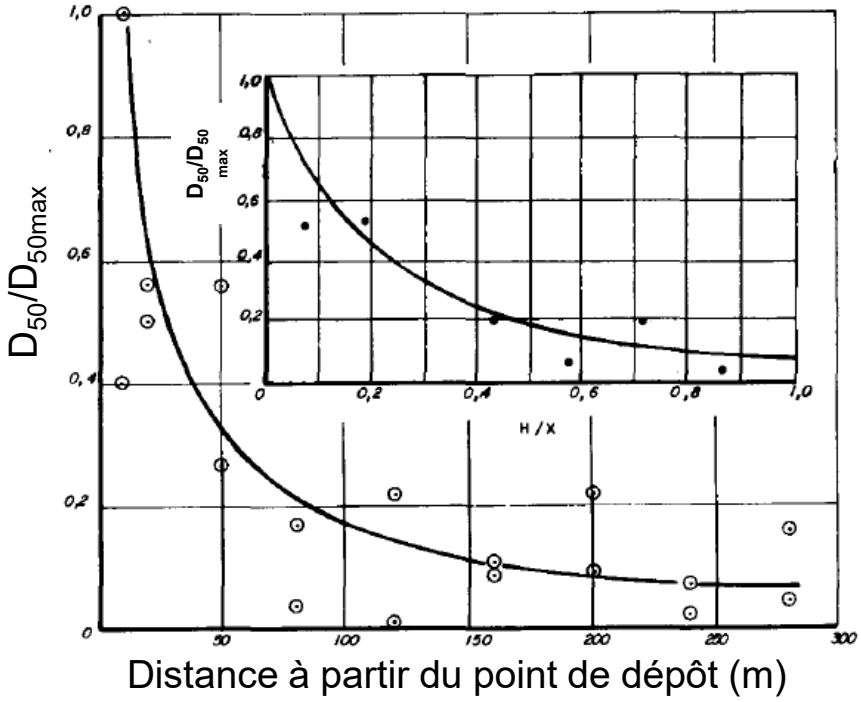


Figure 2.15 Distribution de la taille médiane des particules dominantes (D_{50}) le long de la distance du point de dépôt (tiré de Blight & Steffen (1979)).

La Figure 2.16 montre les courbes granulométriques des résidus Goldex sur une ligne d'échantillonnage de la couverture monocouche du site Manitou associée à la restauration par la technique de la nappe phréatique surélevée au niveau du parc 2 (Demers et al., 2017). Cette monocouche est faite de résidus Goldex non générateurs d'acide, déposés hydrauliquement à C_w =

50 %. Cette Figure montre une hétérogénéité de la granulométrie des résidus sur la ligne d'échantillonnage en question. L'échantillon 2.5, le plus proche de la digue (Figure 2.16a), est plus grossier (Figure 2.16b) que l'échantillon 2.1 (le plus éloigné du point de dépôt). Environ 480 m séparent le repère 2.1 du repère 2.5 (calcul de distance fait sur Google Earth). À partir des courbes granulométriques, le pourcentage de particules grossières (> 80 µm) passe d'environ 40 % au niveau de la plage (échantillons 2.5 et 2.4) à 3 % vers l'étang d'eau (échantillon 2.1).

Sur le site Canadian Malartic, les propriétés granulométriques des résidus épaissis ($C_w \approx 68$ %) ont été analysées sur 3 stations installées le long de la ligne de dépôt dans une cellule expérimentale bordée de 3 digues (Maqsoud et al., 2015). Les échantillons analysés ont été prélevés sur une distance de 15 m. Les courbes granulométriques n'ont montré aucune ségrégation et ce, sur une distance de 15 m à partir de la digue de dépôt. Cela est justifié par la densification des résidus (jusqu'à 68%) qui augmente l'homogénéité des résidus à travers le parc (Vick, 1990; Blight, 2010).

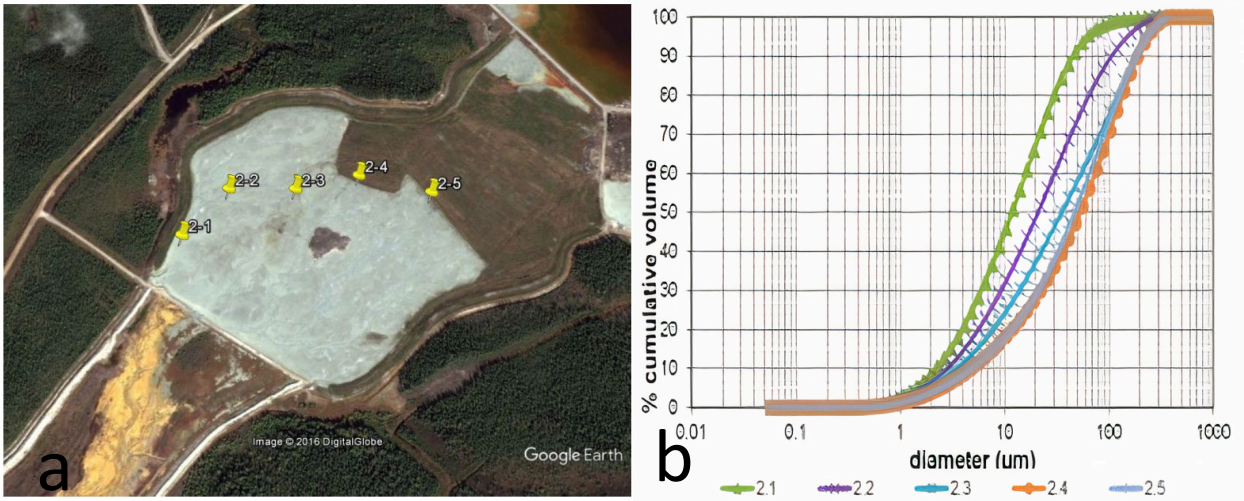


Figure 2.16 Échantillons prélevés sur la monocouche Goldex du parc 2 : a) Localisation des échantillons 2.1 et 2.5, b) Courbes granulométriques des échantillons 2.1 et 2.5 (Demers et al., 2017)

2.3.6 Impact de la ségrégation transversale sur la conductivité hydraulique saturée

Dans le cas d'une ségrégation bien marquée, la conductivité hydraulique saturée, sur le plan transversal, peut être de 3 à 5 ordres de grandeur supérieure dans les particules grossières que dans les particules fines (voir Figure 2.17). Par exemple, de 10^{-4} à 10^{-6} m/s dans les sables, de 10^{-6} à 10^{-}

^{9} m/s pour les particules de taille intermédiaire (silt et grains fins de sable) et de 10^{-9} à 10^{-11} m/s dans les argiles. Les particules de sable, silt et argile font référence aux classes granulométriques de la caractérisation des sols ASTM D2487-17.

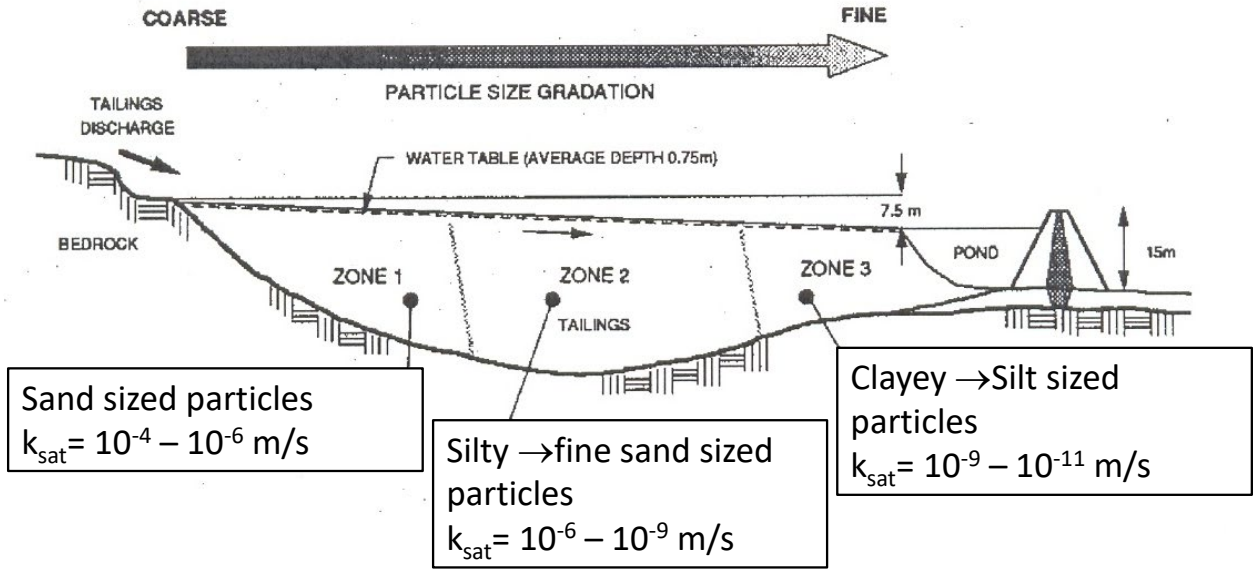


Figure 2.17 Distribution de la granulométrie des particules et de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} à travers un parc à résidus (adapté de MEND 2.17.1, 1996)

La conductivité hydraulique saturée mesurée en laboratoire (ASTM D5856-95, 2007) varie de 6,38 × 10^{-7} m/s (près du point de dépôt) à 5,2 × 10^{-8} m/s (loin du point de dépôt) sur la monocouche de résidus Goldex (Demers et al., 2017).

Les rejets miniers sont des mélanges de particules de diverses tailles et formes. L'anisotropie dans un parc à résidus peut découler de la ségrégation. La perméabilité peut varier dans toutes les directions. L'anisotropie hydraulique peut être liée à la variation de la taille des pores (Getzen, 1983), la granulométrie (Burger & Belitz, 1997). Du fait de l'hétérogénéité des rejets et la ségrégation, la conductivité hydraulique varie transversalement et verticalement dans un parc à résidus miniers. La Figure 2.18 montre la variation de la conductivité hydraulique saturée transversale (k_h) et verticale (k_v) avec la distance au point de dépôt pour deux types de résidus miniers. Les particules grossières près des digues ont une perméabilité plus élevée que les particules fines qui se retrouvent loin dans l'étang du parc. Sur le plan vertical, la perméabilité varie dans la profondeur en fonction de l'indice des vides et de la compressibilité des résidus. Le coefficient d'anisotropie varie de 2 à 10 pour des dépôts homogènes de sable près du point de dépôt

(Vick, 1990). Dans la zone intermédiaire du parc à résidus, l'anisotropie est plus marquée à cause de la superposition ou du mélange des particules fines et grossières (Vick, 1990).

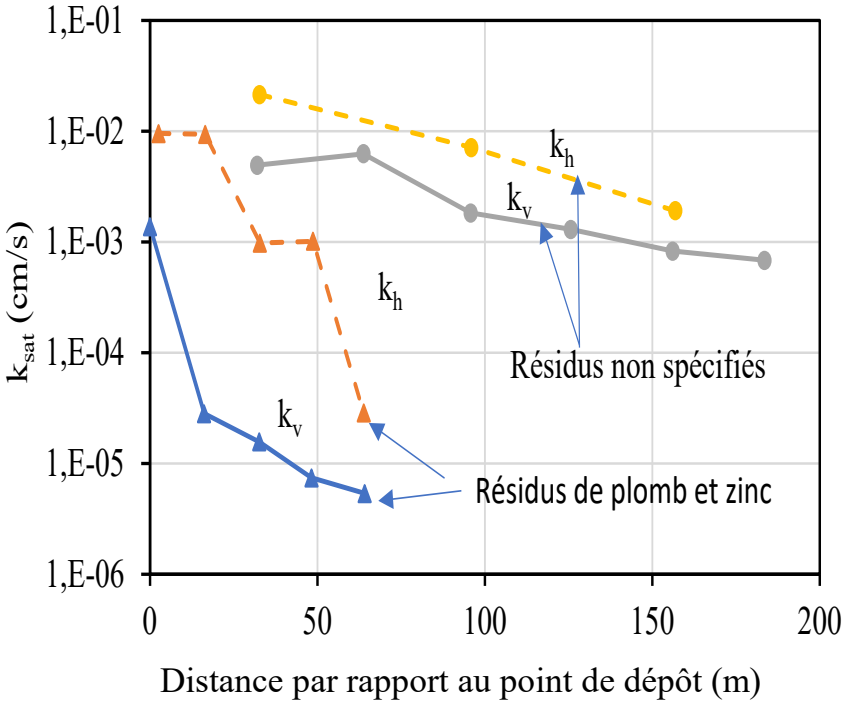


Figure 2.18 Variation de la conductivité hydraulique saturée transversale et verticale avec la distance au point de dépôt (adapté de Vick, 1990)

2.3.7 Impact de la ségrégation sur la technique de la nappe phréatique surélevée avec monocouche

La technique de la nappe phréatique surélevée (NPS) a pour objectif de limiter la diffusion de l'oxygène dans les résidus sulfureux réactifs en maintenant en permanence les résidus saturés ou proche de la saturation. En effet, le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène est 10000 fois inférieur dans l'eau que dans l'air (ex. Mbonimpa et al, 2003; Demers, 2008). La technique crée des conditions pour rehausser et contrôler le niveau de la nappe phréatique. La saturation des résidus réduit la diffusion de l'oxygène et donc limite la génération d'acide (Elberling et al., 1993; Elberling et Nicholson, 1996). Pour maintenir les résidus proches de la saturation, l'épaisseur des résidus au-dessus de la nappe phréatique ne doit pas dépasser la pression d'entrée d'air des résidus (Dagenais, 2005). Ouangrawa et al. (2009) fixe même la nappe phréatique à une profondeur (à partir de la surface des résidus) inférieure à la moitié de la pression d'entrée d'air des résidus.

La couverture monocouche combinée à la NPS permet de maintenir le niveau rehaussé de la nappe, indépendamment des saisons et des aléas du climat. La monocouche peut être faite de matériaux fins. La propriété requise est un degré de saturation élevé. Dans ce cas, la couverture joue le rôle de barrière à l'oxygène. Des résidus miniers non potentiellement générateurs d'acide (site Manitou-Goldex) ou des résidus désulfurés (site Detour Lake ou Doyon) peuvent être utilisés. Cependant, un risque élevé de perte d'eau par évaporation existe. Il est indiqué de rehausser davantage la nappe phréatique. De plus, si la monocouche est déposée hydrauliquement, la ségrégation peut intervenir et s'ajouter à celle des résidus sous-jacents.

L'impact de la ségrégation sur le niveau de la nappe phréatique peut impliquer une désaturation plus marquée dans la partie grossière que dans la partie fine. Cette désaturation peut affecter la performance de la technique de la NPS en favorisant la diffusion de l'oxygène vers les résidus générateurs d'acide. La différentiation granulométrique le long de la ligne de dépôt implique une variation des pressions d'entrée d'air (ψ_a) des résidus qui varie de 16 à 39 kPa sur la monocouche des résidus Goldex déposée hydrauliquement dans le parc 2 du site Manitou Goldex (Demers et al., 2017). La différence de ψ_a entre la fraction grossière et la fraction fine peut affecter les phénomènes d'infiltration, de drainage et d'évaporation dans la monocouche.

2.4 Préparation des résidus miniers non ségrégant

L'enjeu de la non-ségrégation est d'uniformiser les propriétés physiques et hydrogéotechniques des résidus sur le parc. Pour réduire la ségrégation et les conséquences y afférant, les recherches ont mené à l'association des résidus bitumineux aux floculants et coagulants (Jeeravipoolvarn, 2010) et la densification des résidus (Robinsky, 1999). Pour l'industrie des mines en roches dures, la densification est pratiquée à travers l'épaississement et la filtration des résidus. L'industrie des sables bitumineux a opté pour la production des résidus non ségrégant.

2.4.1 Ajout des floculants et coagulants

Les résidus bitumineux sont composés de sable, d'argile, de silt et de bitume. Une stratégie pour rendre non ségrégant les résidus de sable bitumineux de l'Alberta est l'ajout des floculants et des coagulants comme la chaux ou le gypse (Azam et Scott, 2005). Les floculants favorisent les liaisons chimiques entre les particules. Les coagulants modifient les propriétés de la suspension de sorte que même à faible pourcentage solide massique, il n'y a pas sédimentation des particules de sable

au repos. Les coagulants permettent aussi d'agglomérer les résidus fins. Pour commencer, les résidus bitumineux subissent une séparation par hydrocyclone. La sousverse est ensuite associée aux MFT (Mature Fine Tailings) et au gypse avant d'être déposée dans les parcs à résidus. L'expérience a montré que la conductivité hydraulique et la résistance au cisaillement étaient augmentées sur le parc (Jeeravipoolvarn, 2010). La surverse, constituée de particules fines en suspension, est déposée dans les bassins de décantation. Pour augmenter la vitesse de consolidation, $P_{80} < 20$ % est requis dans la surverse. Après leur consolidation, la surverse devient MFT et est intégrée dans la gestion cyclique des résidus. Les sables bitumineux non ségrégant sont pompables à condition que $C_w = 68$ % et $10 < P_{80} < 20$ % (Jeeravipoolvarn, 2010).

2.4.2 Densification des résidus

Plusieurs compagnies minières recourent à la densification des résidus en pulpe avant leur stockage dans les aires d'accumulation. La densification est l'accroissement du pourcentage solide massique par retrait d'eau dans la pulpe. Les avantages de la densification sont l'homogénéité des résidus dans le parc et l'augmentation de la pente de dépôt, de la résistance au cisaillement, de la capacité portante des résidus et de la capacité de stockage du parc à résidus. Le Tableau 2.1 présente les caractéristiques des résidus densifiés (résidus épaissis, en pâte et filtrés).

Tableau 2.1 Caractéristiques des résidus épaissis (Aubertin et al., 2002; *Cooke, 2006)

Catégories de résidus	Épaissis	Pâte	Filtrés
Méthode de densification	Épaississeur	Épaississeur et disque filtrant	Épaississeurs et presse filtrante
Transport (écoulement)	Pompes centrifuges	Pompe à déplacement positif	Camion ou convoyeur
C_w	50 - 70 %	70 - 85 %	> 85 %
Consistance	Fluide visqueux	Pâte visqueuse	Sec
Pente de dépôt	1 % - 3 %	5 % - 17 %	5 % - 17 %
*Seuil de cisaillement (lors du transport)	50 – 100 Pa	100 – 800 Pa	
Régime d'écoulement	Laminaire	Laminaire	
Empilement des résidus	Homogène	Homogène	Homogène

2.5 Récapitulatif et justification de l'étude

La revue de littérature ci-dessus présente des paramètres qui contrôlent la sédimentation et la ségrégation transversale des résidus miniers en pulpe (ou non suffisamment densifiés) pour être non ségrégant. Plusieurs paramètres permettent de quantifier l'effet de la ségrégation en comparant ceux des résidus au bout du tuyau et ceux des résidus déposés. Des essais simples (essais statiques en colonne) ou complexe (essais dynamiques dans le canal d'écoulement ou dans une cellule de cisaillement) permettent de définir les conditions rhéologiques et hydrodynamiques de ségrégation/non ségrégation.

La ségrégation peut provoquer une variabilité des propriétés physiques, hydrogéotechniques, chimiques et minéralogiques des résidus à travers le parc à résidus. Le comportement et la performance de certaines méthodes de restauration des parcs à résidus ségrégués, incluant la technique de la nappe phréatique surélevée (NPS), peuvent être affectés. Lorsque la couverture monocouche, associée à la NPS, est constituée de résidus non potentiellement générateurs d'acide qui sont déposés hydrauliquement, une ségrégation peut aussi survenir dans cette couche. Le design de ces méthodes de restauration requiert alors de prendre en compte cette variabilité spatiale des propriétés. Il devient alors crucial d'évaluer préalablement l'ampleur de cette variabilité des propriétés à travers les parcs à résidus. C'est l'objectif de cette étude qui vise à évaluer l'ampleur de la ségrégation sur deux parcs à résidus inactifs situés dans la région de l'Abitibi à travers l'analyse de la granulométrie, la minéralogie et des propriétés hydrogéotechniques.

Cette étude est l'une des phases d'un projet RDC (Recherche et développement coopérative) qui vise à :

- Évaluer l'ampleur de la ségrégation dans des parcs existants en termes de variabilité des propriétés;
- Étudier l'impact de la ségrégation des résidus miniers sur la performance de la technique de NPS combinée à une couverture monocouche;
- Comprendre les conditions physico-rhéologiques et hydrodynamiques de ségrégation des résidus à l'aide d'essais en laboratoire et sur le terrain, dans le but de proposer un critère robuste de non-ségrégation.

CHAPITRE 3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ci-après sont présentés les sites d'étude, les matériaux échantillonnés, la préparation des résidus en laboratoire et la méthodologie des analyses réalisées sur les échantillons de résidus.

3.1 Sites d'étude

Ce projet porte sur le parc 3 du site Manitou/Goldex et le parc 3 Est du site Doyon/Westwood. Des échantillons de résidus miniers ont été prélevés au niveau de plusieurs stations sur ces sites afin de les caractériser au laboratoire.

3.1.1 Site Manitou/Goldex

Le site Manitou/Goldex est situé à 15 km au Sud-Est de Val-d'Or en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada. Le site contenait un gisement polymétallique de zinc, argent, plomb, cuivre et or. Son exploitation minière a débuté en 1942 et s'est achevée en 1979. Les résidus étaient déposés sans confinement adéquat au cours de l'exploitation (Éthier, 2018). Le site a connu plusieurs ruptures de digue (dans les années 1972, 1976, et entre 1987-1988) qui ont répandu des millions de tonnes de rejets miniers générateurs d'acide dans l'environnement (Éthier, 2018). Ces déversements ont contaminé, pendant plus de 30 ans, le lit du ruisseau Manitou et la rivière Bourlamaque (Tassé & Germain, 1999; Aubertin et al., 1999b; Bussière et al., 2008; Bussière et al., 2011; Éthier, 2018). À partir de 2003, le site a été pris en charge par le ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec à cause des problèmes financiers qu'a subi l'entreprise propriétaire à ce moment-là (Éthier, 2018). À l'issu de diverses études sur le site Manitou, un plan de restauration a été proposé conjointement avec la mine Goldex de la compagnie minière Mines Agnico Eagle Ltée (Demers et al., 2013; Éthier, 2018). À partir de 2006, des travaux de configuration du site Manitou aboutissent à 4 parcs à résidus miniers nommés parc 1, parc 2, parc 3 et parc 4 tel que présenté à la Figure 3.1. Le parc 1 est situé en hauteur et les autres parcs étaient des zones d'épanchement des résidus Manitou lors de leur déversement. Depuis 2008, les travaux de restauration du site ont commencé. Sur le parc 1, une couverture avec effet de barrière capillaire est en cours de construction. La restauration selon la technique de la nappe phréatique surélevée avec une monocouche de résidus Goldex (des résidus non générateurs d'acide) a été complétée sur les parcs 2, 3 et 4. La monocouche a été déposée sous forme de pulpe à 50% (Ethier et al., 2018). Le parc 3, dont le recouvrement était exempt de végétation au moment des travaux en 2019, a été

choisi comme site d'étude. D'une superficie de 23 ha, le parc 3 est bordé de 2 digues longitudinales et de 2 digues transversales qui la séparent des parcs 2 et 4. La pente entre les digues longitudinales est d'environ 0,7 %. Les détails sur l'échantillonnage des résidus sont donnés à la section 3.2.

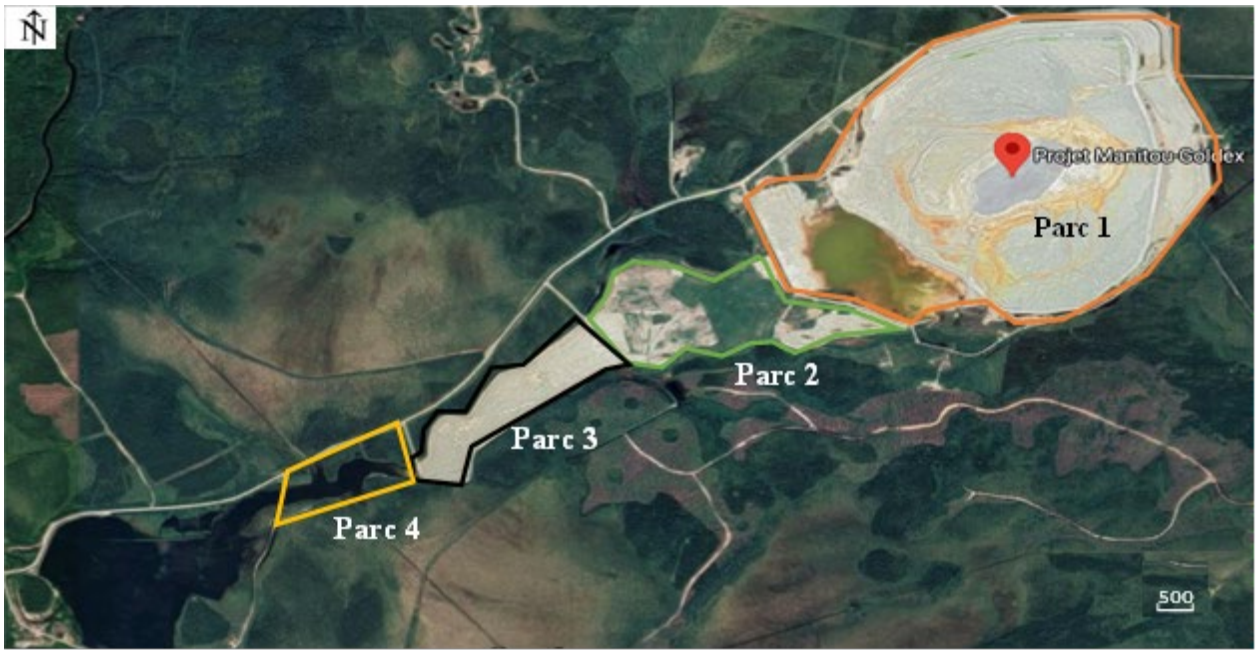


Figure 3.1 Image satellitaire des parcs à résidus 1, 2, 3 et 4 du site Manitou/Goldex (le parc 3 fait l'objet de cette étude)

3.1.2 Site Doyon/Westwood

Le site Doyon/Westwood est situé à 40 km à l'Est de Rouyn-Noranda en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada. La géologie et l'historique de la mine Doyon sont données par Savoie et al. (1991) et Lafrance et al. (2003). Le site minier Doyon est situé dans la ceinture aurifère des cantons Cadillac et Bousquet. Il a été exploité pour la production d'or de 1978 à 2010 (Demers et al., 2015a). La minéralisation d'or de la mine Doyon est incluse dans des veines de quartz-pyrite et des veines de quartz-pyrite-chalcopyrite (Savoie et al., 1991; Lafrance et al., 2003). L'exploitation a d'abord été à ciel ouvert, puis elle est devenue entièrement souterraine à partir de 1989. Ce site a été exploité par plusieurs compagnies avant de devenir, depuis 2006, une propriété de la Corporation IAMGOLD. En 2010, la mine Doyon et la mine Mouska (qui appartient au même canton et à IAMGOLD) avaient généré 22 millions et cent mille tonnes de résidus miniers et de boues (Coulibaly, 2016). Les boues provenaient du traitement actif des eaux

contaminées par le drainage minier acide. Les boues avaient été déposées avec les résidus dans les parcs lorsque les deux bassins dédiés à l'entreposage des boues (Bassin B et Bassin Nord) avaient atteint leur capacité maximale de stockage (Demers et al., 2015a). La Figure 3.2 montre une image satellitaire des trois parcs utilisés pour l'entreposage des résidus sur le site Doyon. Le parc 3 est scindé en parc 3 Ouest et parc 3 Est séparés par une digue médiane (Figure 3.2).

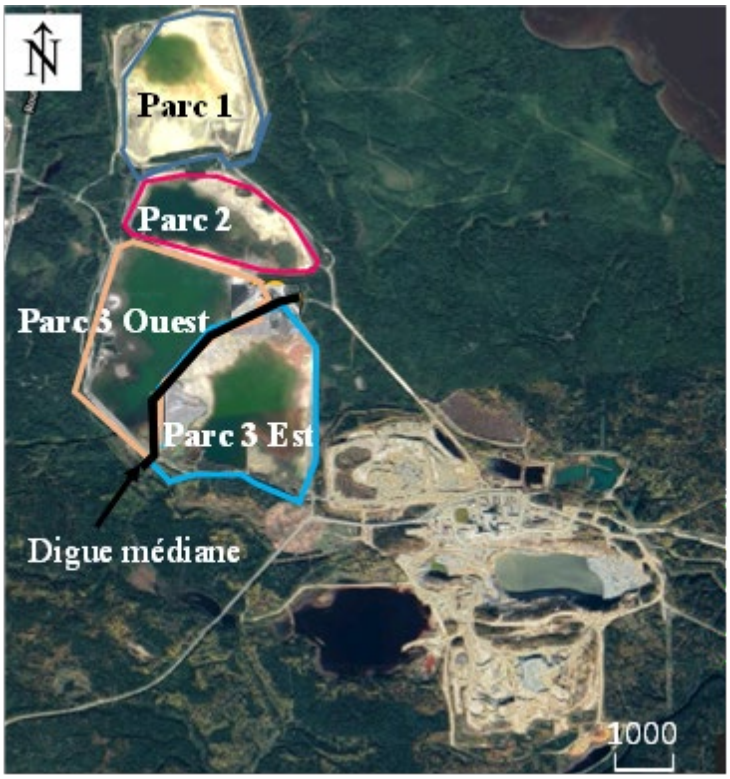


Figure 3.2 Image satellitaire des parcs 1, 2, 3 Ouest et 3 Est du site Doyon (le parc 3 Est fait l'objet de cette étude)

Les résidus furent déposés dans les parcs à un pourcentage solide massique variant entre 43 et 45 % (Demers, 2008). À la sortie de l'usine de concentration, la minéralogie des résidus comprenait en moyenne du quartz (50 %), de la muscovite (25 %), de l'albite (7 %), de la pyrite (6,5 %), de la chlorite (3,8 %), de l'actinolite (3,8 %), de la calcite (2,5 %) et de la dolomite (0,56 %) (Demers et al., 2008). Les pourcentages de quelques éléments chimiques sont donnés dans le Tableau 3.1. Les résidus à la sortie de l'usine de concentration sont sulfureux (Miller et al., 1991; Demers et al., 2008). Le pourcentage de soufre total est de 3,6 %. Le potentiel de neutralisation net de la calcite et de la dolomite est négatif (PNN = -87 kg $CaCO_3$/t) (Demers et al., 2008). Cette valeur de PNN

étant inférieure à -20 kg $CaCO_3$/t, ces résidus ont un potentiel de génération d'acide selon la Directive 019 sur l'industrie minière (MDDEP, 2012).

C'est sur le parc 3 Est que cette étude s'est concentrée. Le dépôt des résidus a pu Plus de détails sur l'échantillonnage sont donnés à la section 3.2.

Tableau 3.1 Quelques caractéristiques chimiques des résidus Doyon à la sortie de l'usine de concentration (Demers et al., 2008)

Éléments chimiques	Fe	Zn	Cu	S	Ca
Pourcentage massique	4,8	0,0013	0,063	3,6	1,3

3.2 Échantillonnage des résidus

3.2.1 Méthodologie

La méthodologie du projet requiert le prélèvement des résidus sur au moins 1 m en-dessous de la surface des résidus. Le plan d'échantillonnage des résidus a été fait en tenant compte de la géométrie de chaque parc. Les résidus ont été échantillonnés au niveau des stations localisées en tenant compte de la configuration et l'accessibilité de chaque parc à résidus. Initialement, le prélèvement était prévu par forage manuel avec tubage. L'échantillonneur par battage de AMS Inc. a semblé convenir à la tâche. Cependant, sur le terrain, l'équipement n'a pas permis d'acquérir les échantillons sur plus de 30 cm en-dessous de la surface des résidus. Des cylindres en ABS (Acrylonitrile butadiène styrène) très solides et résistants aux chocs ont donc été utilisés. Le diamètre intérieur du cylindre est de 10,5 cm et la longueur est de 125 cm. Les cylindres ont été enfoncés dans les résidus grâce au godet d'une pelle mécanique sur le site Manitou et à l'aide d'un marteau piqueur sur le site Doyon (Figure 3.3). Trois cylindres ont été insérés l'un à côté de l'autre pour chaque station afin de récupérer une quantité de résidus suffisante pour réaliser les essais prévus et d'assurer une bonne représentativité des échantillons (Figure 3.4b). Les cylindres des stations ont été excavés avec une pelle mécanique (Figure 3.4a). À l'observation des tranchées après l'excavation, le recouvrement monocouche fait des résidus Goldex du parc 3 (site Manitou /Goldex) était plus homogène au niveau macroscopique (Figure 3.5a) que les résidus du parc 3 Est Doyon du fait de la présence de couches de couleurs différentes (Figue 3.5b). La présence de strates de résidus peut témoigner des séquences de dépôt sur le parc 3 Est Doyon.

Figure 3.3 Insertion des cylindres avec : a) le godet d'une pelle mécanique (site Manitou) et b) un marteau piqueur (site Doyon) (photos de l'auteure)

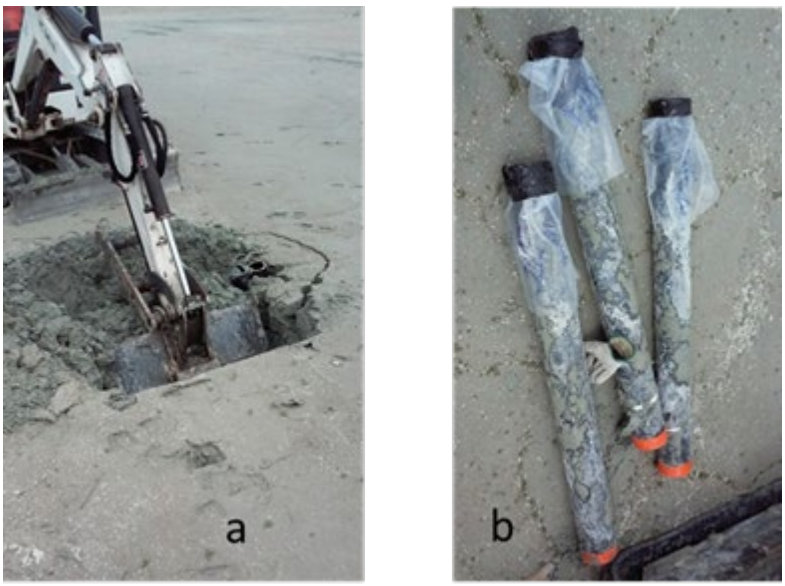


Figure 3.4 Échantillonnage des résidus : a) Excavation des cylindres b) Cylindres pleins de résidus (photos de l'auteure)

La documentation de la mine sur les séquences de dépôt peut permettre de confirmer les épaisseurs des couches délimitées dans cette étude, mais aussi les couleurs par les caractéristiques chimiques et minéralogiques des résidus au moment du dépôt. Les cavités créées par l'excavation furent bouchées. Les cylindres pleins ont été fermés, identifiés, et transportés au laboratoire.

Pour le parc 3 Est Doyon, des résidus ont été prélevés en vrac en surface en vue de réaliser les essais hydrogéotechniques en laboratoire. Pour le parc 3 Manitou, aucun essai hydrogéotechnique n'a été réalisé.

Figure 3.5 Description des couches de résidus : a) absence de strates sur la monocouche du parc 3 Manitou/Goldex; b) présence de strates sur le parc 3 Est Doyon (photos de l'auteure)

3.2.2 Stations d'échantillonnage sur le parc 3 du site Manitou/Goldex

Les travaux d'échantillonnage ont commencé en juin 2019 sur la monocouche de résidus Goldex NPGA du parc 3 du site Manitou/Goldex. L'échantillonnage s'est déroulé sur plusieurs jours. Les 12 stations ont été réparties sur 3 rangées (Figure 3.6). Les rangées R1, R2 et R3 sont orientées NO-SE. Les stations sont notées en R_xS_y, où x et y sont les numéros respectifs de la rangée (R) allant de 1 à 3 et de la station (S) allant de 1 à 4. S1 et S4 sont les stations les plus proches des digues. S2 et S3 sont les stations intermédiaires des rangées. La distance moyenne entre 2 stations consécutives d'une rangée est de 49 m pour la rangée R1, 39 m pour la rangée R2 et 52 m pour la rangée R3.

La distribution des paramètres peut être évaluée dans 2 directions : transversale (le long des rangées) et longitudinale (le long des lignes). La direction transversale est la direction de dépôt présumée. Le dépôt a pu être effectué à partir de la digue latérale qui sépare le parc 2 du parc 3 Manitou/Goldex. Quatre lignes divisent la zone d'échantillonnage. Les lignes 1, 2, 3 et 4 regroupent respectivement les stations S1, S2, S3 et S4 des trois rangées.

Figure 3.6 Stations d'échantillonnage des résidus Goldex sur le parc 3 du site Manitou/Goldex (stations placées sur une image satellitaire)

3.2.3 Stations d'échantillonnage sur le parc 3 Est du site Doyon/Westwood

Les travaux d'échantillonnage ont commencé en juillet 2019 sur le parc 3 Est du site Doyon/Westwood. La superficie du parc 3 Est de Doyon/Westwood est d'environ 75 ha dont 36 ha étaient recouverts d'eau durant la période d'échantillonnage. La zone d'échantillonnage est bordée d'une digue médiane (direction Sud-Ouest) et de la digue 1 (direction Sud-Est). La rangée R1 est orientée N-S et les rangées R2 et R3 sont orientées NE-SO. L'échantillonnage sur le parc 3 Est s'est également déroulé sur plusieurs jours. Finalement 11 stations réparties sur trois rangées ont été prélevées sur le parc 3 Est (Figure 3.7). Les stations sont ici aussi notées en R_xS_y, où x et y sont les numéros respectifs de la rangée (R) allant de 1 à 3 et de la station (S) allant de 1 à 4. S1 est

la station la plus proche des digues et S4 en est la plus éloignée pour les rangées 1 et 2. S3 est la station extrême de la rangée 3. Il n'y a pas de 4ème station sur la rangée 3 (R3S4) parce que cet endroit du parc était difficilement accessible (trop proche de l'étang d'eau). La pente de la zone d'échantillonnage est relativement nulle. La distance entre les stations S1 des rangées R1 et R2 et des rangées R2 et R3 était respectivement de 88 m et de 91 m. L'écart moyen entre 2 stations consécutives d'une rangée est de 25 m pour la rangée R1, 23 m pour la rangée R2 et 18 m pour la rangée R3.

La distribution des paramètres peut être évaluée dans la direction transversale, c'est-à-dire le long des rangées, et dans la direction longitudinale ou le long des lignes. La direction transversale est la direction de dépôt supposée. Le dépôt a pu être réalisé à partir de la digue 1. Dans la direction longitudinale, le dépôt a pu être fait à partir de la digue médiane. La zone d'échantillonnage a été divisée en 4 lignes. Les lignes 1, 2, 3 et 4 regroupent respectivement toutes les stations S1, S2, S3 et S4.

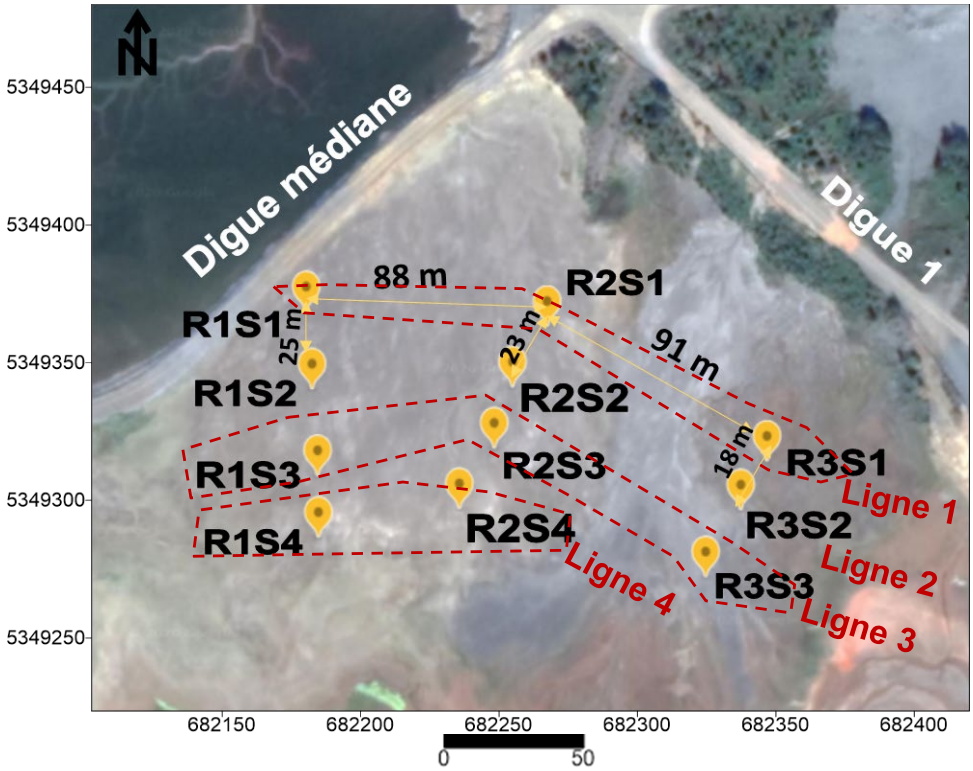


Figure 3.7 Stations d'échantillonnage des résidus sur le parc 3 Est Doyon (stations placées sur une image satellitaire)

3.3 Préparation des résidus en laboratoire

3.3.1 Conditionnement des résidus

Les cylindres pleins d'échantillons ont été conservés dans une chambre froide conditionnée à une température de 0°C pour un essai en cours à ce moment-là. L'impact de la température sur les résidus de Doyon et Goldex n'a pas été évalué. Le but était de congeler les résidus en vue de faciliter le découpage des échantillons par intervalle sans perte d'eau et de particules fines. La chambre froide a aussi servi de lieu de stockage pour les cylindres en attendant les travaux de caractérisation des résidus au laboratoire.

3.3.2 Observation des couches de résidus

La monocouche de résidus Goldex ne présentait pas d'hétérogénéité sur le parc 3 Manitou. Les cylindres du parc 3 Manitou ont été découpés directement par intervalle d'environ 10 cm, avec une scie circulaire. Dans le cas de la mine Doyon, les résidus présentaient des couches de couleur différente (Figure 3.8) et donc les cylindres ont été fendus latéralement avec la scie circulaire.

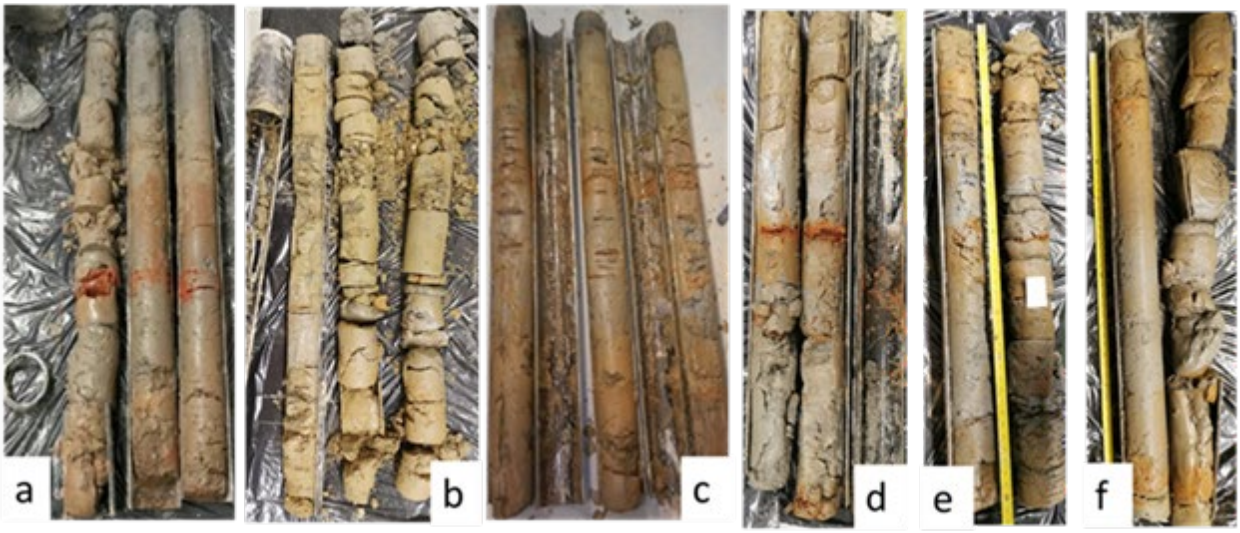


Figure 3.8 Apparence typique des résidus échantillonnés sur le parc 3 Est du site Doyon /Westwood sur des stations : a) R3S2, b) R3S3, c) R2S1, d) R1S2, e) R1S3, f) R1S4

Des lamelles de résidus de couleur ocre, épaisses de 1 à 5 cm, étaient situées à partir de 40 cm de la surface jusqu'à 90 cm dépendamment des stations. La première lamelle se trouve à partir de la surface à environ 70 cm sur la rangée 1, 50 cm sur la rangée 2 et 40 cm de la rangée 3. La Figure

3.9 montre les profils macroscopiques verticaux des matériaux en fonction des couleurs dans chaque station des 3 rangées. De la surface à environ 40 cm, les résidus sont de couleur marron sur toutes les stations. De 40 à 90 cm, une alternance de résidus marron, gris et ocre est observée. De 90 cm jusqu'au fond, les résidus étaient gris sur la rangée 1 et marron sur les rangées 2 et 3. Des hétérogénéités internes de nature indéterminée sont aussi observées au sein de quelques échantillons découpés (Figure 3.10).

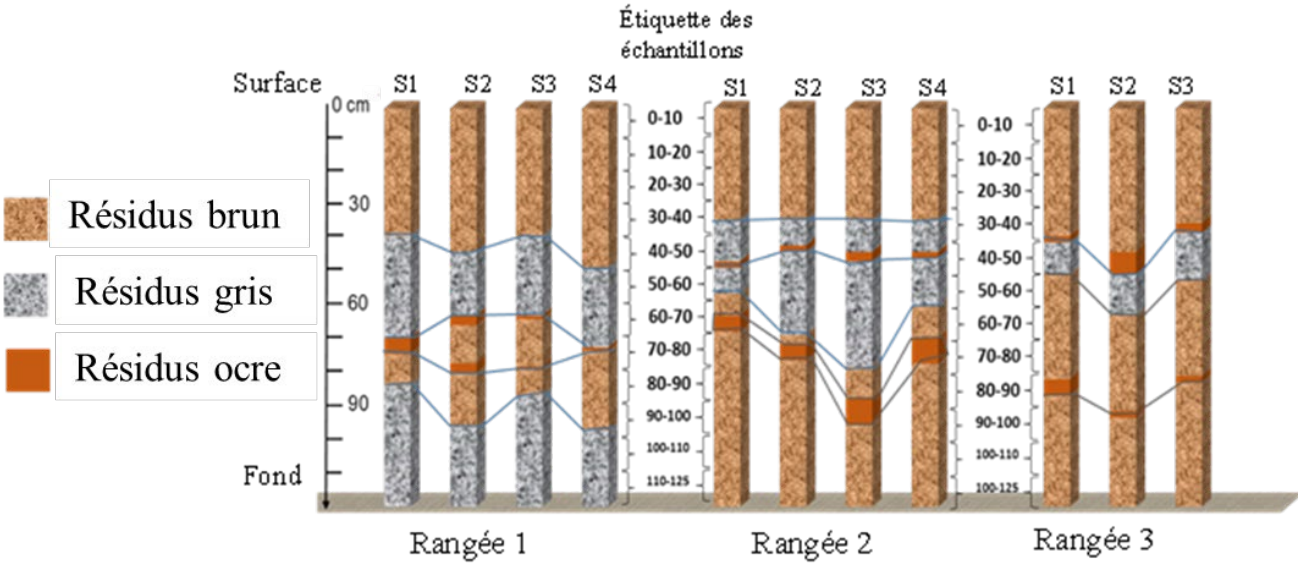


Figure 3.9 Profils verticaux des carottes de résidus du parc 3 Est du site Doyon/Westwood pour les trois rangées d'échantillonnage

Figure 3.10 Exemples d'hétérogénéités internes aux morceaux de résidus

3.3.3 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons a débuté par le découpage des cylindres des deux parcs à résidus par intervalle d'environ 10 cm, tout en tenant compte des strates dans le cas particulier des résidus du parc 3 Est de la mine Doyon/Westwood. Chaque morceau de résidus est repéré par rapport à la surface du cylindre, suivant l'échelle de longueur. Pour le parc 3 de la mine Manitou, chaque cylindre comptait 10 à 11 morceaux de résidus, soit 31 échantillons en moyenne pour une station. Chaque cylindre du parc 3 Est de la mine Doyon comptait 10 à 12 morceaux de matériaux. Les 12 morceaux correspondent donc successivement aux niveaux 1 à 12. À chaque niveau est associée une étiquette correspondant à la profondeur de la couche par rapport à la surface du parc.

Ensuite, pour chaque site d'étude, des morceaux d'échantillons correspondant à un même niveau sur les 3 cylindres récupérés sur une même station ont été fusionnés. En fin de compte, entre 10 et 12 échantillons combinés ont été préparés par station. Le Tableau 3.2 présente le nombre d'échantillons collectés par station pour les 2 parcs. Les Tableau 3.3 et Tableau 3.4 présentent les étiquettes des échantillons de résidus respectivement pour les deux sites d'étude.

Par la suite, la moitié de chaque échantillon a été récupérée à l'aide d'une spatule. Environ 2 kg de chaque échantillon ont été mis à l'étuve à 50°C pendant plusieurs jours pour leur séchage. Les lamelles de résidus ocre ont été isolées à cette étape. Aucune caractérisation physique ou minéralogique ou chimique n'a été réalisée sur ces lamelles.

Après le séchage, la préparation des résidus consistait en l'homogénéisation par quartage et le prélèvement d'environ 100 g d'échantillons homogénéisés et représentatifs pour chacune des caractérisations physique, chimique et minéralogiques qui ont suivi. Les caractérisations ont été faites par niveau selon les étiquettes de chaque échantillon. Aucune analyse chimique, minéralogique, morphologique et texturale n'a été réalisée de manière spécifique pour caractériser les hétérogénéités internes.

Tableau 3.2 Nombre d'échantillons collectés pour chaque station sur les sites d'étude

Station	R1S1	R1S2	R1S3	R1S4	R2S1	R2S2	R2S3	R2S4	R3S1	R3S2	R3S3	R3S4	Total
Parc 3 Est Doyon	12	10	10	10	10	12	12	12	12	11	10	/	121
Parc 3 Manitou/ Goldex	11	11	10	11	10	11	10	10	11	11	10	10	126

Tableau 3.3 Étiquettes apposées sur les échantillons de résidus Goldex en fonction de la profondeur par rapport à la surface du parc 3 Manitou

		R1 GOLDEX				R2 GOLDEX				R3 GOLDEX			
NIVEAU	**Profondeur (cm)**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
1	0-10	R1S11	R1S21	R1S31	R1S41	R2S11	R2S21	R2S31	R2S41	R3S11	R3S21	R3S31	R3S41
2	10-20	R1S12	R1S22	R1S32	R1S42	R2S12	R2S22	R2S32	R2S42	R3S12	R3S22	R3S32	R3S42
3	20-30	R1S13	R1S23	R1S33	R1S43	R2S13	R2S23	R2S33	R2S43	R3S13	R3S23	R3S33	R3S43
4	30-40	R1S14	R1S24	R1S34	R1S44	R2S14	R2S24	R2S34	R2S44	R3S14	R3S24	R3S34	R3S44
5	40-50	R1S15	R1S25	R1S35	R1S45	R2S15	R2S25	R2S35	R2S45	R3S15	R3S25	R3S35	R3S45
6	50-60	R1S16	R1S26	R1S36	R1S46	R2S16	R2S26	R2S36	R2S46	R3S16	R3S26	R3S36	R3S46
7	60-70	R1S17	R1S27	R1S37	R1S47	R2S17	R2S27	R2S37	R2S47	R3S17	R3S27	R3S37	R3S47
8	70-80	R1S18	R1S28	R1S38	R1S48	R2S18	R2S28	R2S38	R2S48	R3S18	R3S28	R3S38	R3S48
9	80-90	R1S19	R1S29	R1S39	R1S49	R2S19	R2S29	R2S39	R2S49	R3S19	R3S29	R3S39	R3S49
10	90-100	R1S110	R1S210	R1S310	R1S410	R2S110	R2S210	R2S310	R2S410	R3S110	R3S210	R3S310	R3S410
11	100-110	R1S111	R1S211	R1S311	R1S411	R2S111	R2S211	R2S311	R2S411	R3S111	R3S211	R3S311	/
12	110-125	/	R1S212	/	/	R2S112	/	R2S312	/	/	R3S212	/	/

Tableau 3.4 Étiquettes apposées sur les échantillons de résidus Doyon en fonction de la profondeur par rapport à la surface du parc 3 Est du site Doyon/Westwood

		R1 DOYON				R2 DOYON				R3 DOYON		
NIVEAU	**Profondeur (cm)**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S1**	**S2**	**S3**
1	0-10	R1S11	R1S21	R1S31	R1S41	R2S11	R2S21	R2S31	R2S41	R3S11	R3S21	R3S31
2	10-20	R1S12	R1S22	R1S32	R1S42	R2S12	R2S22	R2S32	R2S42	R3S12	R3S22	R3S32
3	20-30	R1S13	R1S23	R1S33	R1S43	R2S13	R2S23	R2S33	R2S43	R3S13	R3S23	R3S33
4	30-40	R1S14	R1S24	R1S34	R1S44	R2S14	R2S24	R2S34	R2S44	R3S14	R3S24	R3S34
5	40-50	R1S15	R1S25	R1S35	R1S45	R2S15	R2S25	R2S35	R2S45	R3S15	R3S25	R3S35
6	50-60	R1S16	R1S26	R1S36	R1S46	R2S16	R2S26	R2S36	R2S46	R3S16	R3S26	R3S36
7	60-70	R1S17	R1S27	R1S37	R1S47	R2S17	R2S27	R2S37	R2S47	R3S17	R3S27	R3S37
8	70-80	R1S18	R1S28	R1S38	R1S48	R2S18	R2S28	R2S38	R2S48	R3S18	R3S28	R3S38
9	80-90	R1S19	R1S29	R1S39	R1S49	R2S19	R2S29	R2S39	R2S49	R3S19	R3S29	R3S39
10	90-100	R1S110	R1S210	R1S310	R1S410	R2S110	R2S210	R2S310	R2S410	R3S110	R3S210	R3S310
11	100-110	R1S111	R1S211	R1S311	R1S411	R2S111	/	R2S311	R2S411	R3S111	R3S211	R3S311
12	110-125	/	R1S212	R1S312	R1S412	/	/	R2S312	R2S412	R3S112	R3S212	R3S312

3.4 Caractérisations physiques

Les caractérisations physiques ont porté sur des analyses granulométriques et sur la détermination des densités relative des grains (G_s ou D_R).

3.4.1 Analyse granulométrique

Des analyses granulométriques par diffraction du laser ont été effectuées avec l'équipement Malvern Panalytical Mastersizer S (Figure 3.11) qui est utilisable pour des particules dont la taille varie entre 0,05 et 880 µm. L'appareil peut être équipé d'une unité de dispersion par voie sèche ou par voie humide. Le granulomètre, utilisé pour ce projet, est connecté à une unité de dispersion automatisée par voie humide appelée DIF2012 (Figure 3.11).

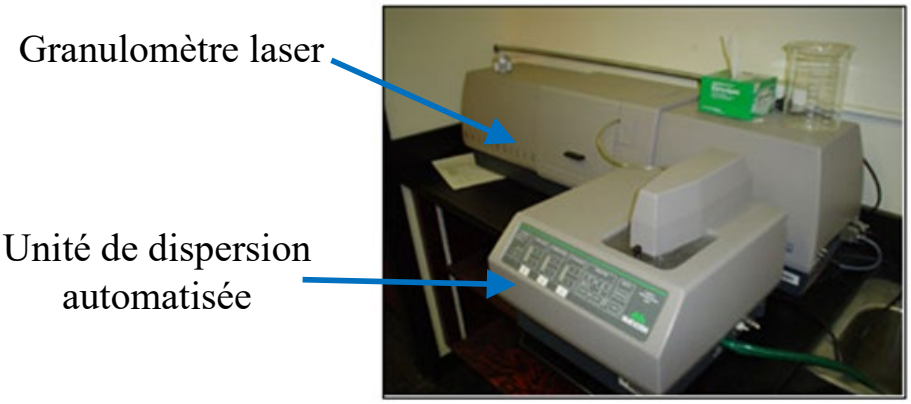


Figure 3.11 Granulomètre laser Malvern Panalytical Mastersizer S avec l'unité de dispersion automatisée DIF2012 (laboratoire de IRME-UQAT)

Le granulomètre et le DIF2012 ont des rôles distincts. À l'intérieur du DIF2012, dans un volume d'environ 1 litre d'eau déionisée, l'échantillon est dispersé ou désagrégé. Le but de la dispersion est d'assurer, par agitation, l'homogénéité de la solution et d'empêcher la sédimentation de l'échantillon pendant la mesure. Pour chaque échantillon de résidus miniers, 3 mesures, espacées de 2 minutes, sont réalisées. La dispersion est importante en ce qu'elle permet d'assurer la diffraction. En effet, le phénomène de diffraction se produit lorsque la longueur d'onde du faisceau incident est comparable à la taille de la particule que traverse ce faisceau. La longueur d'onde du laser varie entre 0,19 µm et 10,6 µm.

Le granulomètre contient une unité optique constituée d'une source de laser, d'un extenseur de faisceau laser (qui accroît le diamètre du faisceau laser), d'une cellule d'agitation dans laquelle les

particules dispersées circulent, d'une lentille de type 300RF qui collecte le faisceau diffracté par les particules et le concentre vers un autre instrument qui est le détecteur principal. La diffraction est l'un des phénomènes de diffusion, avec la réflexion, la réfraction et l'absorption, qui découle de l'interaction du laser avec une particule. Un faisceau diffusé qui rebondit sur les bords d'une particule, en changeant de direction, mais en gardant la même énergie et la même longueur d'onde que le faisceau incident est un faisceau diffracté. L'ensemble des faisceaux diffractés par les particules peuvent s'additionner ou s'annuler dans certaines directions. Quand les faisceaux s'additionnent, il se forme des interférences constructrices (zones lumineuses sur le détecteur principal) et dans le cas contraire, il s'agit d'interférences destructrices (zones sombres sur le détecteur principal). Le principe de la diffraction laser dans un Mastersizer S est schématisé sur la Figure 3.12. L'appareil est muni d'autres détecteurs pour capter les électrons rétrodiffusés, les faisceaux transmis et diffusés sur le côté. Le faisceau est diffracté selon des angles et des intensités caractéristiques de la taille des particules. Les grosses particules diffusent la lumière à une plus grande intensité et à de plus petits angles par rapport au faisceau incident à l'inverse des fines particules (Figure 3.13).

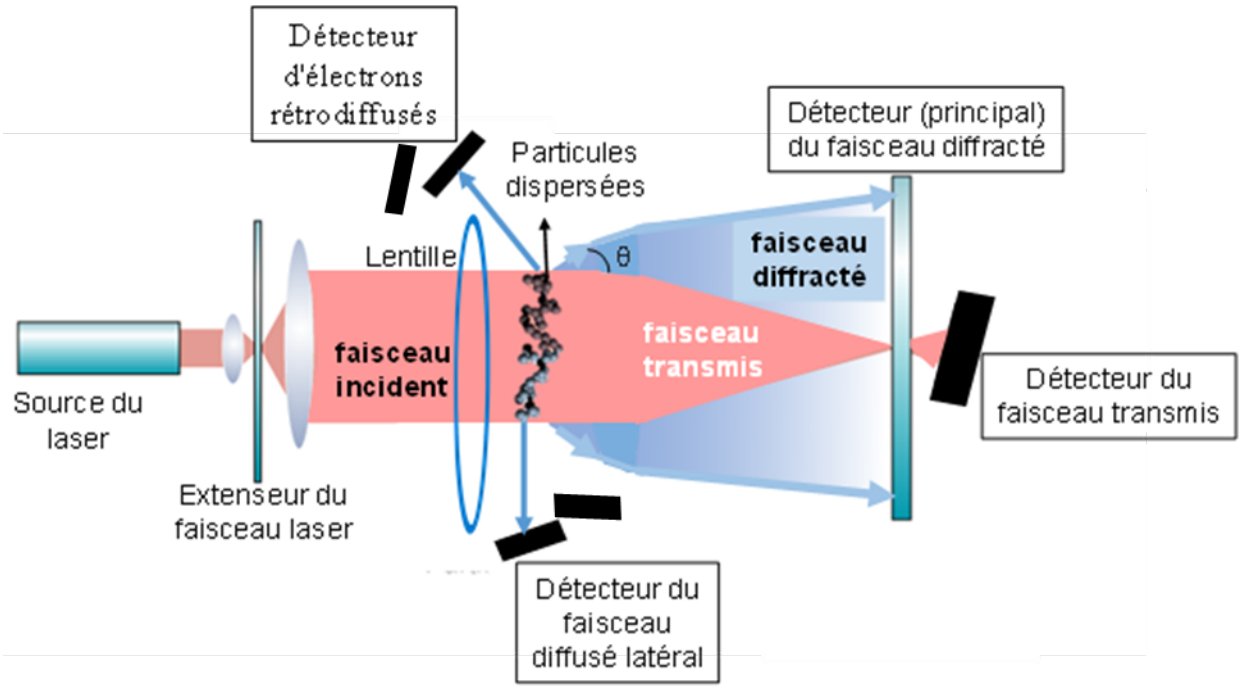


Figure 3.12 Principe de diffraction laser dans un Malvern Mastersizer S (Malvern Instruments Limited, 2015)

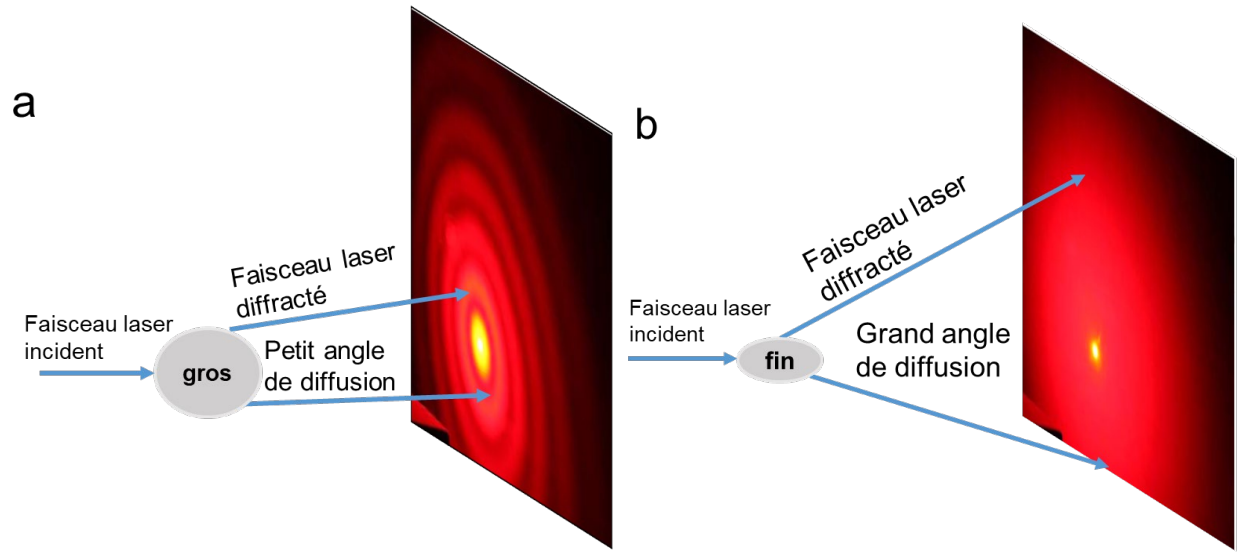


Figure 3.13 Spectre de diffraction : a) des grosses particules, b) des fines particules (Malvern Instruments Limited, 2015)

Les données relatives à l'intensité diffusée en fonction de l'angle sont analysées pour calculer la taille des particules qui ont créé l'image de diffraction. L'analyse des faisceaux diffractés se fait grâce à la théorie de Mie. Cette dernière prédit la taille des particules, sur la base d'un modèle sphérique, selon l'intensité relative de la lumière diffractée. Chaque particule est assimilée à une sphère lisse, homogène et de volume équivalent.

Les résultats d'analyse, pour une mesure, donnent la distribution granulométrique volumique sous forme d'histogramme et de courbe granulométrique cumulée. Une barre de l'histogramme équivaut au pourcentage (en ordonnée) des particules d'un certain intervalle de diamètre (en abscisse) ayant créé le faisceau diffracté correspondant. La courbe cumulée indique le volume (en ordonnée) en pourcentage des particules inférieur à un diamètre (en abscisse). Un résultat est représentatif s'il y a moins de 5 % d'erreur relative entre les paramètres granulométriques (diamètres correspondant à y % de volume) calculés à chacune des 3 mesures. L'unité de dispersion est nettoyée avec de l'eau avant l'introduction d'un nouvel échantillon. Toutes ces informations sont tirées des guides d'utilisation du fabricant Malvern.

La technique de la diffraction laser est utilisée pour mesurer la taille des particules pour les quelques raisons suivantes :

- Analyse de plusieurs classes granulométriques (jusqu'à 100)

- Rapidité de la mesure (de l'ordre de seconde)
- Répétabilité de la mesure pour un échantillon
- Contrôle de la dispersion des particules

Les analyses granulométriques ont porté sur tous les échantillons des résidus du parc 3 Est Doyon (Tableau 3.4) et ceux des résidus du parc 3 Manitou/Goldex (Tableau 3.3). P_{80}, D_{10}, D_{50} ou diamètre médian, D_{60} et C_U sont quelques paramètres caractéristiques tirés des courbes granulométriques obtenues. P_{80} est le pourcentage des particules de diamètre inférieur à 80 µm ou pourcentage des fines. D_{10}, D_{50}, D_{60} sont les diamètres correspondant respectivement au % volumique cumulé laissant de 10 %, 50 %, 60 %. C_U est le coefficient d'uniformité de la courbe (voir éq. 2.1). Particulièrement, les valeurs de P_{80} et D_{50} ont permis d'évaluer la tendance de la distribution granulométrique des échantillons transversalement (le long des rangées), verticalement (selon la profondeur) et longitudinalement (le long des lignes).

3.4.2 Densité relative des grains

La densité relative des grains a été déterminée avec un pycnomètre à Hélium Micromeritics Accupyc 1330 selon la norme ASTM D5550-14. Tous les échantillons ont été testés pour des résidus du parc 3 Est Doyon (Tableau 3.4) et ceux des résidus du parc 3 Manitou/Goldex (Tableau 3.3). Les valeurs de G_S ont servi à évaluer la tendance de la distribution des densités des échantillons transversalement (le long des rangées), verticalement (selon la profondeur) et longitudinalement (le long des lignes). La Figure 3.14 présente de manière simplifiée le dispositif du pycnomètre utilisé. La procédure de détermination de G_S se trouve en Annexe D.

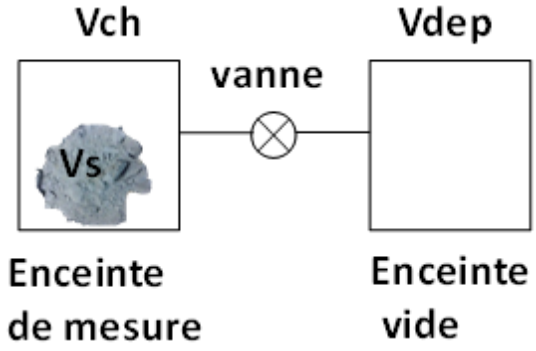


Figure 3.14 Schéma du dispositif du pycnomètre à hélium (Adapté de Rozenbaum, 1999)

3.5 Caractérisations chimiques et minéralogiques

Ces caractérisations visaient à déterminer les phases minérales et les éléments chimiques en présence dans les couches analysées et à évaluer la tendance de leur distribution sur les plans transversal (le long des rangées), vertical (selon la profondeur) et longitudinal (le long des lignes).

3.5.1 Caractérisation chimique par ICP-AES

L'analyse des éléments chimiques constituant les minéraux présents dans les résidus a été réalisée par spectrométrie ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry). L'analyse se fait sur des échantillons de résidus, finement broyés, ayant subi une digestion (mise en solution) complète à l'aide des réactifs ajoutés successivement. Ces réactifs sont l'acide nitrique (HNO_3), le brome liquide (Br_2), l'acide fluorhydrique (HF) et l'acide chloridrique (HCl). Chaque réactif facilite la digestion d'un groupe de minéraux.

Les analyses chimiques ont porté sur les résidus de la rangée 2 de la mine Doyon/Westwood. La rangée 2 a été sélectionnée parce que les résultats de la granulométrie présentaient une distribution décroissante à partir de la digue 1 plus distinctive que les autres rangés. Les échantillons de la surface jusqu'à 50 cm de profondeur ont été testés, à savoir R2S1 0-20, R2S1 30-40, R2S1 40-50, R2S2 0-20, R2S2 20-30, R2S2 30-40, R2S2 40-50, R2S3 0-20, R2S3 20-30, R2S3 30-40, R2S3 40-50, R2S4 0-10, R2S4 10-20, R2S4 20-30, R2S4 30-40 et R2S4 40-50. Dans l'optique de diminuer la quantité de tests à effectuer, quelques échantillons ont été combinés sur les premiers 20 cm. La profondeur limite a été fixée à 50 cm parce que les strates de résidus étaient bien distinctes contrairement aux résidus situés plus en profondeur. Aucune analyse chimique n'a été réalisée sur les résidus Goldex (question de limiter le nombre de tests à réaliser et les coûts associés).

3.5.2 Caractérisation minéralogique par DRX

La minéralogie de quelques échantillons a été déterminée par diffractométrie aux rayons X avec l'appareil D8 AXS Advance Bruker dont la limite de détection varie de 1 à 5 % (Chopard, 2017; Edahbi et al., 2018). Les échantillons ont été préalablement séchés et micronisés à 10 µm (Chopard, 2017).

Les analyses de DRX ont porté sur les échantillons de la rangée 2 de la surface jusqu'à 50 cm et de 70 cm à 125 cm de profondeur de la mine Doyon/Westwood. Ces profondeurs ont été choisies afin de faire une comparaison minéralogique entre les résidus du haut et du bas des stations choisies. La rangée 2 a été choisie, car elle a fait l'objet d'investigations relatives à la réactivité des résidus et aux flux d'oxygène consommés par les résidus dans la cadre d'une étude complémentaire (Driouky, 2020). La répartition spatiale des minéraux lourds et légers a également été présentée en fonction de la profondeur. Il s'agit plus précisément des échantillons R2S1 0-20, R2S1 30-40, R2S1 40-50, R2S1 70-80, R2S1 90-100, R2S1 100-110, et R2S1 110-125 pour la station 1, R2S2 0-20, R2S2 20-30, R2S2 80-90, et R2S2 110-125 pour la station 2, R2S3 0-20, R2S3 20-30, R2S3 30-40, R2S3 40-50, R2S3 70-80, R2S3 90-100, R2S3 100-110 et R2S3 110-125 pour la station 3 et R2S4 0-10, R2S4 20-30, R2S4 30-40, R2S4 90-100 et R2S4 110-125 pour la station 4.

Des essais de DRX ont été réalisés sur quelques échantillons de résidus Goldex de la surface du parc 3 du site Manitou notamment : R1S1 0-20, R1S2 0-20, R1S3 0-20, R1S4 0-20 et R2S2 0-20. Dans l'optique de diminuer la quantité de tests à effectuer, des échantillons ont été combinés sur les premiers 20 cm. On s'est limité à cette profondeur parce que les résultats minéralogiques étaient dans des proportions équivalentes sur les stations testées.

3.6 Caractérisations hydrogéotechniques

La conductivité hydraulique et la capacité de rétention d'eau sont les principales caractéristiques hydrogéotechniques qui ont été déterminées. Des prédictions de ces propriétés ont été faites pour des fins de comparaison.

3.6.1 Détermination et prédiction de la conductivité hydraulique saturée

En première analyse, la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des résidus des 2 sites miniers a été prédite pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de k_{sat} afin de choisir la méthode de mesure appropriée.

3.6.1.1 Prédiction de la conductivité hydraulique saturée

Le modèle prédictif utilisé ici est celui de Mbonimpa et al. (2002) tel que défini par l'équation 3.1. Cette équation est valable pour un large spectre de matériaux granulaires, ceux ayant des formes rondes uniformes jusqu'aux particules fines angulaires et les silts de faible plasticité. Le domaine

de validé de cette équation est défini comme suit (Mbonimpa et al., 2002) : 4×10^{-8} cm/s $\leq k_{sat} \leq 3 \times 10^{2}$ cm/s; $0,35 \leq e \leq 1,27$; $1 \leq C_U \leq 227$; 4×10^{-6} cm $\leq D_{10} \leq 1,5$ cm.

$$k_{sat}(cm/s) = 981 \times \frac{e^5}{1+e} \times C_U^{\frac{1}{3}} \times D_{10}^2(cm) \quad (3.1)$$

Des valeurs de porosité comprises entre 0,44 et 0,47 ont été considérées selon la littérature : n = 0,44 pour le parc 3 Est Doyon (Demers et al., 2009) et n = 0,47 pour le parc 3 Manitou (Éthier, 2018). Par la suite, les valeurs de k_{sat} des matériaux ont été déterminées au laboratoire par un essai au perméamètre à charge variable selon le protocole ASTM D5856-95 (2007).

3.6.1.2 Essai à charge variable

L'essai à charge variable dans un perméamètre à parois rigides est applicable pour les résidus miniers, car ils ont un faible pouvoir gonflant et sont fins et peu perméables ($k_{sat} < 10^{-5}$ m/s). Le perméamètre complet est constitué d'un moule cylindrique rigide et transparent, l'échantillon compacté, 2 plaques poreuses saturées et 2 géotextiles saturés, 1 tube capillaire relié à la base de l'échantillon, le support et le couvercle (Figure 3.15).

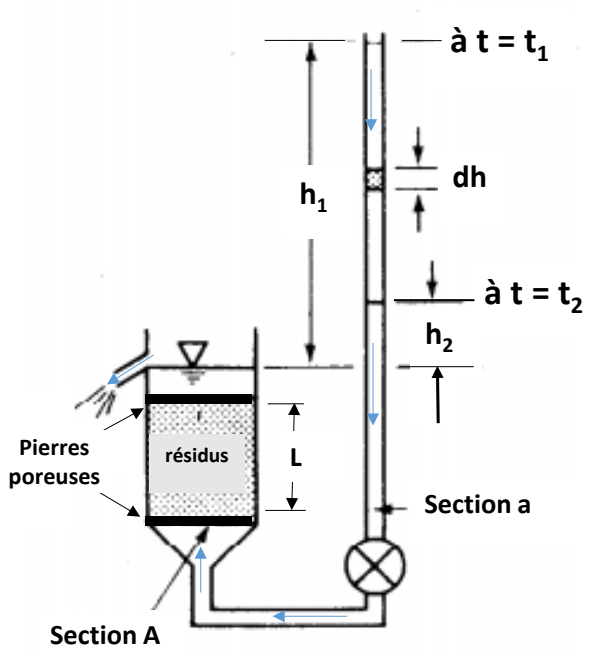


Figure 3.15 Schéma du dispositif de l'essai à charge variable (adapté de Holtz et Kovacs, 1981)

Le protocole de l'essai est donné dans l'ASTM D5856-95 (2007). La conductivité hydraulique saturée k_{sat} (cm/s) est calculée avec l'équation suivante :

$$k_{sat} = \frac{a\,L}{A\,\Delta t}\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = 2{,}3 \times \frac{a\,L}{A\,\Delta t}\log_{10}\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.2)$$

a est l'aire de la section du tube capillaire (cm^2), L est la longueur de l'échantillon (cm), A est l'aire de la section transversale de l'échantillon (cm^2), h_1 (cm) est la charge hydraulique à travers l'échantillon au temps t_1, h_2 (cm) est la charge hydraulique à travers l'échantillon au temps t_2, Δt (s) = t_2 - t_1 est l'intervalle de temps entre la lecture de h_1 et h_2.

La détermination de k_{sat} en laboratoire a été réalisée uniquement pour le parc 3 Est Doyon avec les échantillons récupérés en surface sur les stations R2S1, R2S2, R2S3, R2S4 (Figure 3.16). Les échantillons ont été mis en place à un indice des vides variant entre 0,75 et 0,82 conformément aux valeurs indiquées dans Demers et al. (2009). Il convient de rappeler que les tests ont été réalisés sur des résidus échantillonnés en vrac au niveau de ces stations.

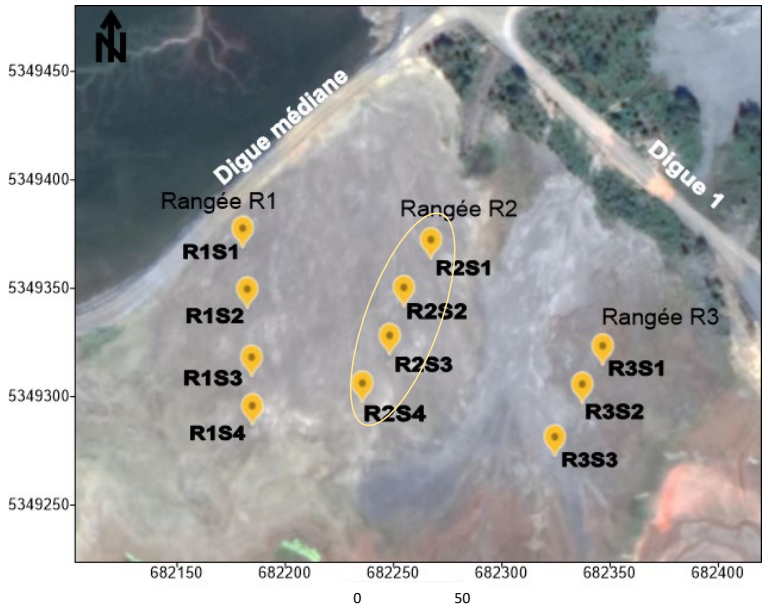


Figure 3.16 Vue des stations de prélèvement des échantillons pour la détermination expérimentale en laboratoire de k_{sat}.

3.6.2 Détermination et prédiction de la courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) détermine la capacité à retenir de l'eau dans la zone vadose, c'est-à-dire au-dessus du niveau phréatique, en condition non saturée. La CRE peut être exprimée par une représentation graphique définissant la variation de la teneur en eau massique (w) ou volumique (θ) ou du degré de saturation (S_r) en fonction de la variation de la succion (ψ). La CRE

en drainage a été déterminée en laboratoire dans des cellules Tempe. Il convient de mentionner que cette méthode ne permet pas de tenir compte d'une variation possible de la porosité lorsque les succions appliquées augmentent; ce qui pourrait être le cas pour les résidus de plus en plus fins en s'éloignant du point de dépôt.

3.6.2.1 Détermination de la courbe de rétention d'eau en laboratoire

Des courbes de rétention d'eau en drainage ont été déterminées en laboratoire avec des cellules Tempe (Figure 3.17) selon le protocole ASTM D3152-72. Le but de l'essai est de suivre la diminution de la teneur en eau volumique sous l'effet des succions appliquées sur l'échantillon.

Le protocole en cellule Tempe comprend le montage de l'échantillon dans la cellule, l'essai proprement dit et le démontage de la cellule à la fin de l'essai. En vue de confronter les résultats et valider l'essai, simultanément un duplicata du même échantillon est testé dans une autre cellule Tempe. Un préalable à l'essai est la saturation en eau de l'échantillon et des pierres poreuses.

Lorsque le test est réalisé sur des échantillons de résidus miniers réactifs, la pression est appliquée avec une bouteille d'azote plutôt que de l'oxygène afin d'éviter l'oxydation des sulfures. L'application de la pression se fait sur la tête de la cellule Tempe. L'échantillon est placé au-dessus d'une pierre poreuse saturée avec un contact optimal afin d'assurer la continuité du passage de l'eau de l'échantillon vers la sortie ouverte située à la base de la cellule. La pression de l'eau dans l'échantillon est nulle (Delage et Cui, 2000) du fait que la sortie d'eau située à la base de la cellule reste ouverte durant l'essai et est à la pression atmosphérique. L'échantillon subit une succion parce que la pression d'air exercée dans la cellule est supérieure à la pression d'eau dans l'échantillon. Durant l'essai, à tout moment, la pierre poreuse doit rester saturée. Pour cela, la pression appliquée dans le cadre de cette étude ne devait pas dépasser la pression d'entrée d'air ψ_a de la plaque poreuse qui vaut 43,5 psi ou 296 kPa. La pression maximale admise était de 40 psi ou 276 kPa.

On applique sur la cellule des succions par palier de 0,5 psi à 40 psi (3 kPa à 276 kPa). Pour chaque pression appliquée, une partie de l'eau contenue dans l'échantillon est évacuée. Lorsque l'équilibre est atteint (la masse de la cellule est constante durant 48 h), la cellule complète est pesée. L'incertitude est de 0,2 g pour 3 lectures consécutives (Pabst, 2011). Cette masse permet d'évaluer la quantité d'eau drainée entre 2 succions consécutives. Tant que les succions appliquées restent inférieures à la valeur de ψ_a de l'échantillon, celui-ci reste saturé. Il est donc nécessaire de prédire la valeur de ψ_a de l'échantillon pour ajuster les paliers de pression et ainsi réduire la durée des

essais. L'eau de l'échantillon se draine, dès que sa valeur de ψ_a est atteinte. La procédure complète se retrouve en Annexe E. La méthode des tangentes est un moyen graphique pour obtenir la valeur de ψ_a à partir de la courbe expérimentale de rétention d'eau.

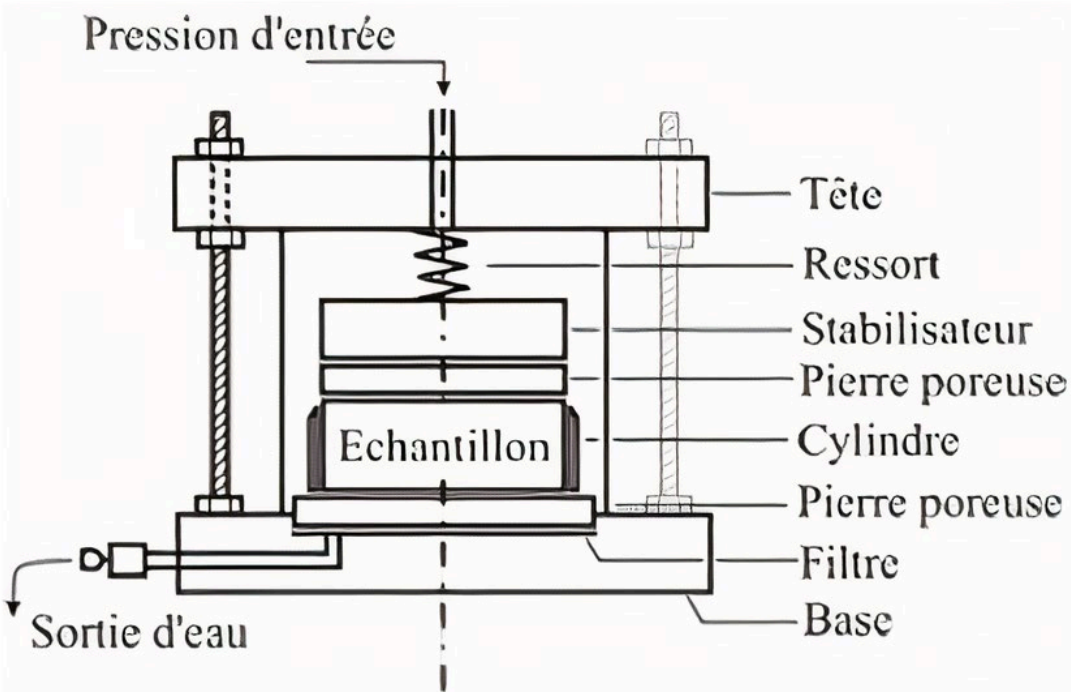


Figure 3.17 Parties d'une cellule Tempe (Martin, 2003)

3.6.2.2 Prédiction de la courbe de rétention d'eau

La CRE a été prédite à l'aide du modèle de Kovács modifié (Aubertin et al., 2003) pour les matériaux meubles. Ce modèle a été développé uniquement pour les sols isotropes et homogènes (Aubertin et al., 2003). La rétention d'eau est due aux forces capillaires (interface eau-air) et aux forces d'adsorption (interface eau-solide) présentes dans la zone vadose. Le degré de saturation (S_r) est donc divisé en une composante due aux forces capillaires (S_c) et une composante due aux forces d'adhésion (S_a). S_c et S_a peuvent être prédites à une succion donnée (ψ) à partir de la hauteur de la remontée capillaire équivalente (h_{co}), qui à son tour, dépend des caractéristiques du matériau (e, C_U, D_{10}) pour les sols pulvérulents. Les équations (3.3 à 3.7) ci-après permettent de prédire la CRE ($S_r = f(\psi)$) (Aubertin et al., 2003; Mbonimpa et al., 2006).

La hauteur de la remontée capillaire équivalente est définie par l'équation 3.3 :

$$h_{c0}(\mathrm{cm}) = \frac{0{,}75}{e[1{,}17\log(C_U)+1]D_{10}(\mathrm{cm})} \tag{3.3}$$

h_{co} décrit la remontée capillaire équivalente d'eau au-dessus de la nappe phréatique; e est l'indice des vides, C_U le coefficient d'uniformité et D_{10} (cm) le diamètre correspondant au passant de 10 % sur la courbe granulométrique

Le degré de saturation S_r peut être obtenu comme suit :

$$S_r = S_c + [(1 - \langle 1 - S_a \rangle)(1 - S_c)] \tag{3.4}$$

S_c est degré de saturation lié aux forces capillaires, S_a est degré de saturation lié aux forces d'adhésion et ⟨ ⟩ représente les crochets de Macauley définis par: $\langle x \rangle = 0.5(x+|x|)$.

Les degrés de saturation S_c et S_a peuvent être obtenus par les équations 3.5 et 3.6.

$$S_c = 1 - [(h_{c0}/\psi)^2 + 1]^m \exp[-m\,(h_{c0}/\psi)^2] \tag{3.5}$$

m est un paramètre de la distribution de la taille des pores avec $m=1/C_U$ et ψ est exprimé en cm

$$S_a = a_c\, c(\psi) \frac{(h_{c0}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \tag{3.6}$$

$$c(\psi) = 1 - \frac{\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln(1+10^7/\psi_r)} \tag{3.7}$$

a_c est un coefficient d'adhésion avec a_c = 0,01 (Aubertin et al., 2003) ; ψ_n est un paramètre de normalisation pour la cohérence des unités (ψ_n = 1 cm) (Aubertin et al., 2003) ; $c(\psi)$ est la fonction de correction qui contraint $\theta = 0$ (à l'état sec) lorsque $\psi = 10^7$ cm (Fredlund et Xing, 1994), ψ_r correspond à la succion résiduelle correspondant à la teneur en eau volumique du sol est égale à la teneur en eau résiduelle θ_r. La succion résiduelle ψ_r est donnée par l'équation 3.8 :

$$\psi_r = 0{,}86 \times h_{c0}^{1,2} \tag{3.8}$$

Les paramètres ψ_r, θ_r, et la pression d'entrée d'air (ψ_a) sont des caractéristiques particulières de la CRE. Ces valeurs peuvent être déterminées graphiquement par la méthode des tangentes sur la CRE (Fredlund et Xing, 1994). Ψ_a peut aussi être estimé à l'aide de l'équation suivante (Aubertin et al. 2003) :

$$\psi_a = \frac{0{,}6}{[e(1{,}17\log(C_U)+1)D_{10}]^{0,8}} \tag{3.9}$$

3.7 Analyse de la distribution des paramètres

Pour vérifier l'ampleur de la ségrégation, le test ANOVA (Analyse de la variance) a été appliqué pour comparer entre eux différents groupes de valeurs. Les variables étudiées sont G_S, P_{80}, D_{50}. Ces paramètres sont répartis en plusieurs groupes. Comme illustré sur la Figure 3.18 et la Figure 3.19, les groupes sont les rangées (R1, R2, R3), les lignes (L1, L2, L3, L4) et les stations (S1, S2, S3, S4) prises individuellement. Les comparaisons ont été effectuées transversalement (c'est-à-dire d'une rangée à une autre et aussi d'une station à une autre d'une même rangée), et longitudinalement (c'est-à-dire d'une ligne à une autre et aussi d'une station à une autre d'une même ligne). Dans les 2 cas, les paramètres ont été comparés à chaque niveau de profondeur.

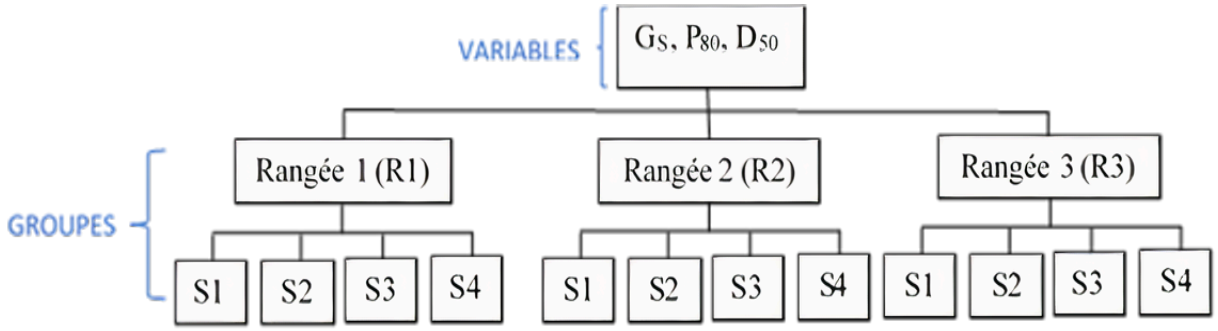


Figure 3.18 Groupes de variables sur le plan transversal

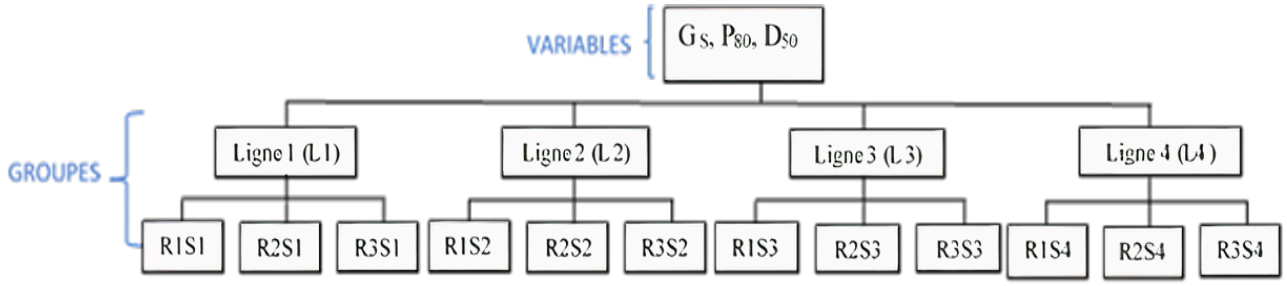


Figure 3.19 Groupes de variables sur le plan longitudinal

Le test ANOVA permet de déterminer si les groupes de valeurs comparés sont significativement différents ou non. Une différence est significative lorsqu'il y a moins de 5% de chance que le hasard explique la différence observée entre les groupes comparés. Pour cela, le test ANOVA fonctionne avec le calcul de la p-value. La p-value est la probabilité que le hasard explique la différence

observée. La différence est non significative si p-value > 5 %, et elle est significative quand p-value < 5 %.

La présence d'une différence significative pourrait justifier une tendance transversale, verticale et longitudinale pour les paramètres mesurés. Le test s'apparente à une comparaison 2 à 2 des valeurs à une même profondeur. Sur le plan transversal, les valeurs de D_{50}, P_{80} ou G_S sont comparées, pour un même niveau, sur toutes les stations de chaque rangée. Concrètement, les 4 résultats de D_{50}, P_{80} ou G_S, obtenus par exemple, pour le niveau 0-10 cm, sur les stations R1S1, R1S2, R1S3, R1S4 de la rangée 1 ont été successivement comparés l'un à l'autre. Le test se poursuit ainsi à chaque niveau. Sur le plan transversal, le test se fait suivant les lignes. Les paramètres sont comparés, pour un même niveau, sur des stations situées sur une même ligne. Pratiquement, les 3 valeurs de D_{50}, P_{80} ou G_S, obtenus par exemple, pour le niveau 0-10 cm, sur les stations R1S1, R2S1, R3S1 de la ligne 1 sont comparées l'un à l'autre.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Dans ce chapitre, les résultats de la minéralogie, de la chimie, de la densité relative des grains solides et de la distribution granulométrique sont présentés pour les matériaux prélevés sur les deux sites d'études. L'objectif est d'évaluer l'ampleur de la ségrégation en termes de distribution des caractéristiques des matériaux.

4.1 Parc 3 Est du site Doyon/Westwood

4.1.1 Distribution minéralogique des résidus

Il convient de rappeler que les analyses de DRX ont porté sur les échantillons de la rangée 2 de la surface jusqu'à 50 cm et de 70 cm à 125 cm de profondeur. Les détails des pourcentages massiques de chaque minéral à chaque profondeur sur chaque station se trouvent en Annexe F. Les minéraux présents et leur densité G_s sont des silicates (quartz avec G_s=2,6, feldspath avec G_s=2,6 à 2,8), oligoclase (2,64 à 2,66), albite avec G_s=2,6, chlorite avec G_s=2,77 à 2,88 et muscovite avec G_s=2,9), des oxydes (rutile avec G_s=4,25, magnétite avec G_s=5,1), des carbonates (calcite avec G_s=2,7, dolomite avec G_s=2,8 à 2,9), des sulfates (gypse avec G_s=2,3), des phosphates (chloroapatite avec G_s=3,1 à 3,2) et des sulfures (sphalérite avec G_s=4,1, chalcopyrite avec G_s= 4,2 et la pyrite avec G_s=5). Les densités relatives des minéraux cités ont été prises de http://webmineral.com.

4.1.1.1 Distributions verticale et transversale des minéraux

Les Figures 4.1 et 4.2 présentent respectivement les pourcentages massiques des minéraux dans les résidus sur deux séries d'échantillons de la rangée 2 : les échantillons de la surface jusqu'à 50 cm et de 70 cm jusqu'à 125 cm (valeurs à intervalles de 10 cm). Les minéraux sont classés par ordre d'abondance dans les résidus et selon leur densité, à la fois sur le plan transversal (distance par rapport à la digue 1, voir Figure 3.7) et sur le plan vertical. Le quartz est le minéral le plus abondant (valeurs entre 40 et 56 %) tandis que la sphalérite, la chalcopyrite et la magnétite sont les moins abondants dans toutes les stations (valeurs respectives entre 0 et 0,08 % ; 0 et 0,8 %; 0 et 0,36 %). Les minéraux lourds (identifiés en rouge sur les graphiques) sont la pyrite, le rutile, la magnétite, la sphalérite et la chalcopyrite. Les autres minéraux sont moyennement lourds (identifiés en bleu sur les graphiques).

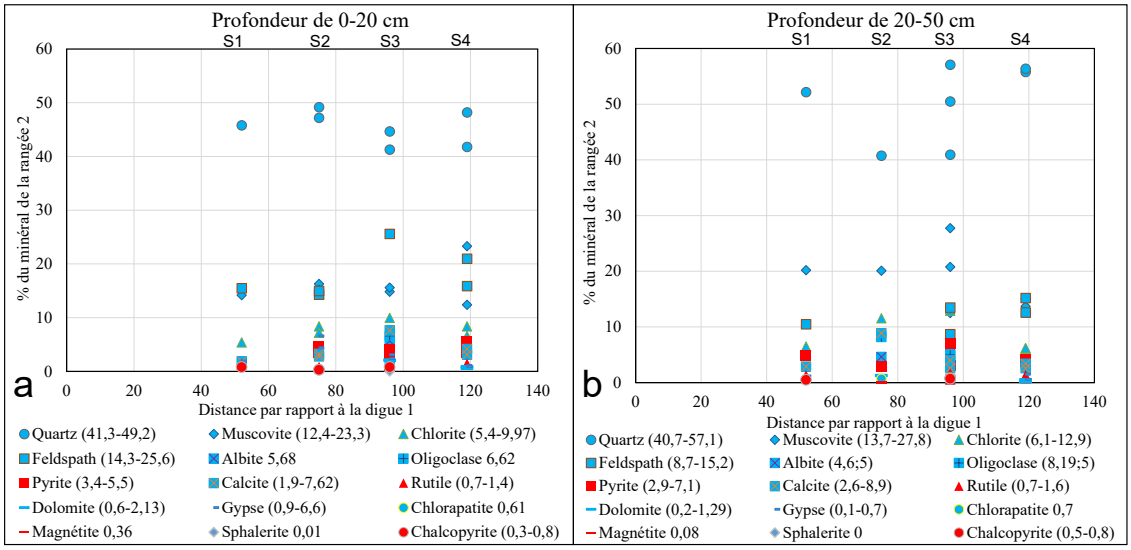


Figure 4.1 Distribution du pourcentage massique des minéraux en fonction de la distance par rapport à la digue 1 pour des échantillons prélevés aux intervalles de profondeurs de : a) 0 - 20 cm, b) 20 - 50 cm (Rangée 2 du Parc 3 Est Doyon/Westwood)

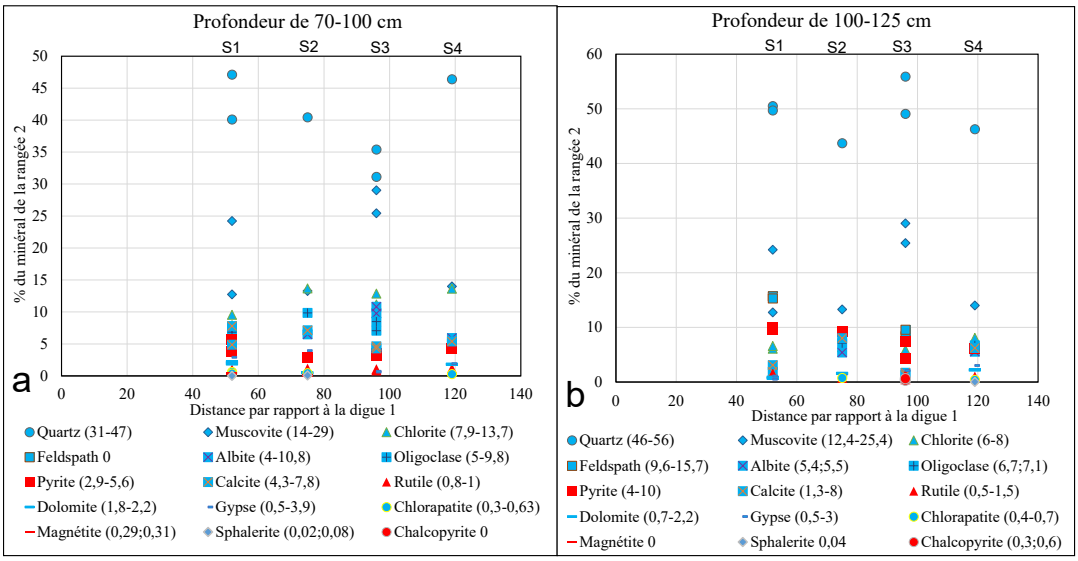


Figure 4.2 Distribution du pourcentage massique des minéraux en fonction de la distance par rapport à la digue 1 pour des échantillons prélevés aux intervalles de profondeurs de : a) 70 - 100 cm, b) 100 - 125 cm (Rangée 2 du Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Sur le plan vertical, les minéraux sont dans les mêmes proportions (indiquées dans les légendes) dans le haut et le bas des 4 stations de la rangée 2. Cette similitude peut être expliquée par le fait que les minerais, dont sont issus ces résidus après des traitements minéralurgiques, étaient constitués de minéraux dans des pourcentages analogues. La dolomite, par exemple, se retrouve

entre 0,6 et 2 % en surface et 0,7 et 2,2 % à 125 cm. La muscovite est présente entre 12 et 23 % en surface et entre 12 et 25 % à 125 cm. Sur le plan transversal, les minéraux se présentent également dans les mêmes pourcentages d'une station à une autre. À 0-20 cm, la muscovite est à 14,2 % sur R2S1, 15,2 % sur R2S2, 14,8 % sur R2S3, 12,4 % sur R2S4. À 20-50 cm, la pyrite est à 4,8 % sur R2S1, 3 % sur R2S2, 3 % sur R2S3, 4,2 % sur R2S4. Pour le cas du parc 3 Est Doyon, le pourcentage massique des minéraux varie peu sur une distance de 120 m à partir de la digue 1 sur la rangée 2. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à une profondeur donnée, la nature de la couche de résidus est identique d'une station à l'autre.

4.1.1.2 Distribution verticale de la pyrite

La pyrite est le principal sulfure par rapport à la chalcopyrite et à la sphalérite. Les pourcentages en pyrite à différentes profondeurs de la rangée 2 sont donnés en Annexe F. La Figure 4.3 montre le pourcentage de pyrite en fonction de la profondeur sur les stations de la rangée 2.

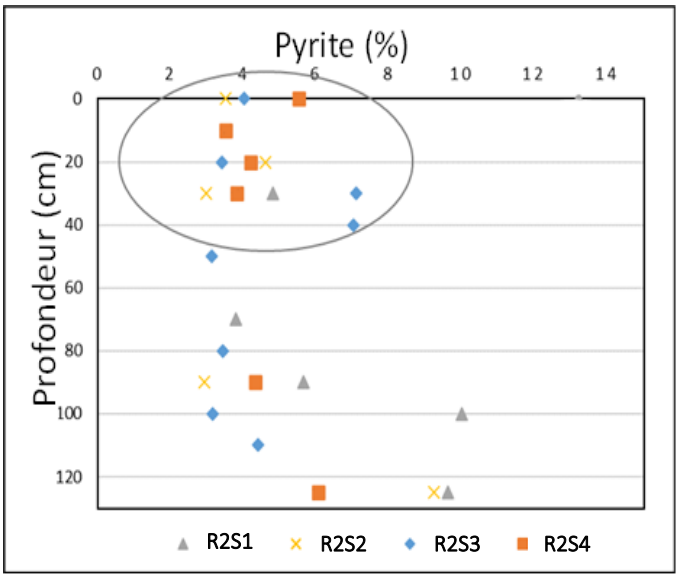


Figure 4.3 Pourcentage de pyrite en fonction de la profondeur sur la rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Le pourcentage de pyrite varie d'un niveau à l'autre. De la surface à environ 40 cm, le pourcentage de pyrite varie entre 3,5 et 7 %. Ces valeurs sont en accord avec celles de la littérature : 6,5 % pour des résidus échantillonnés respectivement à la sortie de l'usine de concentration de la mine Doyon (Demers, 2008; Demers et al., 2009), 3% pour des résidus non oxydés fraîchement déposés sur le site Doyon (Demers et al., 2015b) et 8,12 % pour des résidus échantillonnés à la surface du parc 3

de Doyon (Rey et al., 2019). Sur R2S1, le pourcentage de pyrite atteint 10 % dans la couche de 100 - 110 cm et 9,6 % dans la couche de 110-125 cm. La différence entre ces valeurs peut être expliquée par la variabilité du minerai traité à l'usine.

4.1.1.3 Distribution transversale de la pyrite

La Figure 4.4 présente la distribution spatiale de la pyrite le long de la rangée R2 à différentes profondeurs. À 0-20 cm de profondeur, les teneurs en pyrite varient entre 3,5 et 5,5 %; à 20-50 cm, entre 3 et 7 %, à 70-100 cm, entre 3 et 5,6 %, à 100-125 cm entre 4 et 10 %. La teneur en pyrite semble décroitre légèrement de la station S1 vers S4. Cette distribution aura un impact sur la réactivité des résidus et donc sur la distribution des flux d'oxygène consommés par les résidus. D'où l'importance d'en tenir compte lors du design des méthodes de restauration (voir Driouky, 2020).

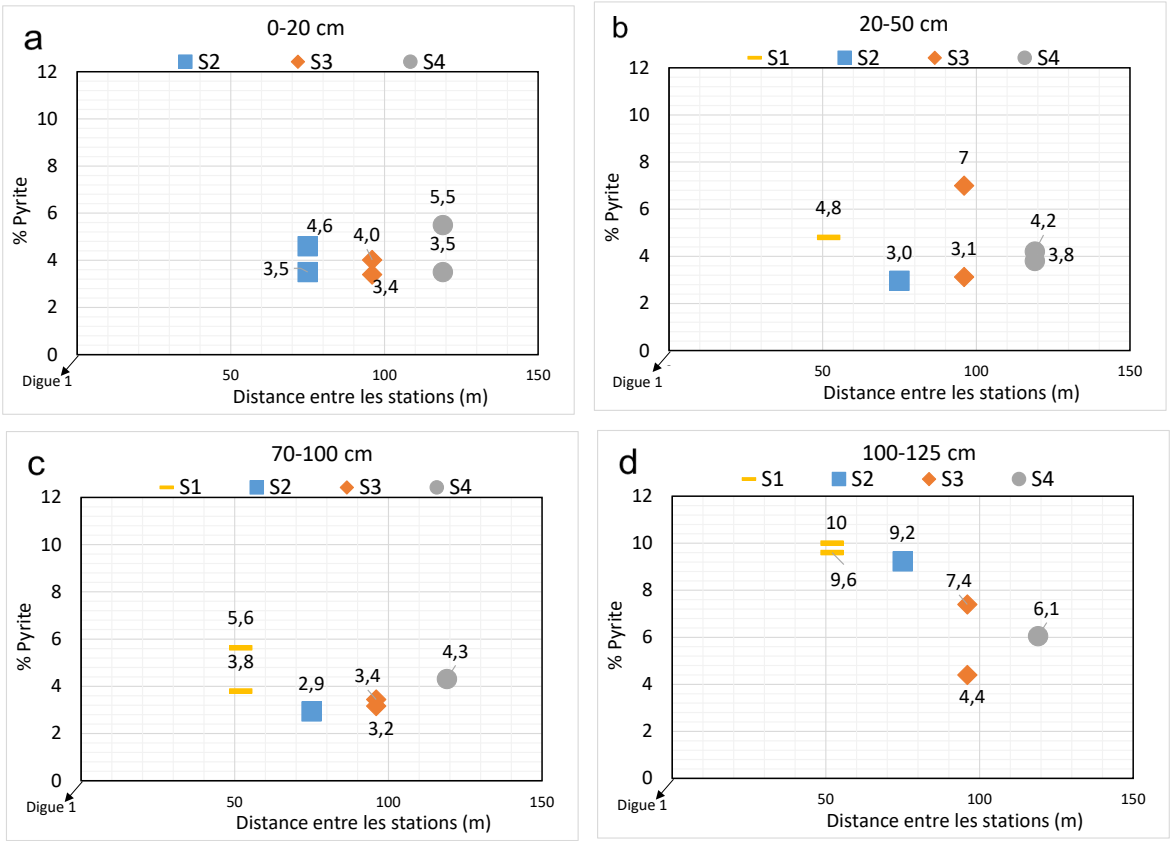


Figure 4.4 Distribution du pourcentage de pyrite en fonction de la distance par rapport à la digue 1 à différentes profondeurs : a) 0-20 cm, b) 20-50 cm, c) 70-100 cm, d) 100-125 cm (Rangée 2 du Parc 3 Est Doyon/Westwood)

4.1.2 Distribution des éléments chimiques

4.1.2.1 Distribution verticale

La composition chimique de tous les échantillons testés se trouve en Annexe G. La Figure 4.5 présente certains éléments chimiques détectés dans les couches des stations de la rangée 2 sur les premiers 40 cm à partir de la surface. Les éléments présentés sont : Al (Aluminium), Ca (Calcium), Mg (Magnésium), Na (Sodium), K (Potassium), Ti (Titane), Fe (Fer), S (Soufre), Cu (Cuivre), Zn (Zinc), Ba (Baryum) et P (Potassium). Ils sont présentés car ils constituent les minéraux les plus abondants détectés par la minéralogie. Leurs limites de détection sont de 0,01 % pour les 8 premiers et respectivement de 0,5, 1, 1 et 100 ppm pour les 4 derniers. Par ordre décroissant de concentration, Al, Fe, S, Ca, K sont les éléments les plus abondants, puis Mg, Na, Ti et enfin Zn, Cu, Ba et P.

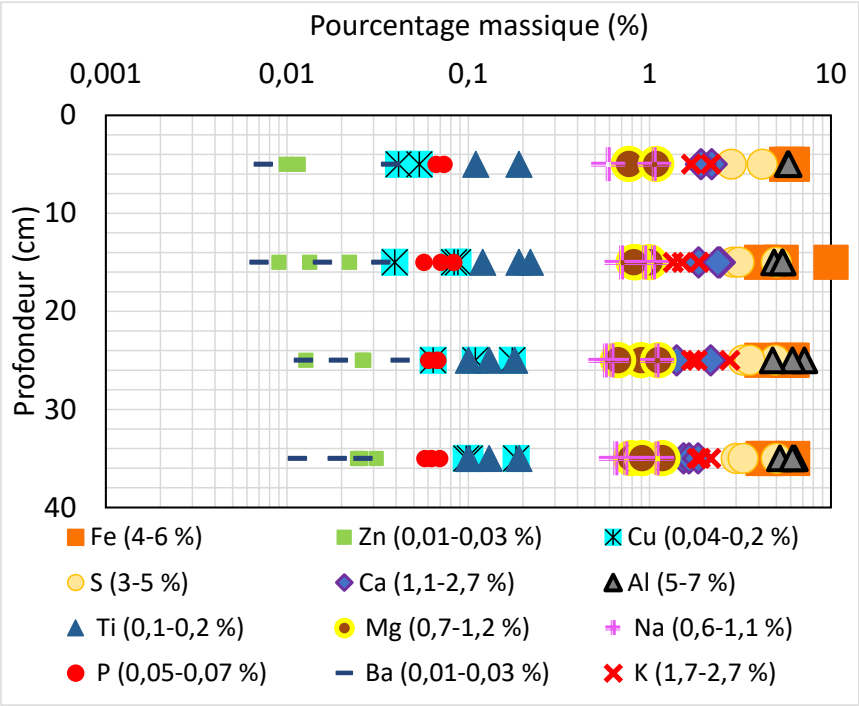


Figure 4.5 Profils verticaux des pourcentages massiques des éléments chimiques des stations de la rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Les pourcentages des éléments chimiques varient peu dans les niveaux considérés. Sur 40 cm, %Fe varie seulement entre 4 et 6 % (en excluant la valeur de 10 %), %S entre 3 et 5 %, %K entre 1,7 et 2,7 %, %Al entre 5 et 7 %, %Ca entre 1,1 et 2,7 % (Figure 4.5). La nature chimique des résidus est la même sur l'épaisseur considérée. Les pourcentages des éléments chimiques sont en adéquation avec ceux cités dans la revue de littérature : %Al = 6,2 % pour des échantillons non oxydés fournis

par la mine de Doyon/Westwood (Demers et al. 2015a), %Fe = 4,8 % sur des résidus sortis de l'usine de concentration (Demers et al., 2008) et %Fe = 5,8 % pour des résidus non oxydés fraichement déposés (Demers et al., 2015a) et %Fe = 6 % (Rey et al., 2020) pour des résidus obtenus au démantèlement des tests cinétiques dans des colonnes. %Ca = 2,9 % (Demers et al. 2015a), %S = 3,6 % selon Demers et al. (2008), %S=3,4 % (Demers et al., 2015a) et %S = 4,4 % selon Rey et al. (2020). Les concentrations massiques les plus élevées de Zn et Cu sont de 0,017 % et 0,18 %, comparables à Zn = 0,013 % et Cu = 0,063 % selon Demers et al. (2008) et Zn = 0,014 % et Cu = 0,1025 % selon Demers et al. (2015a).

4.1.2.2 Distribution transversale

La Figure 4.6 montre la distribution transversale des concentrations des 3 éléments les plus abondants (Al, Fe, S, Ca).

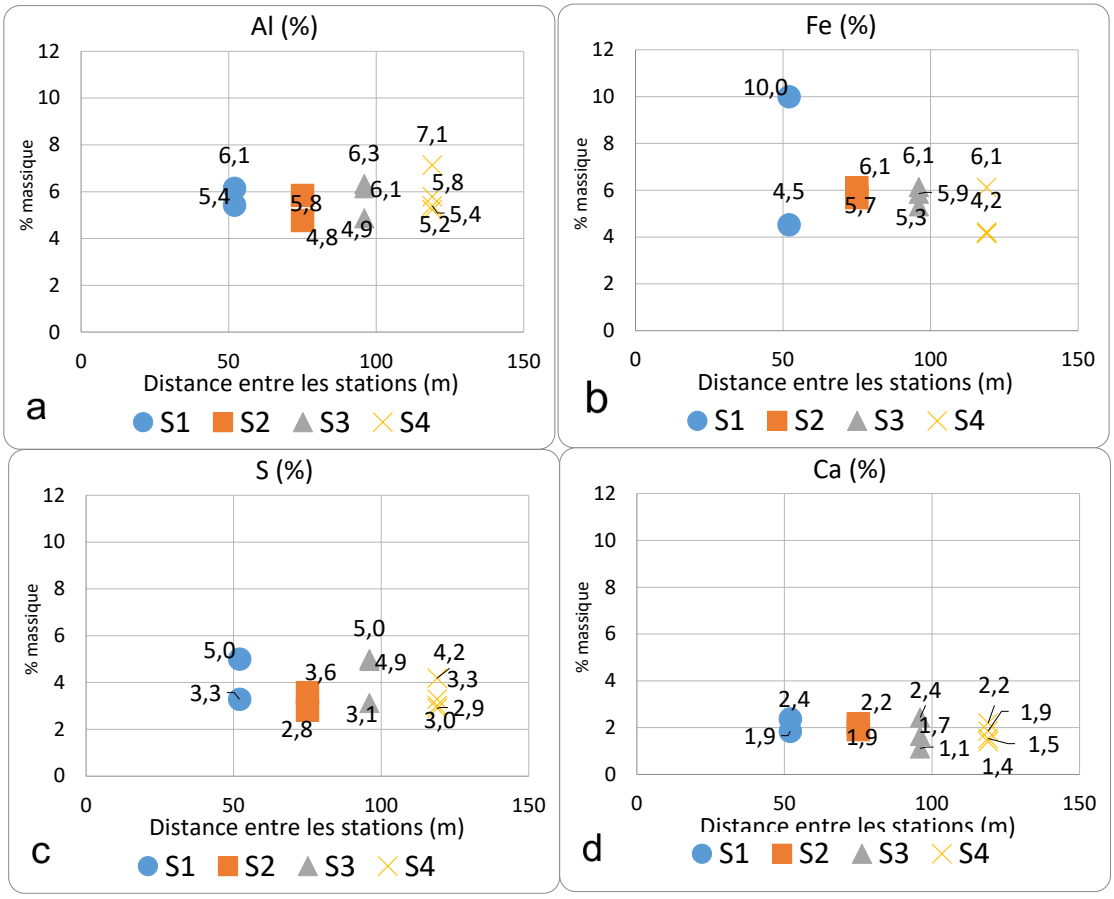


Figure 4.6 Distribution transversale du pourcentage massique dans les résidus de la rangée 2 de 0 à 40 cm de profondeur en fonction de la distance entre les stations : a) Al, b) Fe, c) S, d) Ca (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Les concentrations en éléments ne varient pas beaucoup de 0 à 40 cm pour chaque élément d'une station à l'autre. Par exemple, %Al varie entre 5 et 6 % sur S1 et entre 5 et 7 % sur S4; %S varie entre 3 et 5 % sur S1 et entre 3 et 4 % sur S4; %Fe varie entre 4 % sur S1 et entre 4 et 6 % sur S4; % Ca varie entre 2 % sur S1 et entre 1,75 % en moyenne sur S4. Les résidus gardent une nature chimique identique sur une distance d'environ 120 m à partir de la digue 1.

4.1.3 Densité relative des grains solides G_s

4.1.3.1 Distribution verticale de G_s

Les 97 valeurs de G_s déterminées au niveau de 11 stations du parc 3 Est du site Doyon/Westwood sont présentées en Annexe H. La Figure 4.7 montre le profil vertical des densités au niveau de chaque station et pour chaque rangée.

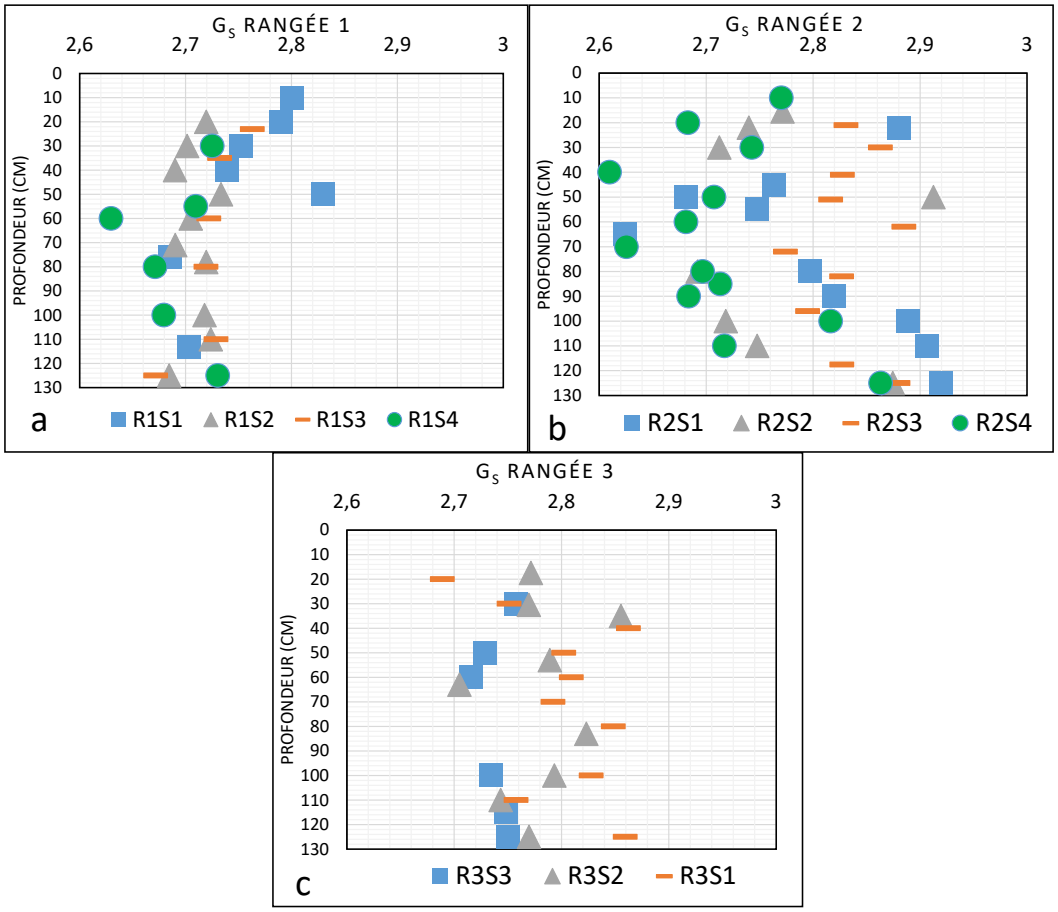


Figure 4.7 Profil vertical des densités G_s sur : a) rangée R1, b) rangée R2 et c) rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Pour une station donnée, les distributions verticales de G_s sont aléatoires (aucune tendance ne prédomine). Les valeurs oscillent entre 2,6 et 3,1. La densité relative des résidus, de la mine Doyon, non oxydés et fraîchement déposés est de 2,8 (Demers et al., 2015a). L'allure des nuages de points montre que les densités de surface sont proches des densités en profondeur, sauf au niveau de la rangée R1. Les valeurs varient entre 2,68 et 2,83 sur R1S1; 2,68 et 2,73 sur R1S2; 2,67 et 2,76 sur R1S3; 2,63 et 2,73 sur R1S4; 2,62 et 2,92 sur R2S1; 2,71 et 3,1 sur R2S2; 2,81 et 3 sur R2S3; 2,6 et 2,87 sur R2S4, 2,68 et 2,86 sur R3S1; 2,7 et 2,85 sur R3S2; 2,71 et 2,75 sur R3S3. Généralement, la valeur de G_s est de 2,8 (±0,2) sur la zone d'étude. La valeur de G_s est proche de celle des minéraux moyennement lourds qui ont été détectés en plus grande quantité que les minéraux lourds. La faible variabilité de G_s d'un niveau à l'autre sur chaque rangée et plus globalement sur l'ensemble des rangées procède de la minéralogie identique des résidus dans le parc (voir section 4.1.1.1).

4.1.3.2 Distribution transversale de Gs

L'ensemble des distributions de G_s pour toutes les profondeurs et toutes les rangées est présenté en Annexe I. À titre illustratif, les Figures 4.8 à 4.10 présentent la distribution transversale de G_s pour les échantillons prélevés aux niveaux 20-30 cm, 50-60 cm et 110-125 cm (choisis arbitrairement) sur les rangées R1, R2 et R3. L'intégralité de la distribution transversale sur toutes les profondeurs est présentée à la section 5.3. La distribution des valeurs entre les stations S1 et S4 semble aléatoire (pas de tendance générale) pour les trois rangées. De plus, des analyses statistiques réalisées pour comparer les valeurs obtenues sur les quatre stations à une profondeur donnée indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre ces valeurs. Parmi les hypothèses émises, les particules les plus lourdes se retrouvent près du point de dépôt. Cependant, la valeur de G_s est de 2,8 (±0,2) sans nécessairement être plus élevée près des digues. Ce constat se fait à tous les niveaux. La valeur de G_s, sur la zone d'étude, dépend surtout des minéraux moyennement lourds détectés en plus grande quantité que les minéraux lourds près des digues (voir section 4.1.1.1).

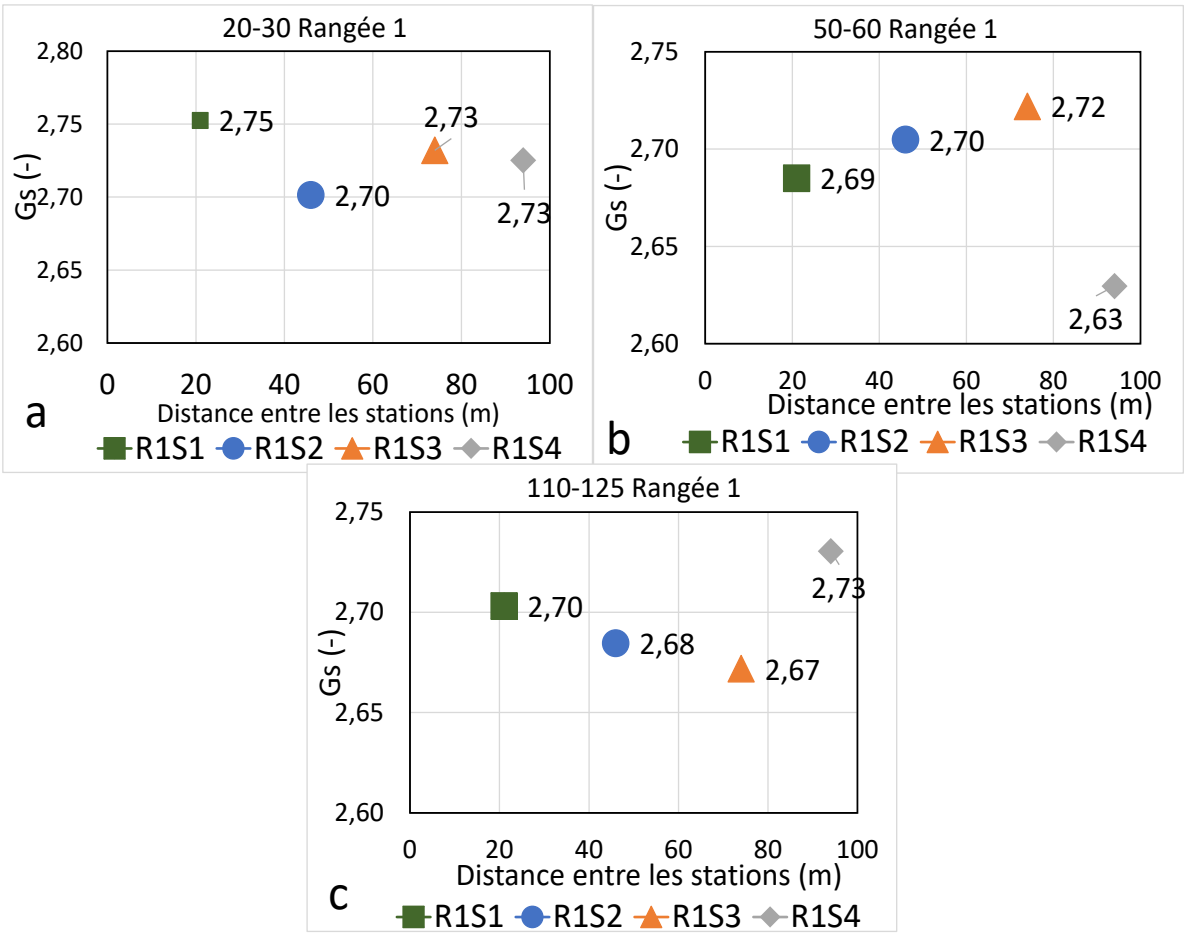


Figure 4.8 Distribution transversale de G_S sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

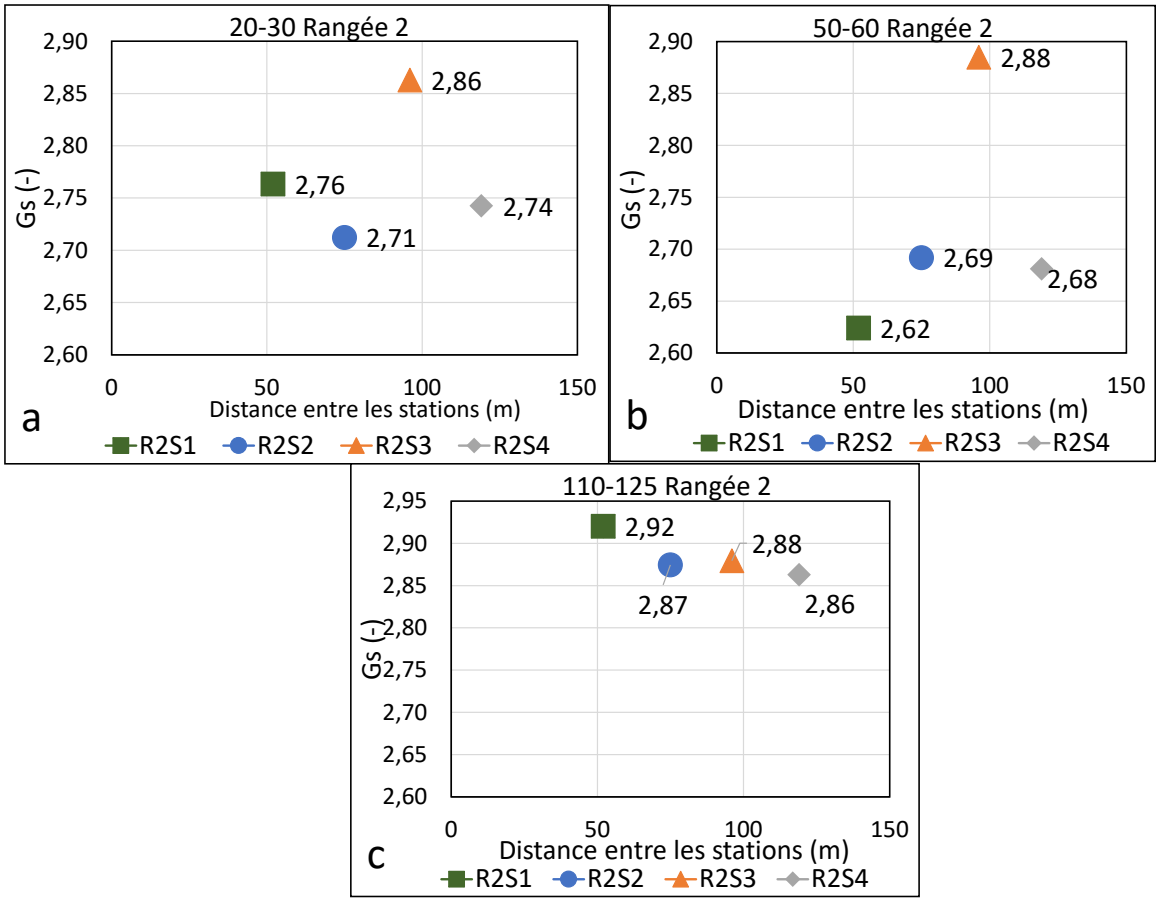


Figure 4.9 Distribution transversale de Gs sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

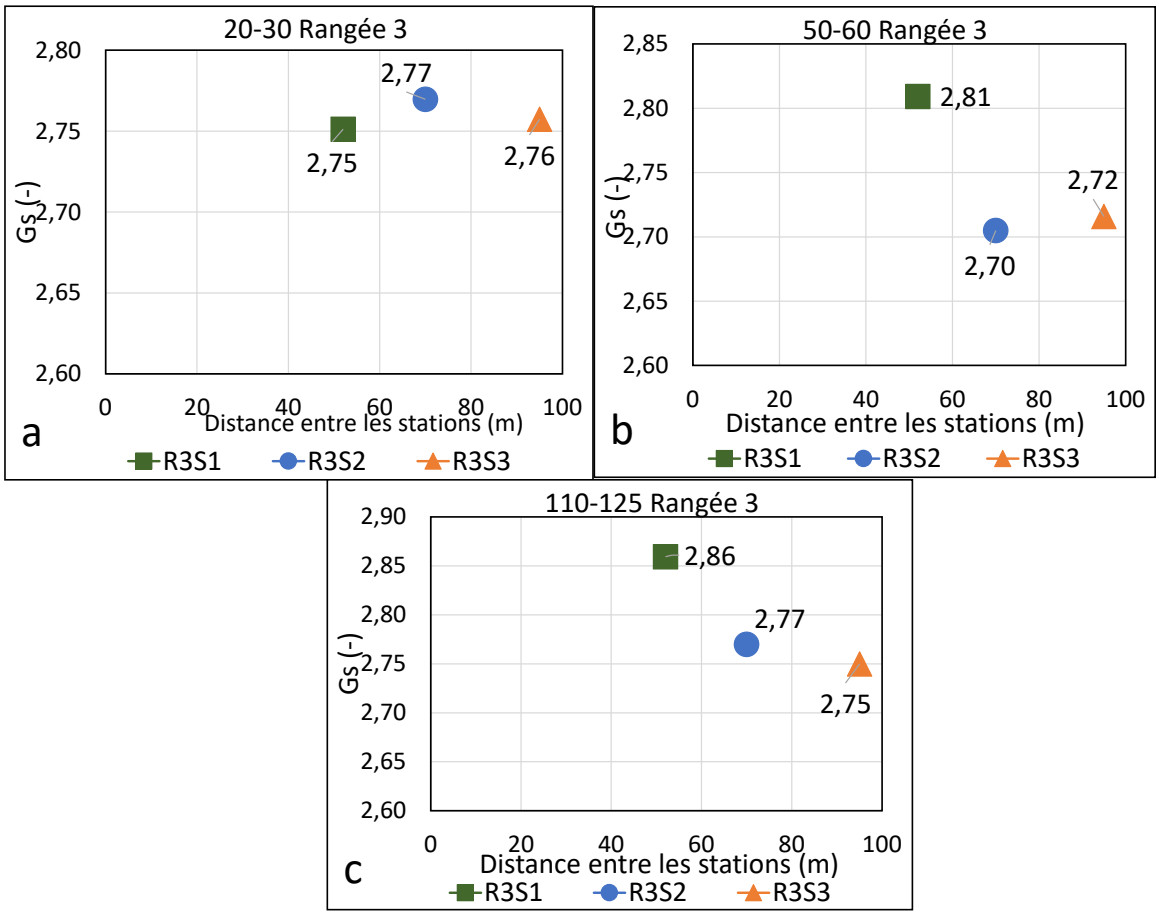


Figure 4.10 Distribution transversale de Gs sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

4.1.4 Distributions granulométriques

4.1.4.1 Distribution granulométrique par rangée

La Figure 4.11, présente les courbes granulométriques, toutes profondeurs incluses, des résidus pris sur toutes les stations des 3 rangées du parc 3 Est Doyon. En Annexe J se trouvent les paramètres granulométriques de tous les échantillons. Sur chaque graphique correspondant à une rangée, chaque station est identifiée par une couleur unique (bleu pour S1, orange pour S2, gris pour S3 et jaune pour S4). L'idée est de visualiser la distribution granulométrique des résidus des stations extrêmes par rapport aux stations du milieu de la rangée. Sur la rangée 1, la granulométrie des stations S4 semble la plus fine. Le Tableau 4.2 présente, pour chaque rangée, les paramètres

qui caractérisent le fuseau granulométrique des courbes enveloppes désignées par C1 (matériau le plus fin) et C2 (matériau le plus grossier). D'une part, les résidus de la rangée 1 semblent plus fins sur toute la profondeur que les résidus des 2 autres rangées. D'autre part, les paramètres granulométriques des résidus des rangées 2 et 3 sont similaires (15 µm < D_{60} < 160 µm pour la rangée 1; 10 µm < D_{50} < 110 µm pour la rangée 2; 10 µm < D_{50} < 100 µm; 11 µm < D_{60} < 110 µm pour la rangée 3). L'allure générale des courbes est semi-étalée (5 < C_U < 20). La proportion de particules fines (P_{80}) est inférieure à 50 % pour les courbes R2-C2 et R3-C2 mais supérieure à 50 % pour le reste des courbes enveloppes.

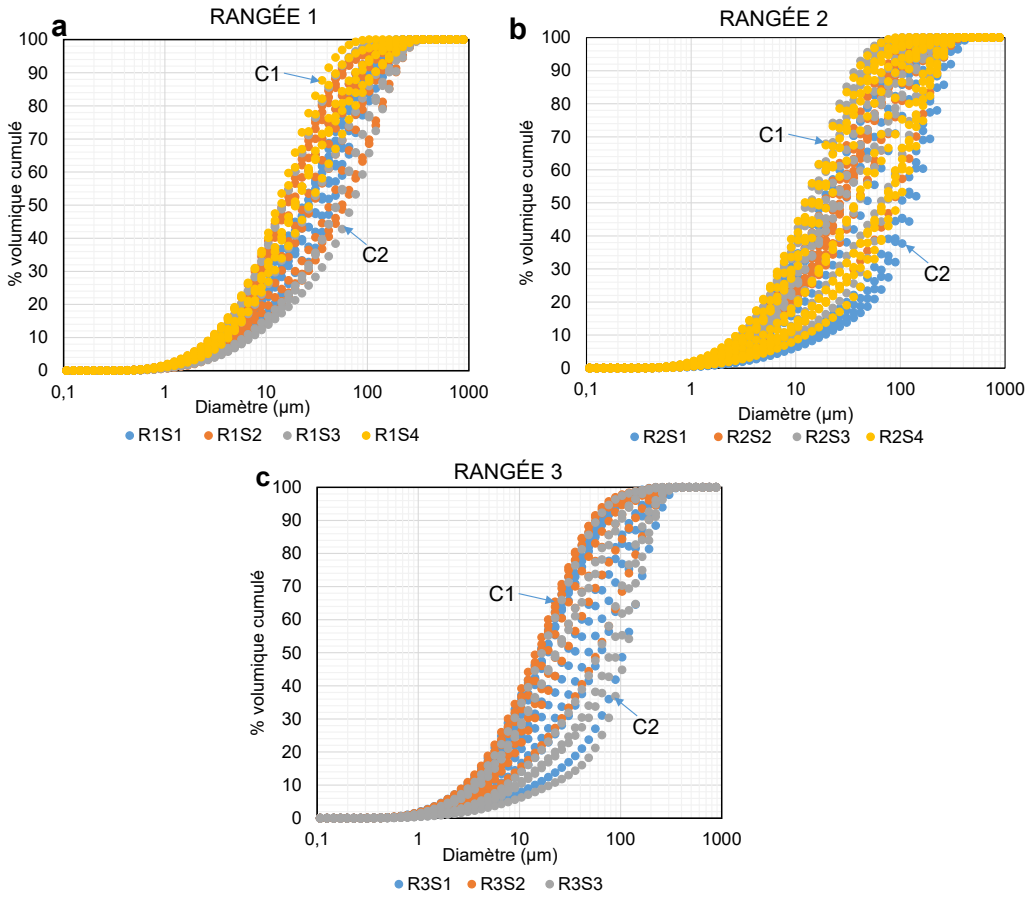


Figure 4.11 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus de : a) Rangée R1, b) Rangée R2, c) Rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Tableau 4.1 Paramètres des courbes granulométriques enveloppes de chaque rangée (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Rangée	Courbe enveloppe	D_{50} (µm)	D_{10} (µm)	D_{60} (µm)	C_U (-)	P_{80} (%)
R1	**C1**	10	2,1	10,4	5	100
	C2	70	7	100	14	54
R2	**C1**	10	2,1	15	7	100
	C2	110	20	160	8	29
R3	**C1**	10	2,7	11	4	99
	C2	100	11	110	10	30

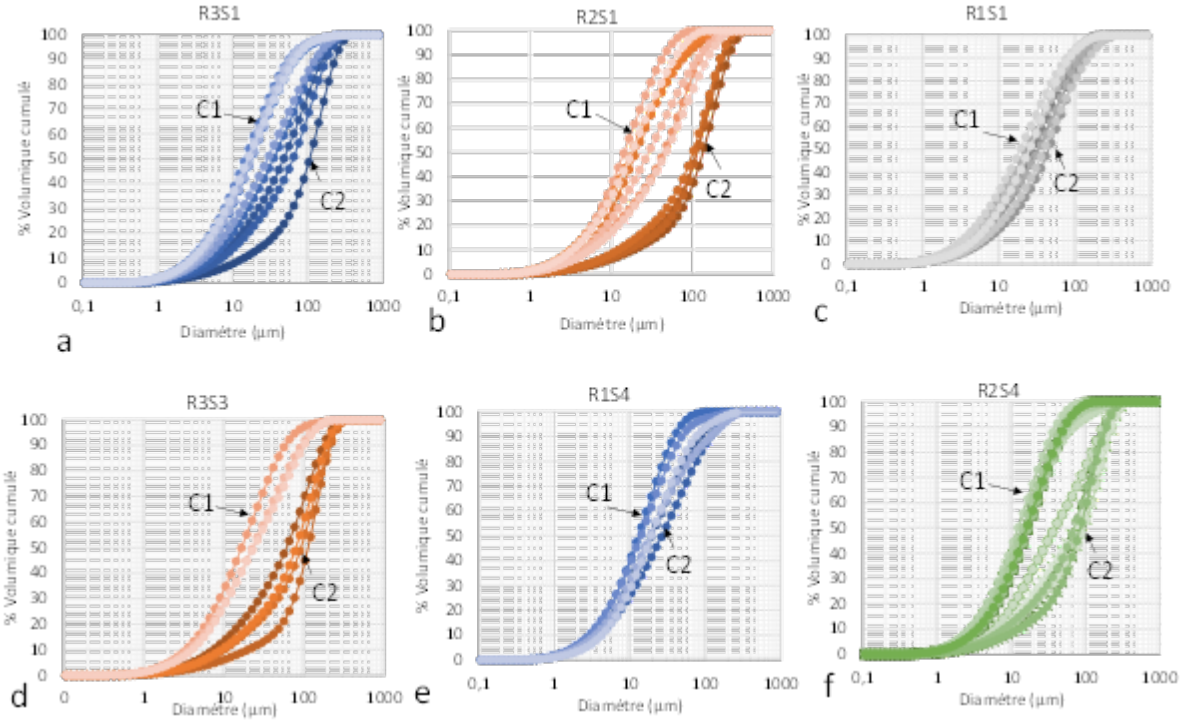


Figure 4.12 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus des stations : a) R3S1, b) R2S1, c) R1S1, d) R3S3, e) R1S4, f) R2S4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

La Figure 4.12 regroupe particulièrement les courbes granulométriques, toutes profondeurs incluses, des résidus échantillonnés sur quelques stations des trois rangées du parc 3 Est Doyon. Dans le Tableau 4.2 se trouvent, pour chaque station, les paramètres qui caractérisent le fuseau granulométrique des courbes enveloppes indexées C1 (matériau le plus fin) et C2 (matériau le plus grossier). Les résidus sont fins (en général, $50 < P_{80} < 100$ %). L'allure des courbes est semi-étalée ($5 < C_U < 20$).

Tableau 4.2 Paramètres des courbes granulométriques enveloppes de chaque station (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Stations	Courbe enveloppe	D_{50} (µm)	D_{10} (µm)	D_{60} (µm)	C_U (-)	Cc (-)	P_{80} (%)
R1S1	C1	18,9	3,2	25,9	8,1	1,1	90,5
	C2	44,7	6,5	57,7	8,9	1,5	73,6
R1S2	C1	17,0	3,6	22,6	6,3	1,0	92,3
	C2	38,9	6	49,4	8,3	1,5	80,1
R1S3	C1	14,7	3,3	19,3	5,9	1,1	96,8
	C2	69,8	7,1	90,5	12,7	1,7	55,0
R1S4	C1	13,0	3,0	16,7	5,5	1,1	99,9
	C2	26,6	3,9	38,0	9,8	1,0	81,3
R2S1	C1	28,9	4,6	40,3	8,7	1,0	79,6
	C2	155,2	15,0	190,9	12,7	2,6	28,5
R2S2	C1	39,6	4,9	52,2	10,7	1,3	77,1
	C2	84,2	8,4	110,9	13,2	1,4	48,3
R2S3	C1	13,9	3,0	18,1	6,0	1,1	99,1
	C2	64,1	7,3	90,3	12,4	1,0	56,1
R2S4	C1	12,2	2,7	15,9	5,8	1,1	99,6
	C2	84,8	12,4	103,2	8,3	2,0	47,1
R3S1	C1	16,0	2,9	22,3	7,6	1,0	92,8
	C2	106,5	9,1	129,3	14,3	3,4	37,7
R3S2	C1	14,5	2,9	19,3	6,7	1,1	95,2
	C2	58,9	6,4	80,9	12,6	1,3	59,5
R3S3	C1	16,7	3,4	22,1	6,6	1,1	95,1
	C2	112,7	20,1	131,3	6,5	2,2	32,2

4.1.4.2 Distribution verticale de D_{50}

La Figure 4.13, ci-après, présente la répartition verticale de D_{50} sur chaque rangée. Sur chaque rangée, les nuages de points sont assez resserrés, mais dispersés à partir de 80 cm. Sur la rangée 1, $15 < D_{50} < 50$ µm; sur la rangée 2, $13 < D_{50} < 100$ µm; sur la rangée 3, $15 < D_{50} < 40$ µm pour la plupart des points situés de la surface à 80 cm. Sur la rangée 1, $15 < D_{50} < 100$ µm; sur la rangée 2, $13 < D_{50} < 205$ µm; sur la rangée 3, $30 < D_{50} < 120$ µm, à partir de 80 cm. Les résidus semblent être plus grossiers en profondeur.

La Figure 4.13 montre aussi la répartition verticale de D_{50} sur chaque station. Chaque station est marquée par une couleur. Les valeurs de D_{50} varient entre 19 et 44 µm sur R1S1, 17 et 95 µm sur

R1S2, 15 et 70 µm sur R1S3, 13 et 26 µm sur R1S4, 14 et 155 µm sur R2S1, 18 et 84 µm sur R2S2, 13 et 64 µm sur R2S3, 12 et 95 µm sur R2S4, 16 et 106 µm sur R3S1, 15 et 59 µm sur R3S2, 17 et 112 µm sur R3S3.

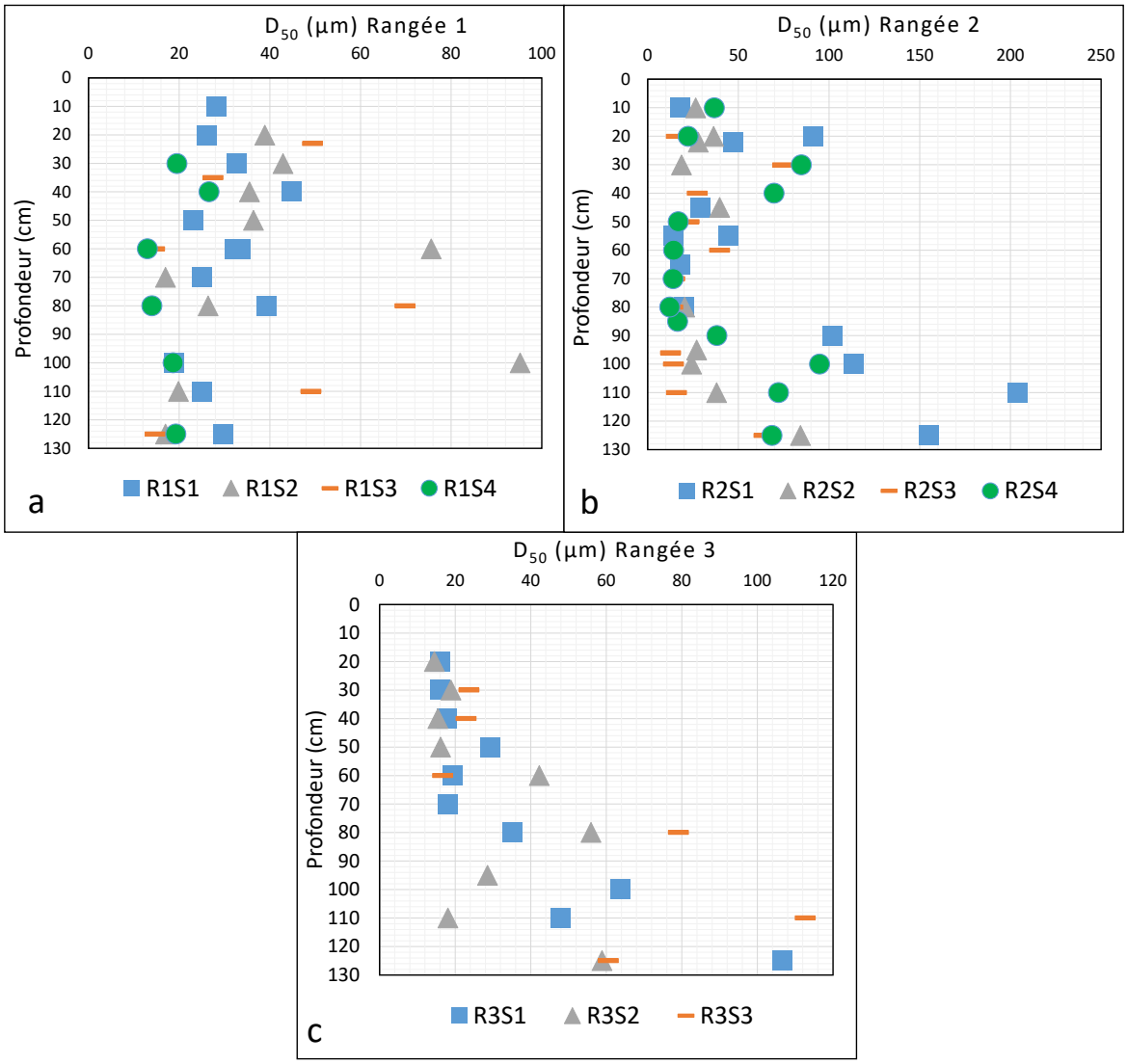


Figure 4.13 Distribution verticale du diamètre médian D_{50} sur la : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

4.1.4.3 Distribution verticale de P_{80}

La Figure 4.14 présente la distribution verticale de P_{80} sur chaque rangée. Sur la rangée 1, le nuage de points est assez resserré tandis que sur les rangées 2 et 3, il est dispersé. Sur la rangée 1, 67 < P_{80} < 100 %; sur la rangée 2, 25 < P_{80} < 100 %; sur la rangée 3, 30 < P_{80} < 100 %. Les résidus semblent être plus fins, de la surface à environ 80 cm, sur les rangées 2 et 3.

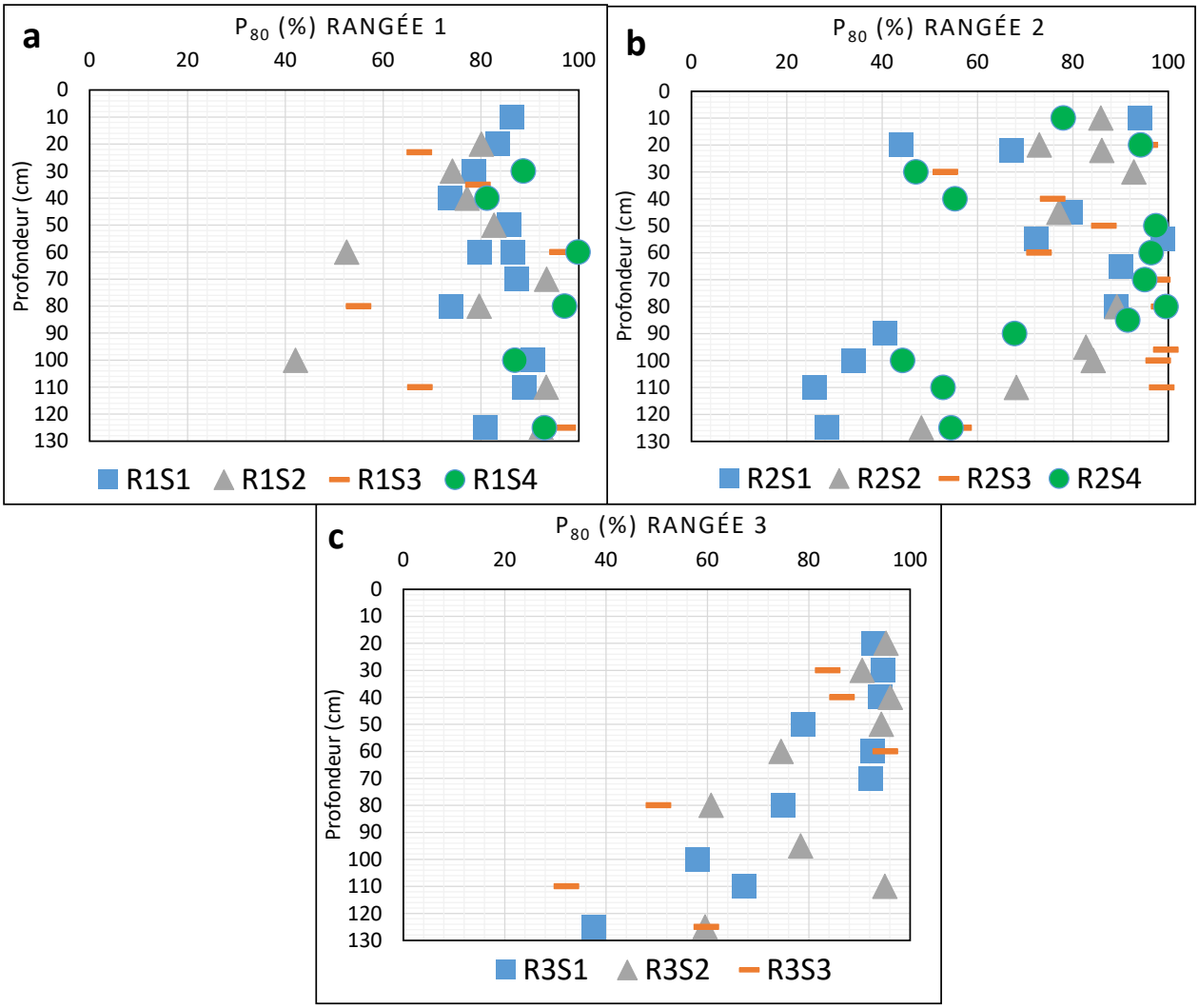


Figure 4.14 Profil vertical de P_{80} sur la : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

4.1.4.4 Distribution granulométrique transversale

La répartition transversale des courbes granulométriques sur 60 cm de profondeur est décrite sur les Figures 4.15, 4.16, 4.17. Généralement, la distribution granulométrique est aléatoire de la station S1 vers la station S4 sauf sur la rangée 2 où la taille des particules décroît de S1 à S4. C'est d'ailleurs pour cette raison que des essais de consommation d'oxygène ont été réalisés sur cette rangée R2 (Driouky, 2020).

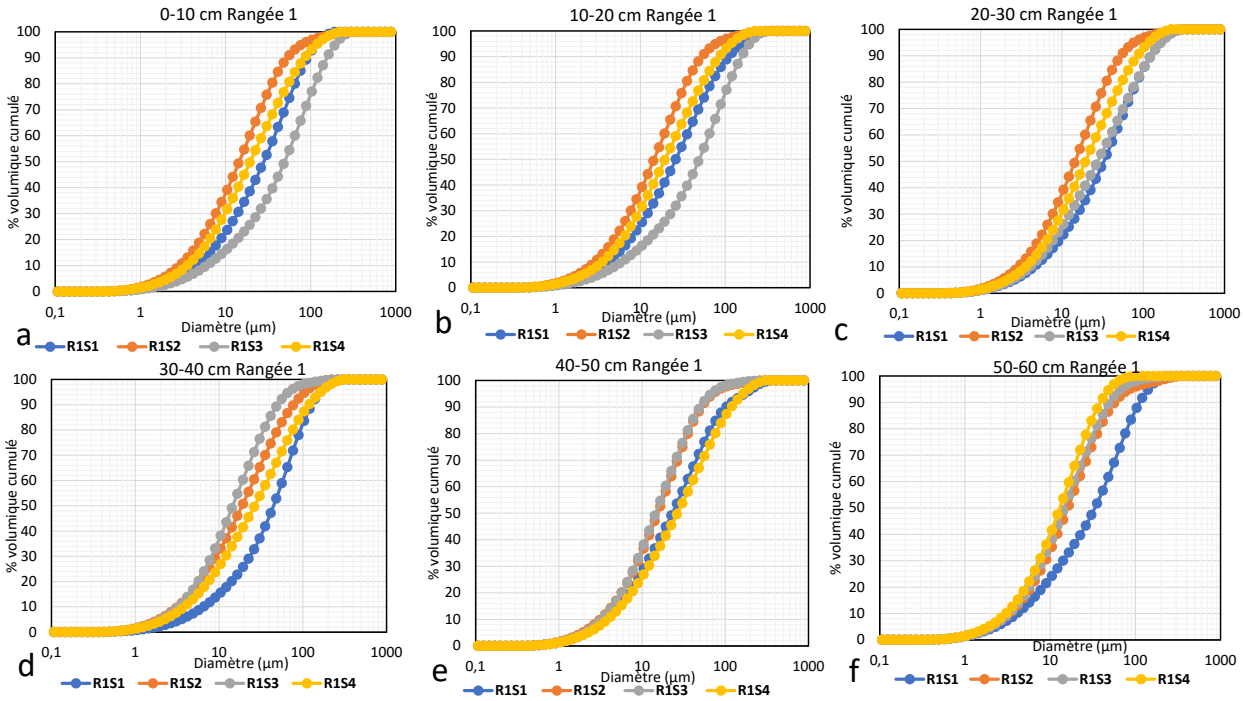


Figure 4.15 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

À partir des valeurs identifiées sur les Figures 4.15 à 4.17, des distributions transversales des caractéristiques granulométriques D_{50} et P_{80} ont été établies pour toutes les profondeurs et toutes les rangées et sont présentées en Annexe K. À titre illustratif, la répartition transversale des paramètres D_{50} et P_{80} pour les rangées 1, 2 et 3 pour les échantillons prélevés, est présentée aux niveaux 20-30 cm, 50-60 cm et 110-125 cm. La distance entre les stations S1 et S4 est 73 m sur la rangée 1, 67 m sur la rangée 2 et 68 m sur la rangée 3. Les Figures 4.18 à 4.20 montrent respectivement la distribution transversale de D_{50} pour chacune des rangées R1 à R3. Les Figures 4.11 à 4.23 montrent respectivement la distribution transversale de P_{80} pour chacune des rangées R1 à R3. D'après les résultats statistiques de comparaison, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs P_{80} à chaque niveau, sur les stations de chaque rangée et d'une rangée par rapport à l'autre. En effet, les p-value calculées sont supérieures à 0,05 : est de 0,65 pour la rangée R1, 0,42 pour la rangée R2 et 0,06 pour la rangée R3.

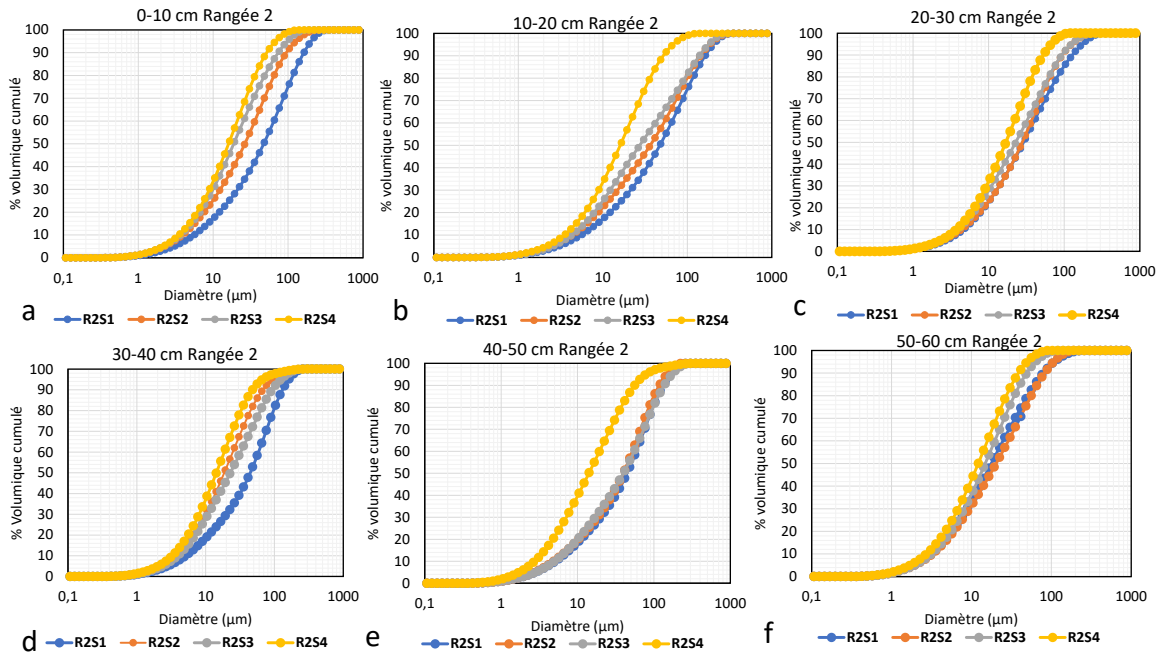


Figure 4.16 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

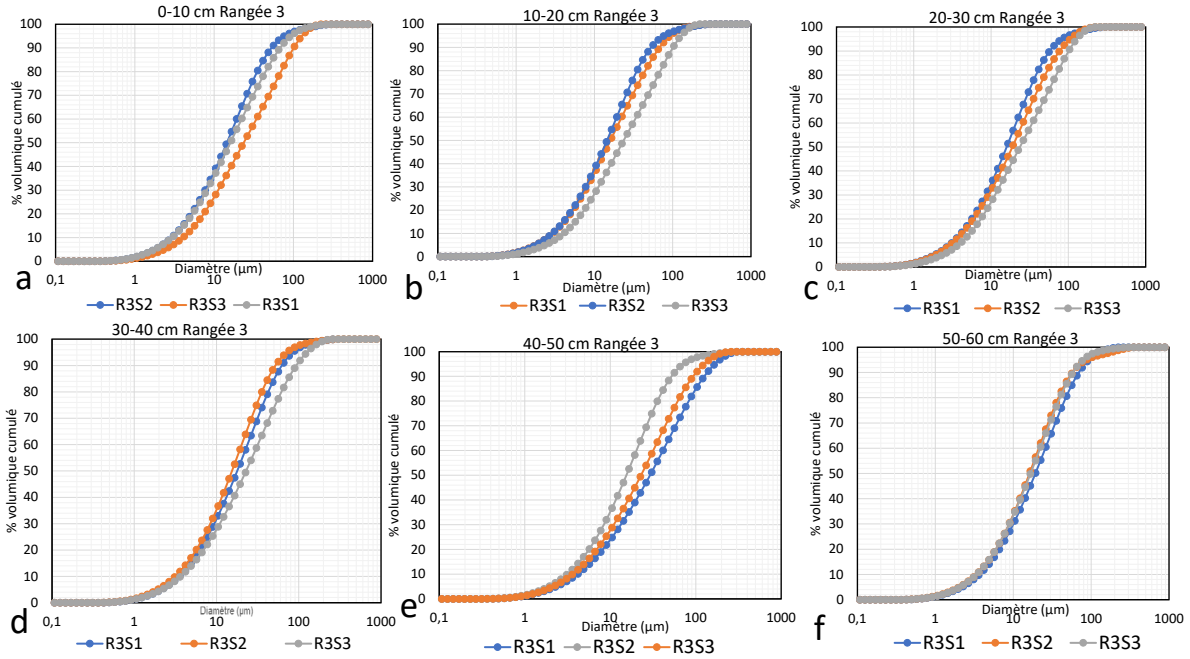


Figure 4.17 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

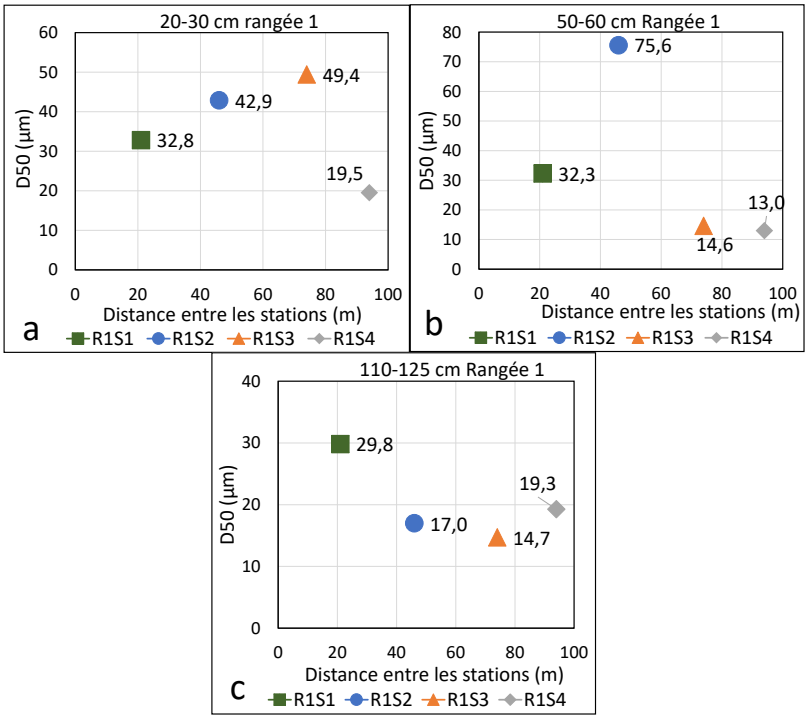


Figure 4.18 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

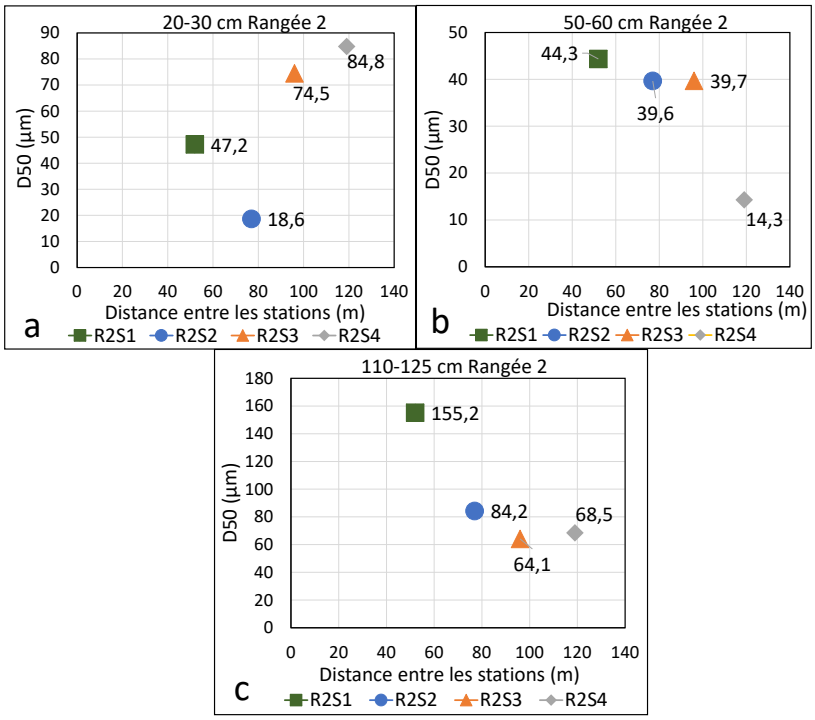


Figure 4.19 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

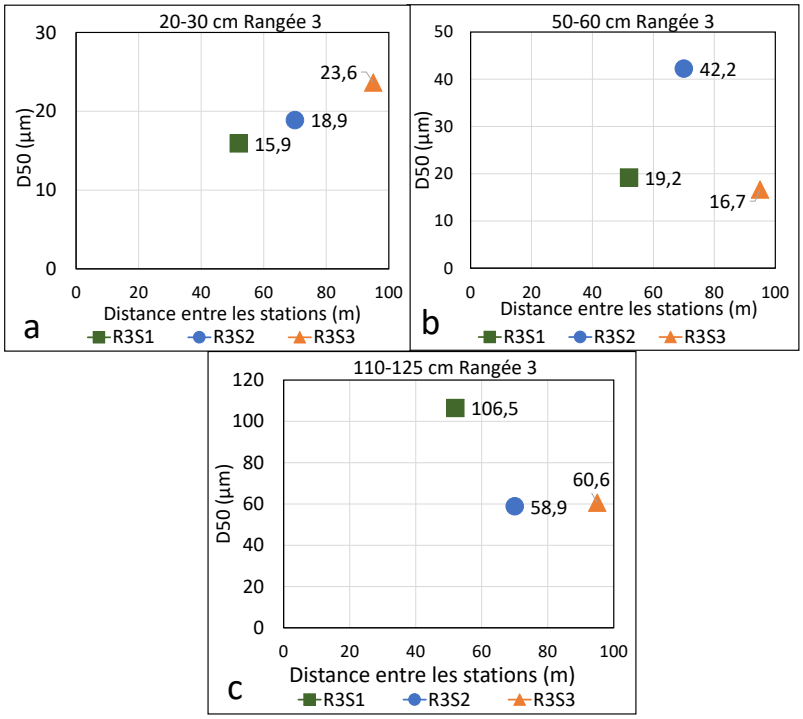


Figure 4.20 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

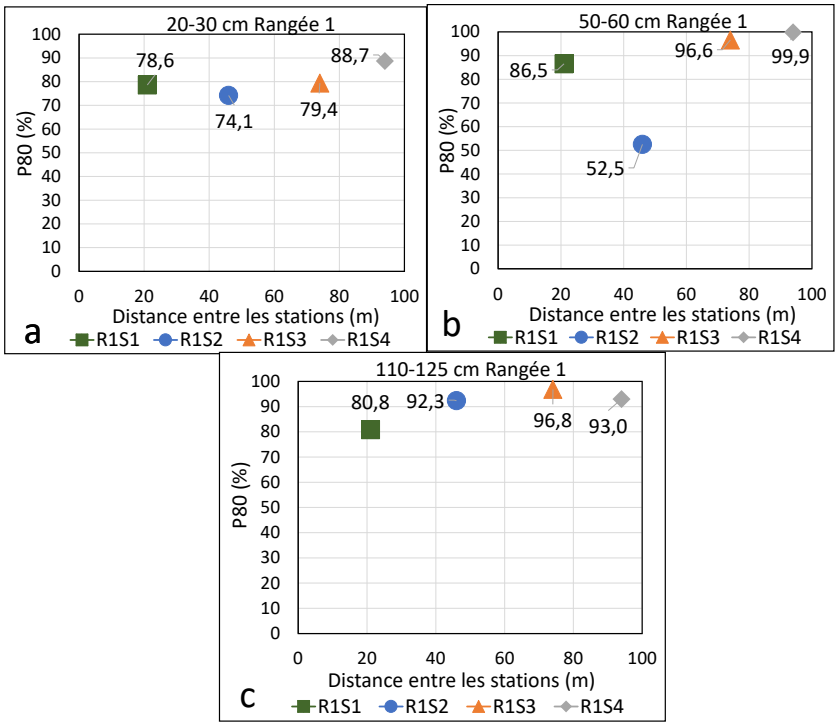


Figure 4.21 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

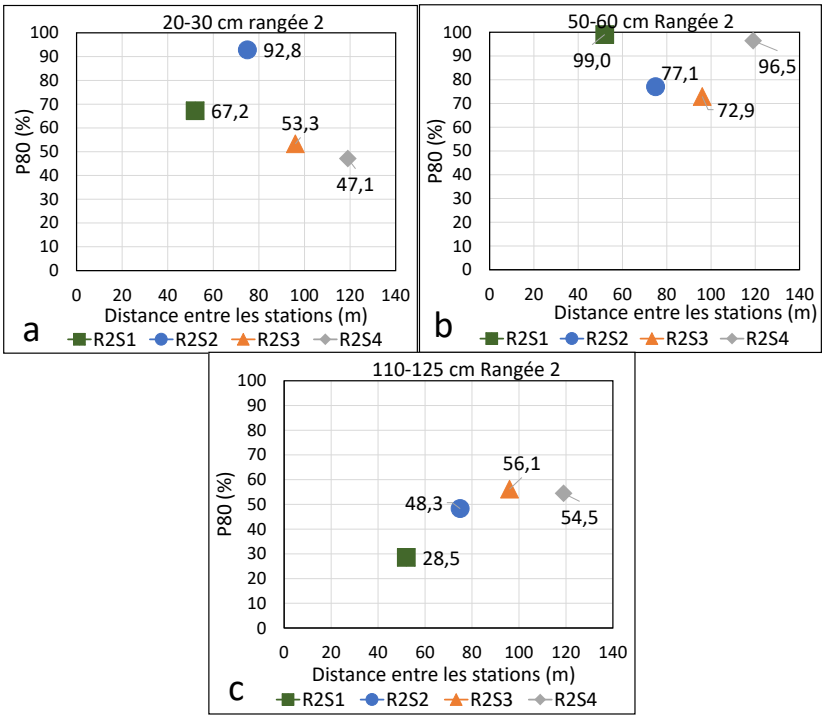


Figure 4.22 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

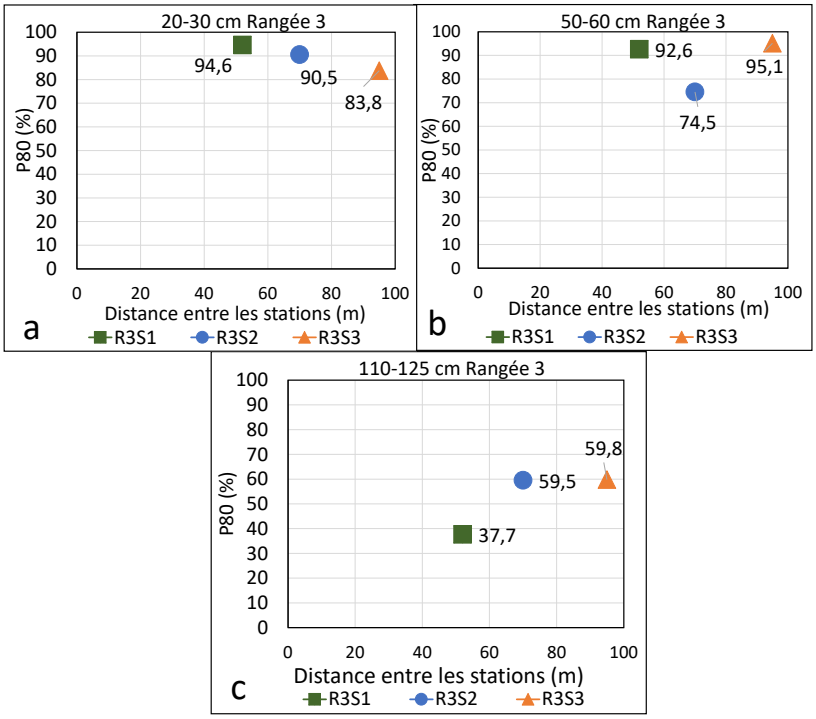


Figure 4.23 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

4.2 Parc 3 du site Manitou/Goldex

4.2.1 Distribution transversale des minéraux

Les analyses minéralogiques ont été réalisés sur les résidus prélevés en surface (0-20cm) au niveau de toutes les stations de la rangée R1 seulement (voir section 3.5.2). L'annexe L présente les résultats obtenus. Les minéraux présents (avec leur densité) sont des silicates (quartz avec G_s= 2,6, albite avec G_s= 2,6, ferro-actinolite avec G_s= 2,98 à 3,1, clinozoïsite avec G_s=3,3 à 3,4, chlorite avec G_s=2,77 à 2,88 et muscovite avec G_s=2,9) et des carbonates (calcite avec G_s=2,7, dolomite avec G_s=2,8 à 2,9) (http ://webmineral.com). Les pourcentages massiques de chlorite, calcite, clinozoïsite sont comparables à ceux consignés par Éthier (2018) qui sont respectivement de 8,5, 7,2 et 3,3 % pour les résidus Goldex de la monocouche du parc 2 du site Manitou/Goldex. Par exemple, sur la station R1S1, les pourcentages massiques de chlorite, calcite, clinozoïsite sont respectivement de 6,5, 6 et 2%. L'albite est le minéral le plus abondant dans les résidus (38 % sur R1S1, 39 % sur R1S2, 36 % sur R1S3, 36 % sur R1S4).

La Figure 4.24 montre une distribution transversale des minéraux au niveau de la rangée R1. Les minéraux semblent être uniformément répartis sur les stations de la rangée R1.

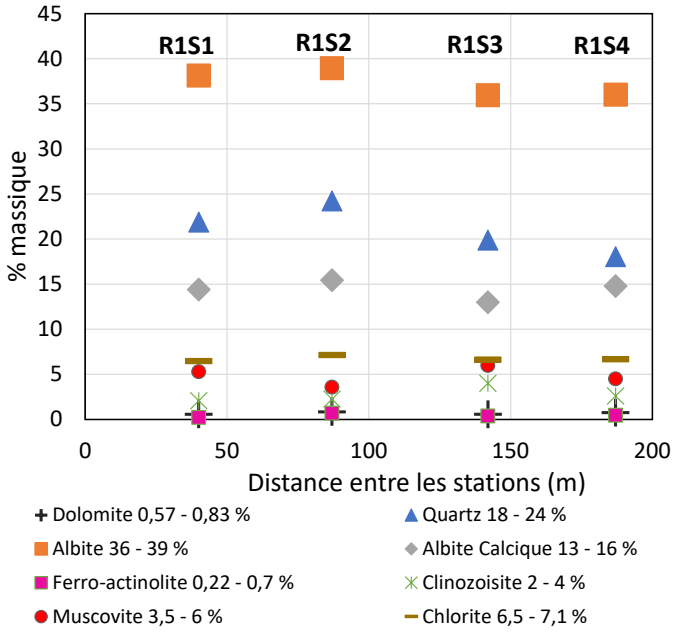


Figure 4.24 Distribution transversale du pourcentage massique des minéraux dans les résidus Goldex prélevés en surface (0-20 cm) sur la rangée 1 (Parc 3 Manitou/Goldex)

4.2.2 Densité relative des grains solides G_s

Un total de 127 valeurs de G_s correspondant aux 12 stations du parc 3 Manitou/Goldex a été déterminé (voir Annexe M). La Figure 4.25 montre le profil vertical des densités de chaque station par rangée. Après le test ANOVA, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de G_s (après une comparaison entre les 3 rangées, p-value = 0,09). L'allure des nuages de points montre que les valeurs G_s en surface sont proches de celles en profondeur. Généralement, la valeur de G_s est de 2,8 (±0,2) sur la zone d'étude. La faible variabilité de G_s procède de la minéralogie identique des résidus dans le parc.

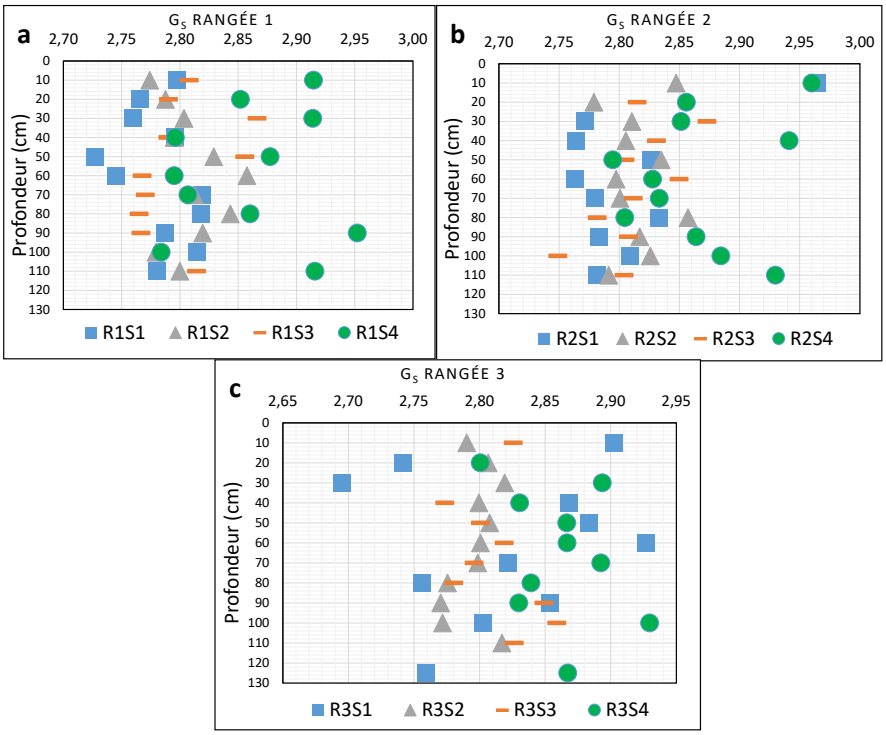


Figure 4.25 Profil vertical des densités G_s sur : a) rangée R1, b) rangée R2 et c) rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex)

L'ensemble des distributions transversales de G_s pour toutes les profondeurs et toutes les rangées est présenté en Annexe N. D'après les résultats statistiques de comparaison, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de G_s sur les stations de chaque rangée (p-value = 0,28). Les Figures 4.26 à 4.28 montrent la distribution transversale de G_S à des profondeurs de 20-30 cm, 50-60 cm, et 110-125 cm pour les rangées R1, R2 et R3. Aucune tendance ne peut être dégagée quant à la distribution de ces paramètres sur les distances considérées.

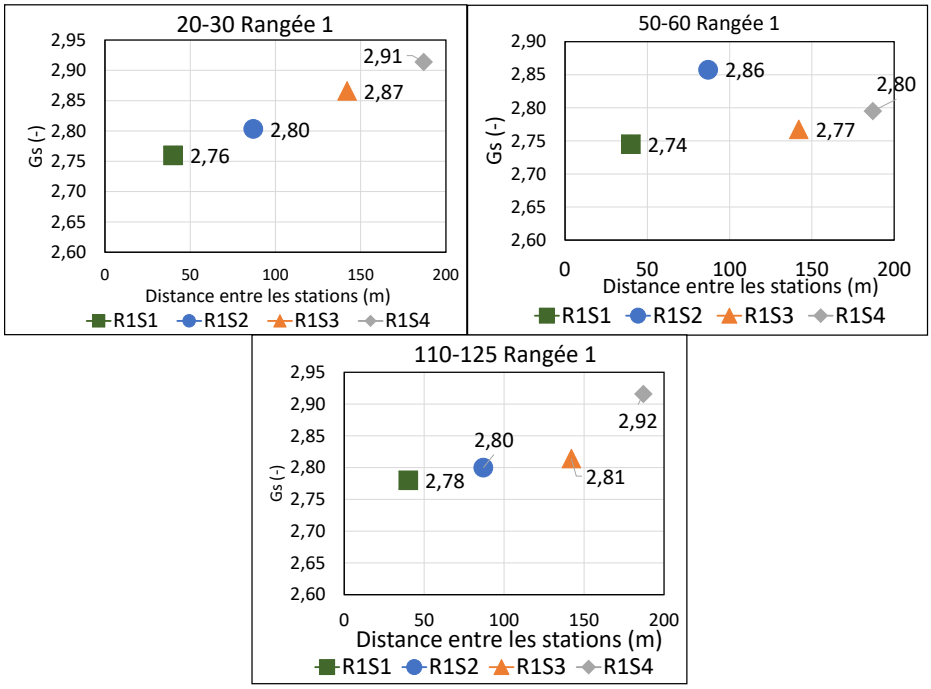


Figure 4.26 Distribution transversale de Gs des résidus de la rangée R1 aux profondeurs de : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

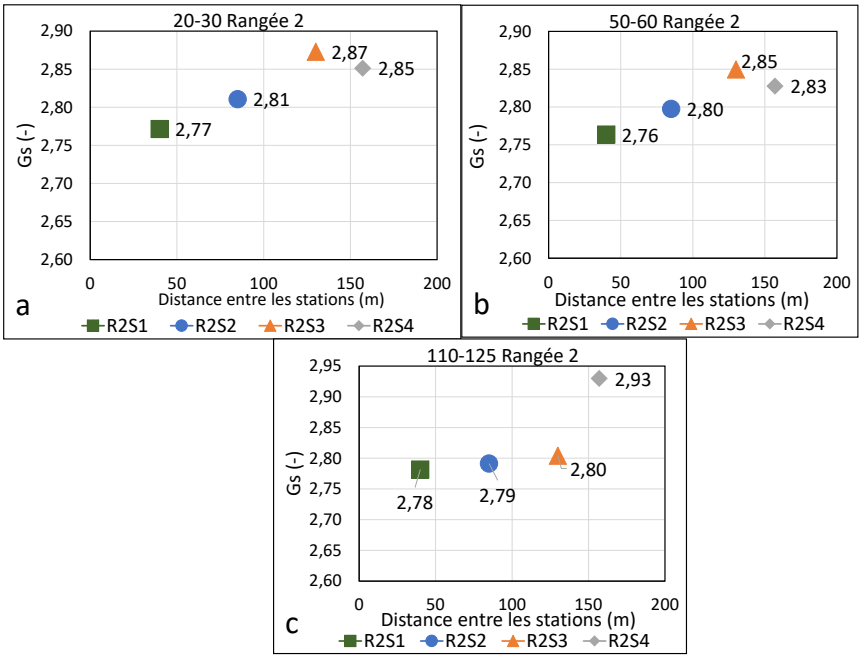


Figure 4.27 Distribution transversale de Gs sur la rangée 2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

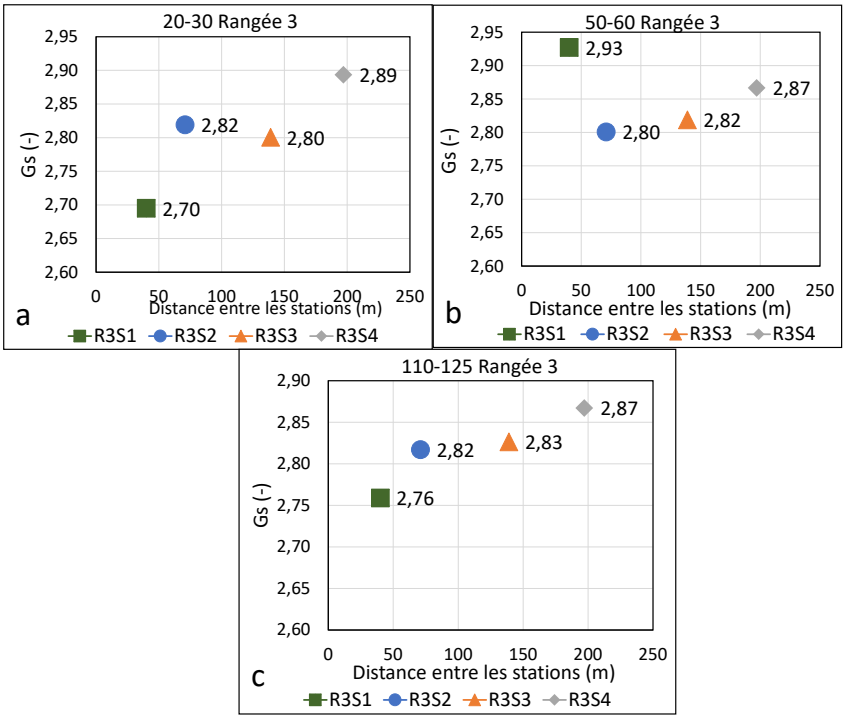


Figure 4.28 Distribution transversale de Gs sur la rangée 3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

4.2.3 Distributions granulométriques

4.2.3.1 Distribution granulométrique par rangée

La Figure 4.29 présente l'ensemble des courbes granulométriques, toutes profondeurs incluses, des résidus pris sur toutes les stations des 3 rangées du parc 3 Manitou. En Annexe O se trouvent les paramètres granulométriques de tous les échantillons. Sur chaque graphique correspondant à une rangée, chaque station est identifiée par une couleur unique. Sur les 3 rangées, la granulométrie des résidus des stations S4 semble être la plus fine. Néanmoins, la granulométrie la plus grossière ne se retrouve pas nécessairement à la station S1. Les paramètres qui caractérisent le fuseau granulométrique des courbes enveloppes indexées C1 et C2 sont présentés dans le Tableau 4.3. Les fuseaux granulométriques des résidus associés à C1 et C2 des rangées 1, 2 et 3 sont similaires ($11 < D_{50} < 129{,}3$ pour la rangée R1; $12{,}9 < D_{50} < 119{,}2$ pour la rangée 2; $17{,}3 < D_{50} < 140{,}5$ pour la rangée 3). L'allure générale de toutes les courbes est semi-étalée ($5 < C_U < 20$).

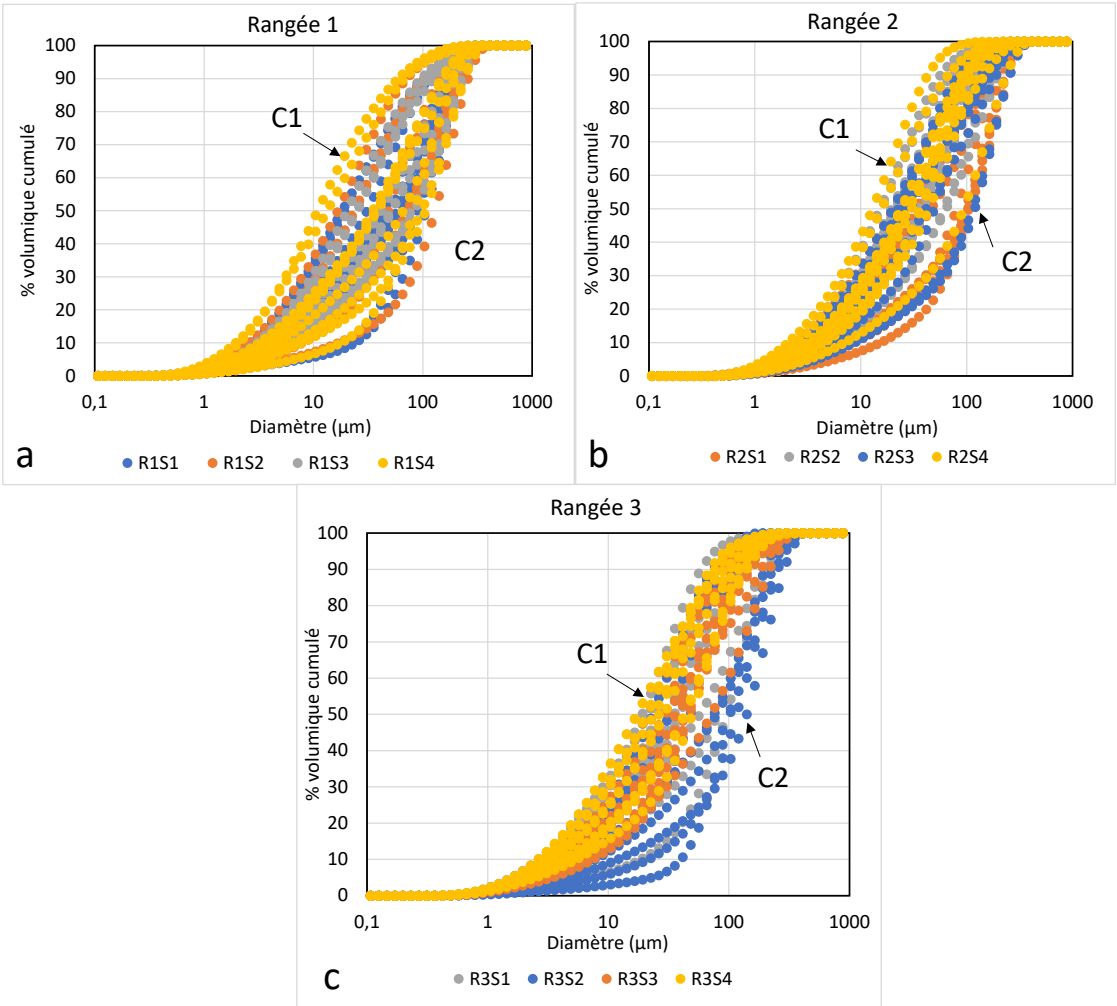


Figure 4.29 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus : a) Rangée R1, b) Rangée R2, c) Rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex)

Tableau 4.3 Paramètres des courbes granulométriques enveloppes de chaque rangée (Parc 3 Manitou/Goldex)

Rangées	**Courbe enveloppe**	**D_{50} (µm)**	**D_{10} (µm)**	**D_{60} (µm)**	**C_U (-)**	**P_{80} (%)**
Rangée 1	**C1**	11	2,1	15,3	7,3	93,6
	C2	129,3	17,0	153,9	9,0	29,9
Rangée 2	**C1**	12,9	2,1	17,2	8,4	98,6
	C2	119,2	8,3	146,0	17,6	35,9
Rangée 3	**C1**	17,3	2,6	24,6	9,4	87,9
	C2	140,5	12,0	169,7	14,2	30,6

La Figure 4.30 présente les courbes granulométriques, toutes profondeurs incluses, des résidus pris sur les stations S1 des 3 rangées du parc 3 Manitou. Les résidus sont majoritairement fins et l'allure des courbes est semi-étalée ($5 < C_U < 20$). La granulométrie varie d'une profondeur à une autre et d'une manière aléatoire. Le Tableau 4.4 présente, pour toutes les stations S1, les paramètres qui caractérisent le fuseau granulométrique des courbes enveloppes indexées C1 et C2. À titre de comparaison, des résidus Goldex prélevées entre 20 et 50 cm sous la surface dans 13 stations de la monocouche du parc 2 du site Manitou/Goldex présentaient aussi une granulométrie très hétérogène : 1,6 µm < D_{10} < 63,8 µm; 13,5 < D_{50} < 148,5 µm; 18,2 < D_{60} < 182 µm; 2,7 < C_U < 21,4 (Ethier, 2018).

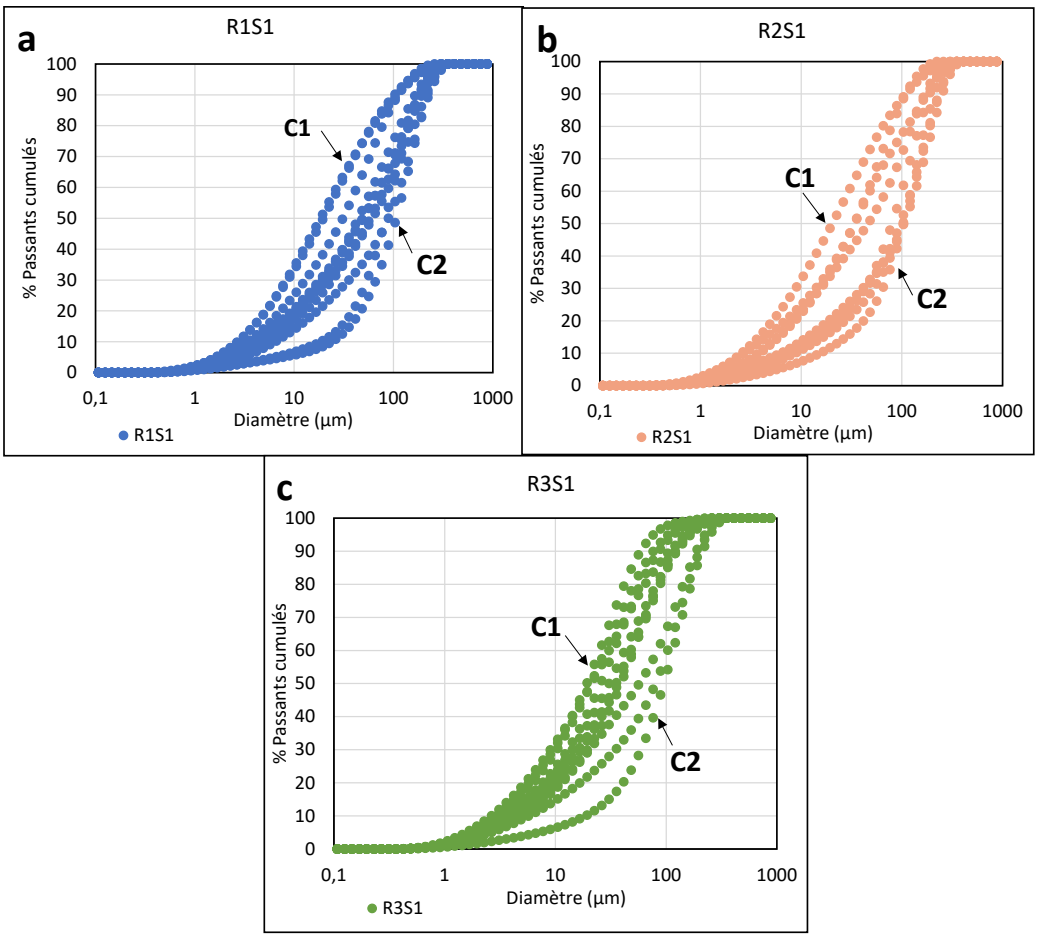


Figure 4.30 Courbes granulométriques (toutes profondeurs incluses) des résidus : a) R1S1, b) R2S1, c) R3S1 (Parc 3 Manitou/Goldex)

Tableau 4.4 Paramètres granulométriques des courbes enveloppes de chaque station (Parc 3 Manitou/Goldex)

Stations	Courbe enveloppe	D_{50} (µm)	D_{10} (µm)	D_{60} (µm)	C_U (-)	P_{80} (%)
R1S1	**C1**	61	5	81	15	59
	C2	106	24	128	5	37
R2S1	**C1**	20	3	30	12	84
	C2	104	15	123	8	38
R3S1	**C1**	19	3	25	9	95
	C2	95	19	116	6	42
R1S2	**C1**	17	3	23	9	92
	C2	129	17	154	9	30
R2S2	**C1**	15	3	21	8	95
	C2	61	5	81	15	59
R3S2	**C1**	23	3	30	9	92
	C2	101	40	118	3	35
R1S3	**C1**	20	3	28	9	87
	C2	78	6	108	18	51
R2S3	**C1**	23	3	31	10	89
	C2	119	8	146	18	36
R3S3	**C1**	21	3	29	10	84
	C2	71	6	99	15	53
R1S4	**C1**	11	2	15	7	94
	C2	83	18	101	6	48
R2S4	**C1**	13	2	17	8	99
	C2	93	7	120	17	45
R3S4	**C1**	21	3	28	10	93
	C2	49	5	61	11	73

4.2.3.2 Distribution verticale de D_{50}

La Figure 4.31 montre la répartition verticale de D_{50} pour toutes les stations d'une même rangée. Les nuages de points sont dispersés et les valeurs de D_{50} varient généralement entre 10 et 100 µm. Les valeurs de D_{50} varient entre 20 et 107 µm sur R1S1, 17 et 129 µm sur R1S2, 20 et 112 µm sur R1S3, 11 et 106 µm sur R1S4, 14 et 104 µm sur R2S1, 15 et 64 µm sur R2S2, 20 et 119 µm sur R2S3, 13 et 94 µm sur R2S4, 19 et 95 µm sur R3S1, 23 et 140 µm sur R3S2, 21 et 71 µm sur R3S3, 17 et 49 µm sur R3S4.

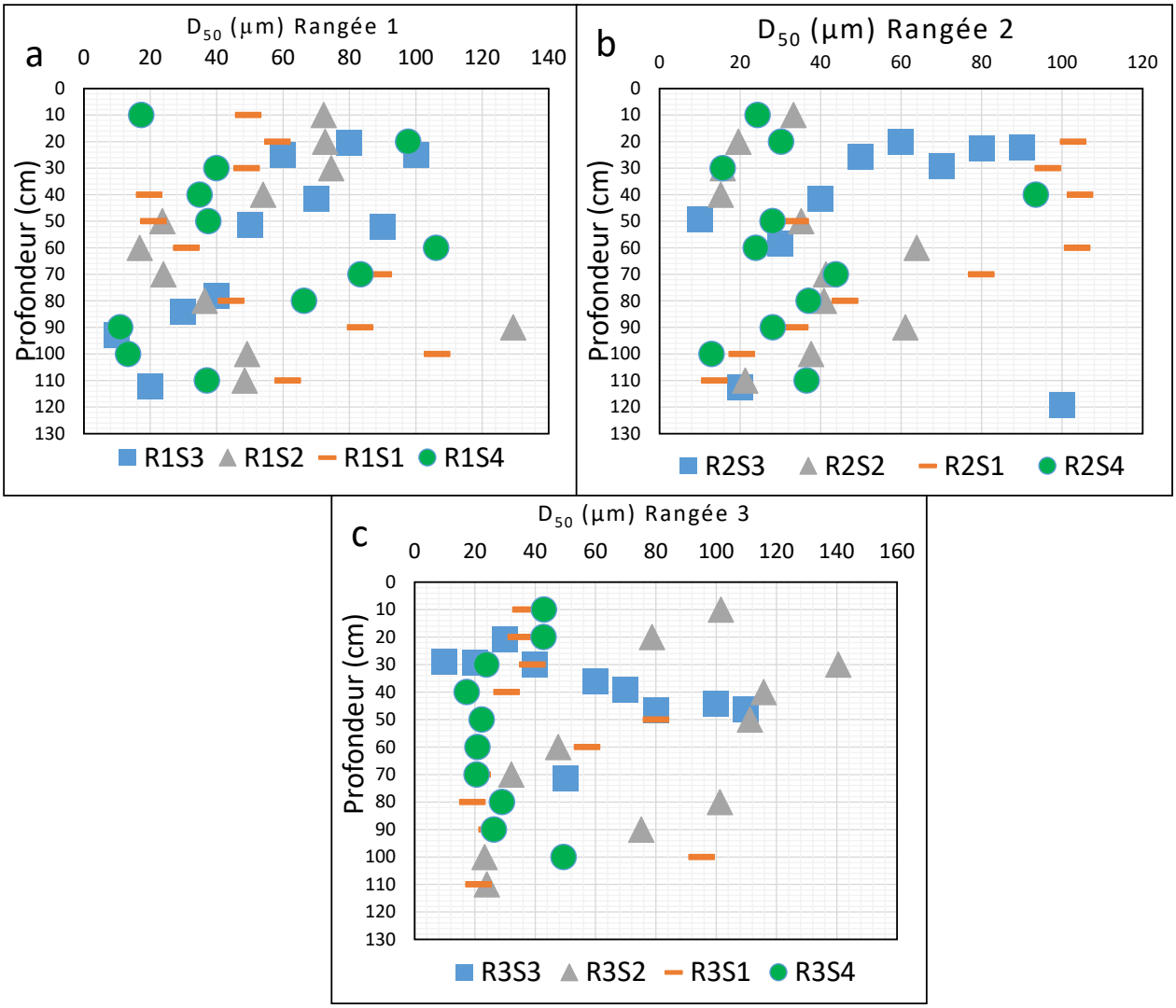


Figure 4.31 Distribution verticale du diamètre médian D_{50} : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex)

4.2.3.3 Distribution verticale de P_{80}

La Figure 4.32 présente la distribution verticale de P_{80} pour les différentes stations d'une rangée donnée. Les nuages de points sont dispersés, toutefois les points sont distribués de manière régulière de la surface jusqu'à la profondeur. Les valeurs oscillent majoritairement entre 40 et 100 %. P_{80} varie entre 37 et 86 % sur R1S1, 30 et 92 % sur R1S2, 38 et 87 % sur R1S3, 40 et 94 % sur R1S4, 38 et 96 % sur R2S1, 57 et 95 % sur R2S2, 36 et 89 % sur R2S3, 45 et 99 % sur R2S4, 42 et 95 % sur R3S1, 31 et 92 % sur R3S2, 53 et 88 % sur R3S3, 72 et 93 % sur R3S4.

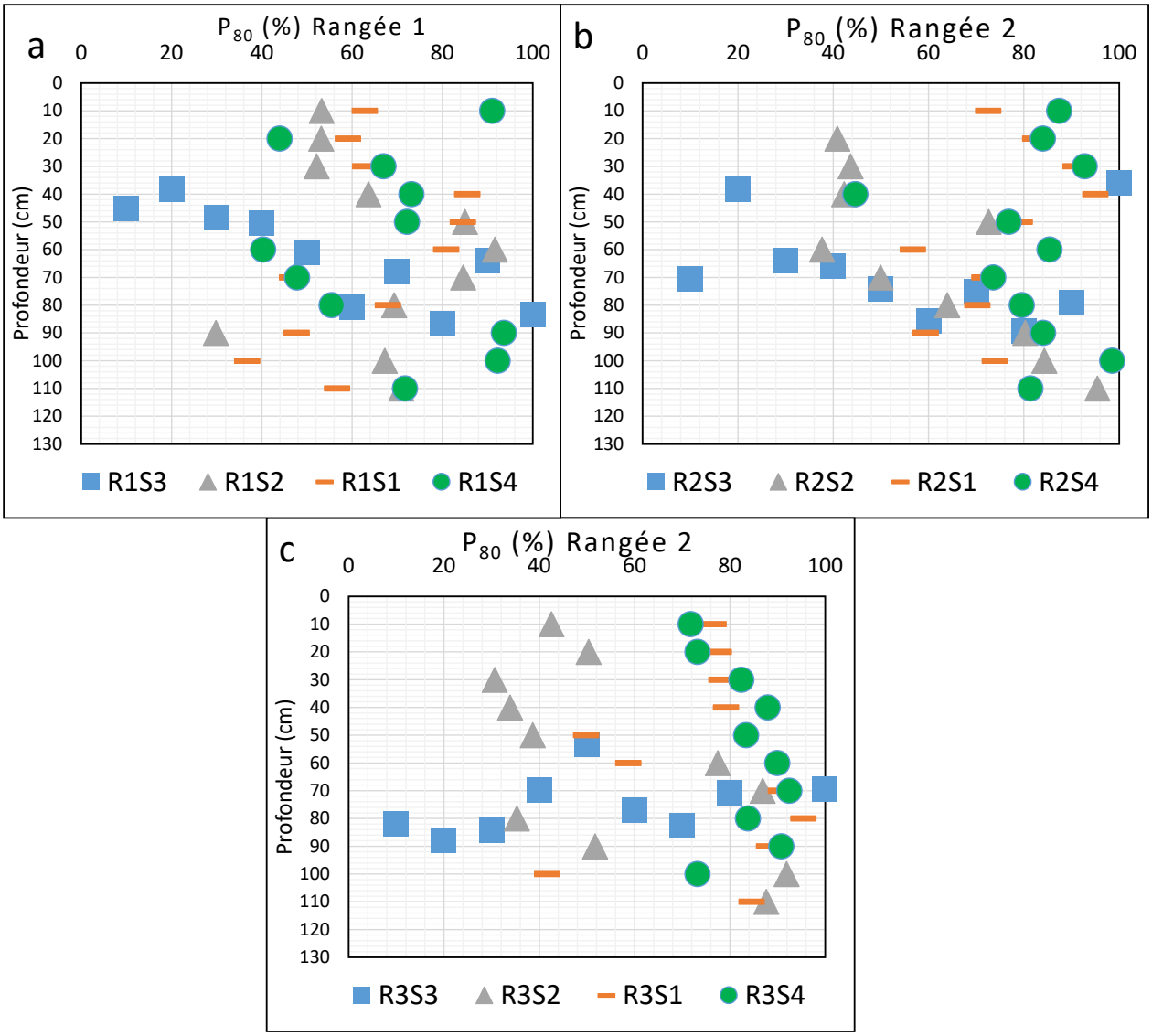


Figure 4.32 Profil vertical de P_{80} : a) rangée R1, b) rangée R2, c) rangée R3 (Parc 3 Manitou/Goldex)

4.2.3.4 Distribution granulométrique transversale

La répartition transversale des courbes granulométriques sur les premiers 60 cm de profondeur (à des intervalles de 10 cm) est présentée aux Figures 4.33, 4.34 et 4.35 pour les rangées R1, R2 et R3 respectivement. Les distributions granulométriques sont aléatoires de la station S1 vers la station S4. Les rangées d'échantillonnage ne correspondent peut-être pas aux directions de l'écoulement durant le dépôt (voir section 3.2.2).

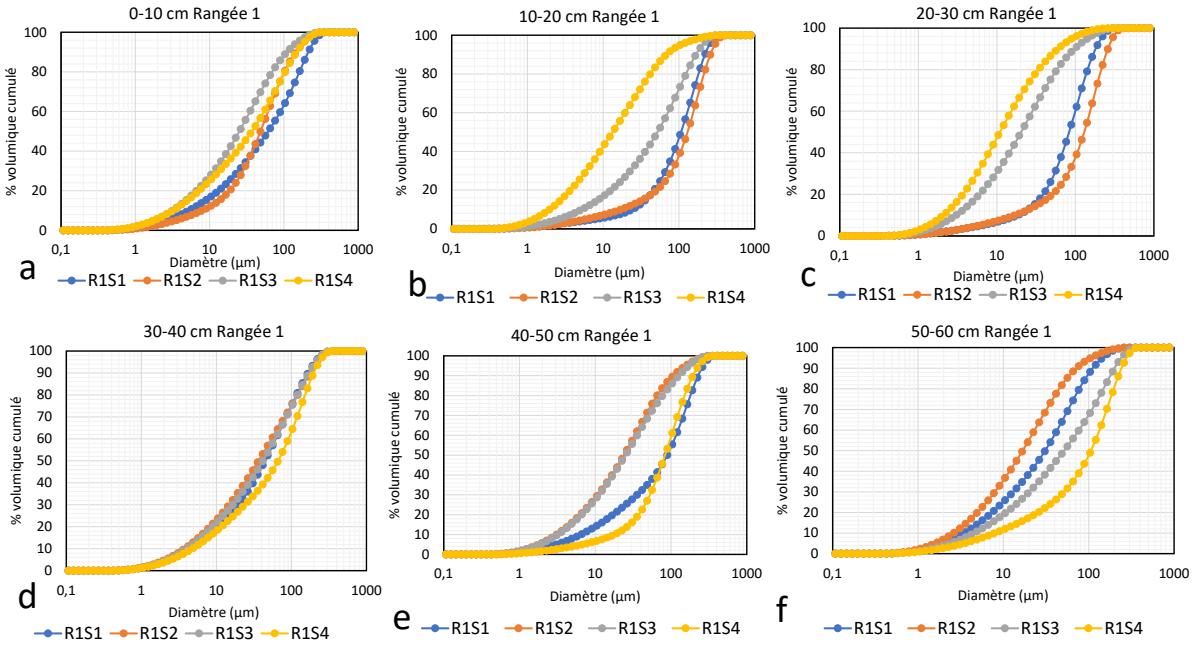


Figure 4.33 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

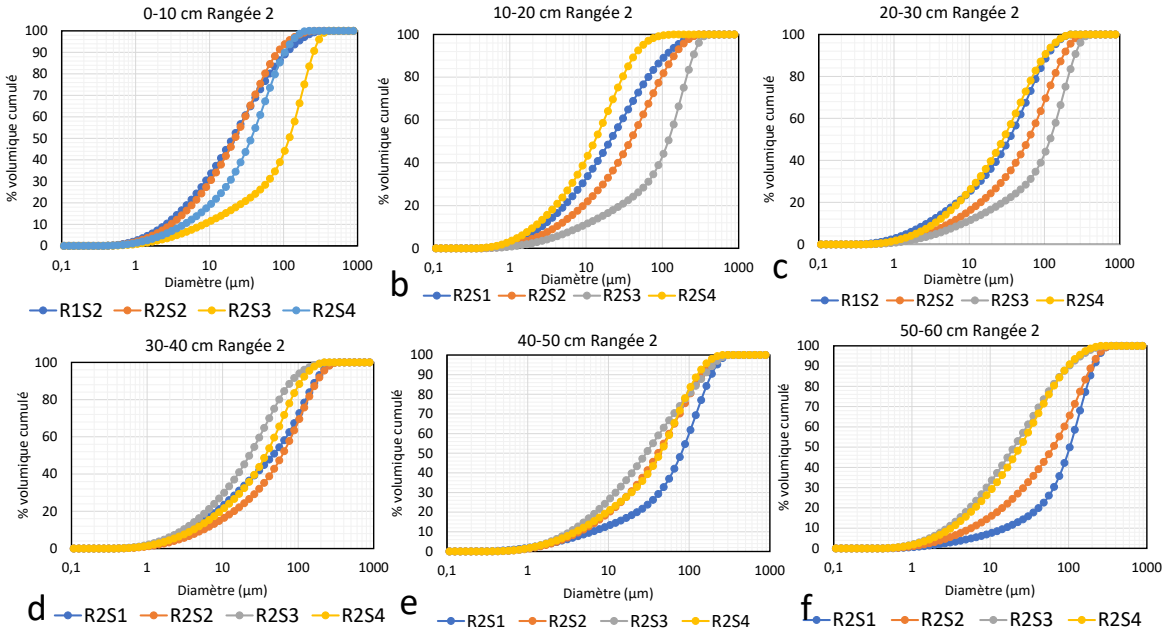


Figure 4.34 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

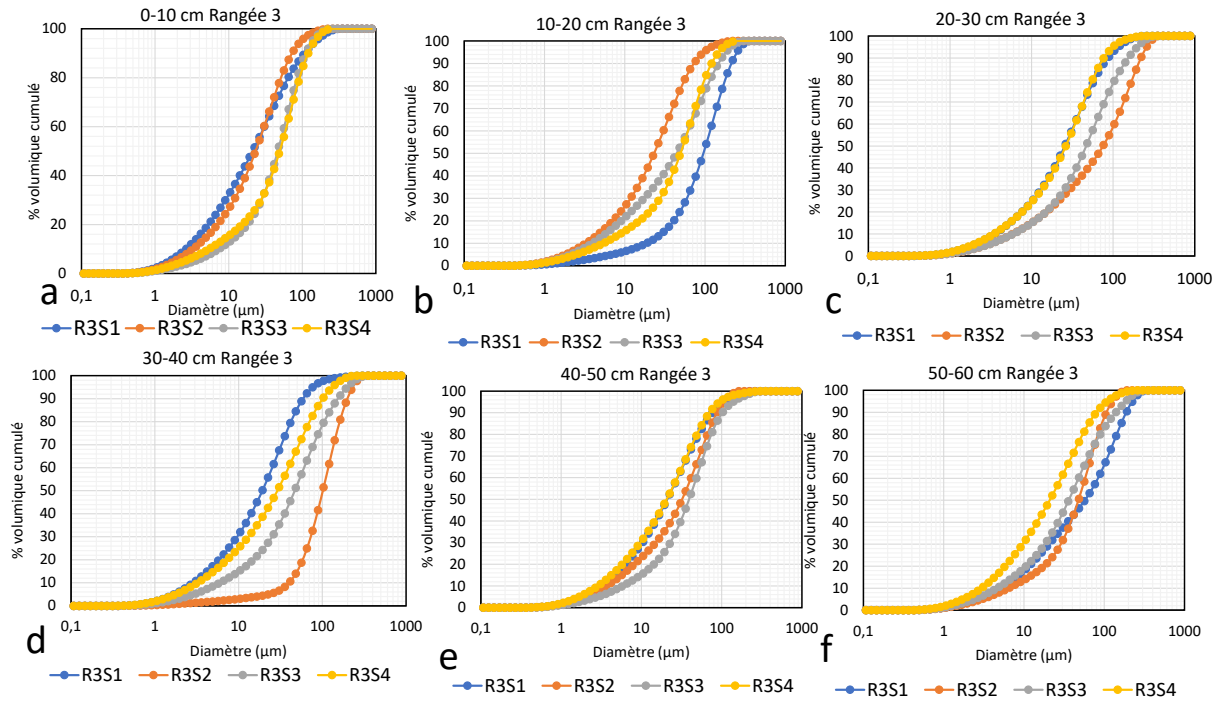


Figure 4.35 Distribution transversale des courbes granulométriques des résidus de la rangée R3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

À partir des valeurs identifiées sur les Figures ci-dessus, des distributions transversales des caractéristiques granulométriques D_{50} et P_{80} ont été établies pour toutes les profondeurs et toutes les rangées et sont présentées en Annexe P. À titre illustratif, les Figures 4.36 à 4.38 montrent respectivement la répartition transversale de D_{50} pour les échantillons prélevés aux niveaux 20-30 cm, 50-60 cm et 110-125 cm pour les rangées 1, 2 et 3. La distance entre les stations S1 et S4 est de 147 m sur la rangée R1, 117 m sur la rangée R2 et 157 m sur la rangée R3. D'après les analyses statistiques de comparaison, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de P_{80} à chaque profondeur au niveau des stations de chaque rangée et d'une rangée par rapport à l'autre (p-value = 0,82). La distribution de ces paramètres ne permet pas, sur les distances considérées, de tirer une tendance de la station S1 vers la station S4 pour les 3 rangées.

Pour une profondeur comprise entre 20 et 30 cm par exemple, D_{50} est égal à 25,5 µm pour R1S1, 129,3 µm pour R1S2, 20,4 µm pour R1S3, 11 µm pour R1S4 sur la rangée 1 (Figure 4.36a), 20,4 µm pour R2S1, 61,1 µm pour R2S2, 22,1 µm pour R2S3, 28,1 µm pour R2S4 sur la rangée R2

(Figure 4.37a), et 83,2 µm pour R3S1, 75,1 µm pour R3S2, 44,1 µm pour R3S3 et 26,3 µm pour R3S4 sur la rangée R3 (Figure 4.38a).

Les Figures 4.39 à 4.41 montrent respectivement la répartition transversale de P_{80} pour les échantillons prélevés aux niveaux 20-30 cm, 50-60 cm et 110-125 cm pour les rangées 1, 2 et 3. Il est difficile de dégager une tendance générale. Pour une profondeur comprise entre 50 et 60 cm par exemple, P_{80} est 80,9 % pour R1S1, 91,6 % pour R1S2, 61 % pour R1S3, 40,3 % pour R1S4 sur la rangée R1 (Figure 4.39b); 50 % pour R2S1, 56,7 % pour R2S2, 85,6 % pour R2S3, 85,4 % pour R2S4 sur la rangée R2 (Figure 4.40b), et 58,7 % pour R3S1, 77,5 % pour R3S2, 76,9 % pour R3S3 et 90 % pour R3S4 sur la rangée R3 (Figure 4.41b).

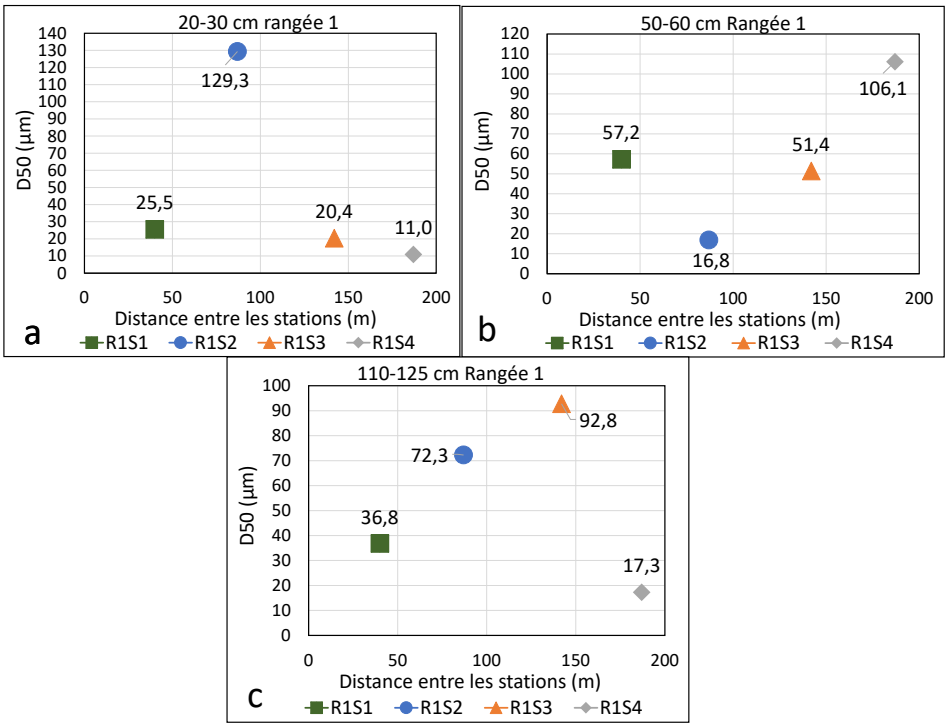


Figure 4.36 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

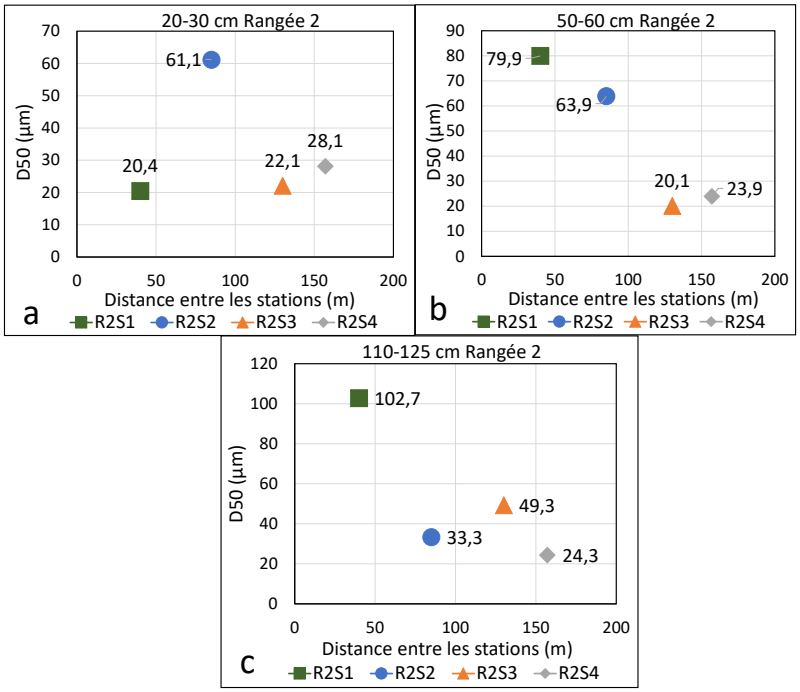


Figure 4.37 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

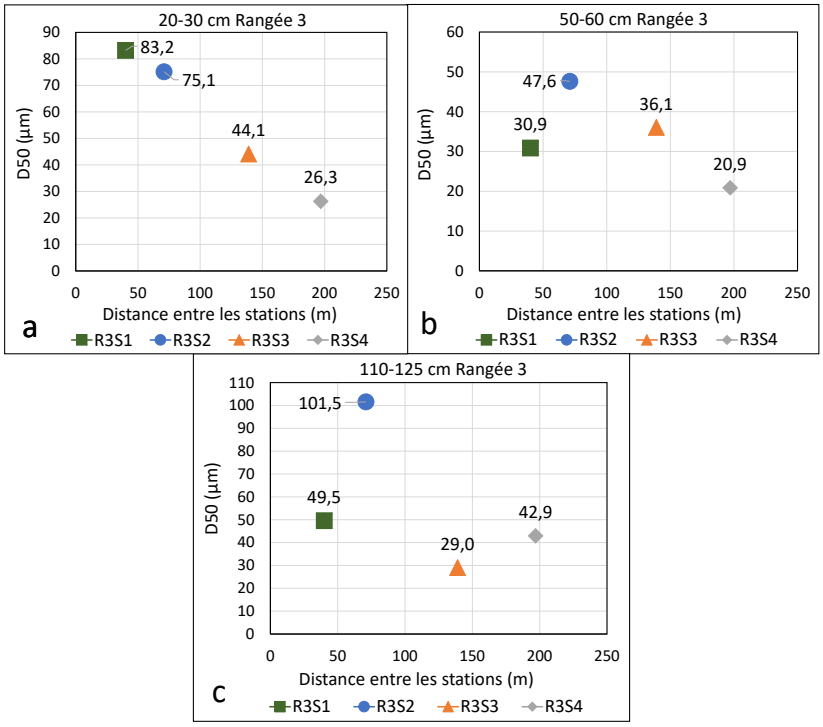


Figure 4.38 Distribution transversale de D_{50} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

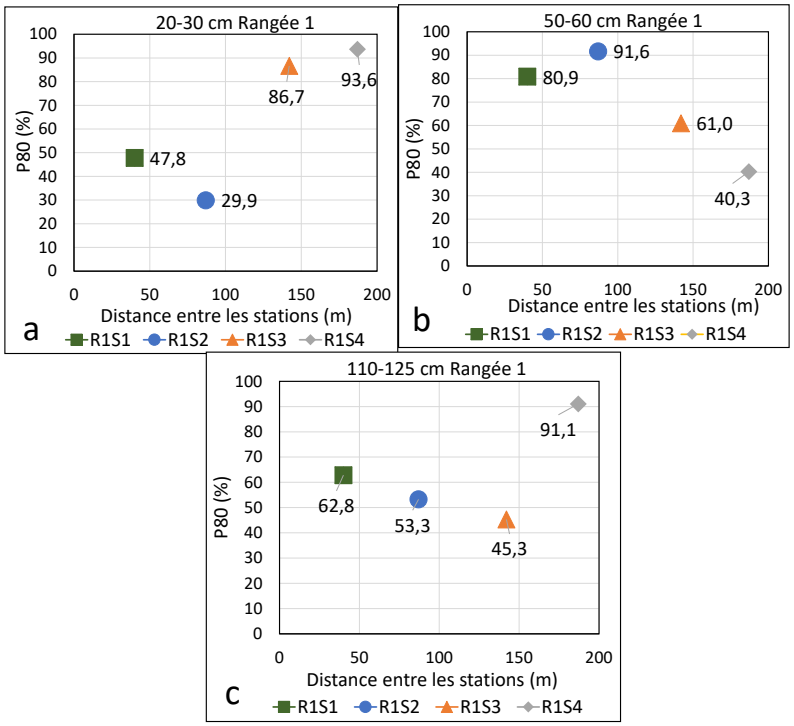


Figure 4.39 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R1 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

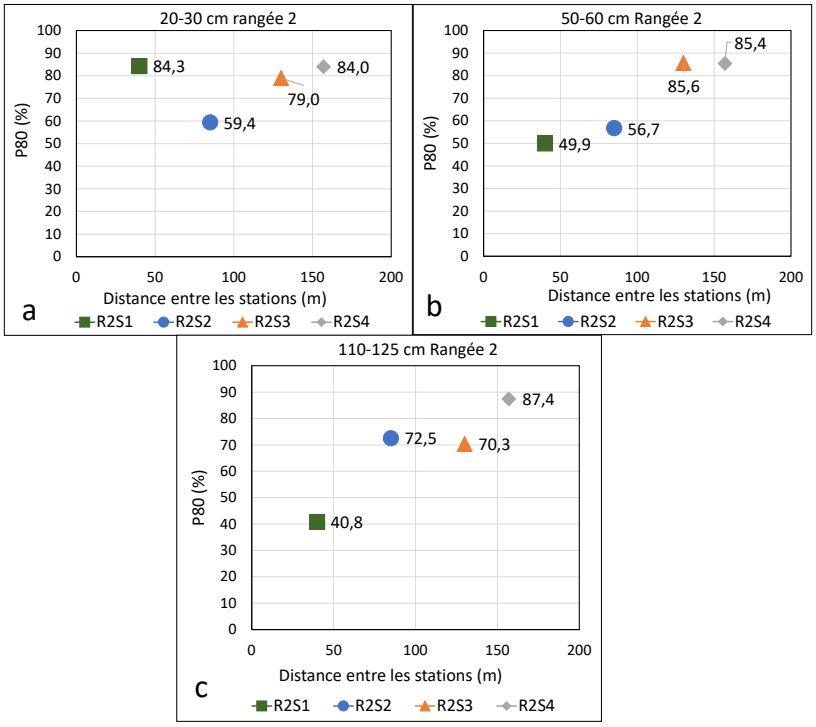


Figure 4.40 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R2 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

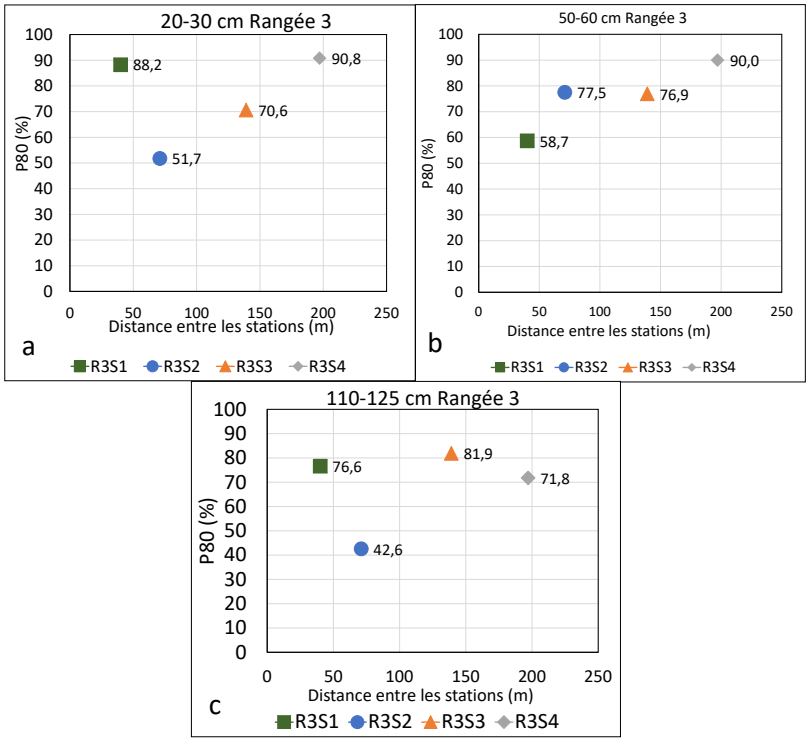


Figure 4.41 Distribution transversale de P_{80} sur la rangée R3 aux profondeurs : a) 20-30 cm, b) 50-60 cm, c) 110-125 cm (Parc 3 Manitou/Goldex)

CHAPITRE 5 DISCUSSION

Le chapitre 5 discute de l'impact des paramètres physiques sur les propriétés géotechniques et de la distribution longitudinale des paramètres physiques.

5.1 Distribution transversale des propriétés géotechniques

Dans cette partie, la distribution de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) est évaluée sur la rangée R2 du parc 3 Est Doyon. La conductivité hydraulique saturée a été déterminée sur des échantillons prélevés en surface au niveau des stations S1, S2, S3 et S4 de la rangée R2 du parc 3 Est Doyon tel que décrit à la section 3.6.1. Les matériaux étaient mis en place à un indice des vides e = 0,82. La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) a été évaluée à l'aide du modèle proposé par Mbonimpa et al. (2002) basé sur D_{10}, C_U et l'indice des vides. La valeur de k_{sat} décroît de la station S1 vers la station S4 sur la rangée R2 du parc 3 Est Doyon (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 Conductivités hydrauliques saturées mesurées et prédite pour les résidus de la rangée R2 du parc 3 Est Doyon

Station	D_{10} (cm)	C_U (-)	k_{sat} mesurée (cm/s)	k_{sat} prédite (cm/s)
R2S1	$3{,}74\times10^{-4}$	8,45	$8{,}1\times10^{-5}$	$9{,}5\times10^{-5}$
R2S2	$4{,}58\times10^{-4}$	9,95	$5{,}2\times10^{-5}$	$7{,}7\times10^{-5}$
R2S3	$3{,}25\times10^{-4}$	7,63	$2{,}6\times10^{-5}$	$5{,}6\times10^{-5}$
R2S4	$4{,}11\times10^{-4}$	10,57	$2{,}03\times10^{-5}$	$5{,}2\times10^{-5}$

Les courbes de rétention d'eau (CRE) ont été déterminées dans des cellules Tempe (voir section 3.6.2.1) pour des résidus prélevés à 20 cm de profondeur au niveau des stations S1 à S4 de la rangée 2 du parc 3 Est Doyon/Westwood. Les échantillons étaient mis en place à un indice des vides e = 0,82. La Figure 5.1 présente les résultats obtenus pour une succion maximale de 276 kPa. Les CRE ont aussi été prédites à l'aide du modèle prédictif de Kovács modifié (Aubertin et al., 2002) (voir section 3.6.2.1) en considérant les paramètres D_{10} et C_U donnés dans le Tableau 5.1. Les courbes

prédites s'ajustent assez bien avec les données expérimentales (Figure 5.1). La pression d'entrée d'air ψ_a vaut 14 kPa pour S1, 19 kPa pour S2, 22 kPa pour S3 et 23 kPa pour S4. Ces valeurs ont été déterminées par la technique des tangentes à partir de la courbe expérimentale (voir Section 3.6.1). Néanmoins, une légère augmentation de ψ_a est observée au fur et à mesure en s'éloignant de la digue 1. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que ψ_a = 18 kPa (Rey, 2020) pour les résidus pris sur le parc 3.

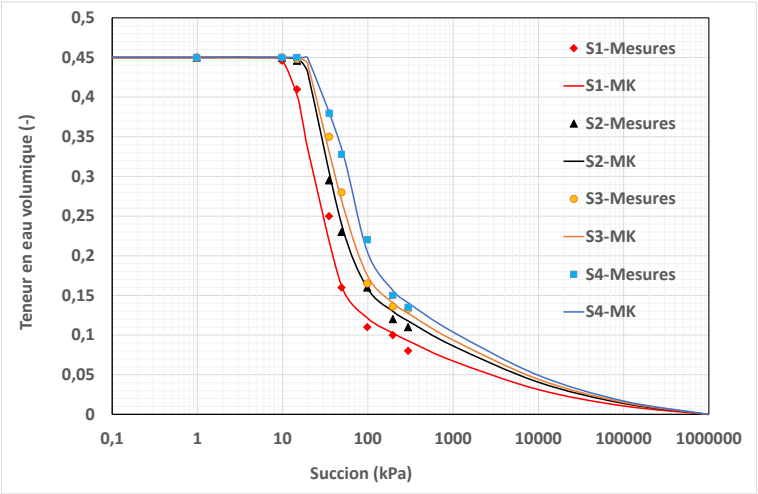


Figure 5.1 Courbes de rétention d'eau mesurées et prédites pour les résidus de la rangée 2 du parc 3 Est du site Doyon/Westwood

Il convient néanmoins de souligner que les CRE et les pressions d'entrée d'air présentées ici peuvent avoir été affectées par une erreur de sous-estimation liée à la cellule Tempe. En effet, la porosité de l'échantillon est supposée être restée constante durant l'essai alors qu'il est connu que les résidus peuvent se déformer sous l'effet de la succion, et plus particulièrement lorsqu'ils sont de plus en plus fins (Saleh-Mbemba, 2016). L'extracteur à membrane de 100 bars (10^5 kPa) aurait dû être utilisé, mais il n'était pas disponible au moment de réaliser ces travaux. Le choix de la cellule Tempe était aussi dicté par le besoin au niveau des modélisations numériques qui ont été réalisées dans le cadre du projet de Driouky (2020). Très peu de modèles numériques tiennent compte actuellement de ce phénomène de variation de la porosité avec la succion. C'est le cas du code SEEP/W utilisé par Driouky (2020).

La cellule de pression à membrane cellulosique (de 100 bar ou 10^4 kPa) est un des appareils qui permet de tester plusieurs échantillons à la fois et de mesurer le volume d'un échantillon à chaque

palier de succion (Saleh-Mbemba 2010, Saleh-Mbemba et al., 2015). Si le phénomène de retrait sous succion croissante avait été pris en compte, c'est-à-dire en considérant une courbe de retrait, les valeurs de ψ_a auraient pu être plus élevés que celles déterminées sans tenir compte du retrait (Mbonimpa et al., 2006). Théoriquement, ce phénomène de retrait devrait être plus prononcé progressivement en s'éloignant du point de dépôt et que les résidus deviennent de plus en plus fins. Autrement dit, les écarts entre les valeurs de ψ_a augmenteraient donc encore plus en direction aval (de S1 vers S4) que ce qui a été observé à partir des résultats obtenus à l'aide de la cellule Tempe.

5.2 Distribution des minéraux et lien avec la densité des grains solides (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

La densité relative des grains solides est liée à la minéralogie. Sur le parc 3 Est Doyon/Westwood, selon les Figure 4.6 et Figure 4.7, il ne semblait pas y avoir de tendance claire en rapport avec la variation des concentrations des éléments en fonction de la distance entre les stations (stations S1 à S4). Les pourcentages massiques de chaque élément varient peu d'une station à une autre sur environ 70 m. La répartition des éléments les plus (et les moins) abondants, d'une part, portés par les minéraux les plus denses et d'autre part, portés par les minéraux les moins denses a été donc vérifiée.

La Figure 5.2 présente la distribution des pourcentages massiques des minéraux lourds tels que la pyrite et le rutile (la sphalérite, la magnétite et la chalcopyrite étant en très faibles quantités) à de profondeurs comprises entre 0-20 cm, 20-50 cm et 100-125 cm sur les stations 1 et 4 de la rangée R2. Les variations des pourcentages massiques de ces minéraux sont aussi présentées sur cette Figure 5.2. Les pourcentages massiques du rutile et de la pyrite sont plus abondants sur la station 1 que sur la station 4 à toutes les profondeurs (par exemple, 1,3 % de rutile en S1 contre 0,8 % en S4 entre 20 et 50 cm de profondeur et 9,6 % de pyrite en S1 contre 6 % en S4 à 100-125 cm de profondeur). Néanmoins, la diminution en pourcentage vaut moins de 50 % dans tous les cas présentés. Quant aux minéraux moyennement lourds, la plupart sont plus abondantes sur les stations S4 que sur les stations S1 (Figure 5.3). Les Figures présentant les autres minéraux se trouvent en Annexe F.

Le rutile, minéral lourd, qui contient du titane (entre 0,1 et 0,2 %) se retrouve en plus grande quantité au niveau de la station S1 à cause de sa densité de 4,25. La distribution du soufre (entre 3 et 5 %) porté par les sulfures est décroissante de la station 1 à la station 4. Parallèlement, la teneur en pyrite semble décroitre légèrement à chaque station. Ceci peut être un signe d'oxydation de la pyrite en surface ou de la variabilité de la pyrite dans les résidus déposés. Cette distribution aura un impact sur la réactivité des résidus et donc sur la distribution des flux d'oxygène consommé par les résidus. D'où l'importance d'en tenir compte lors du design des méthodes de restauration (voir Driouky, 2020).

La plupart des minéraux moyennement denses (Figure 5.3), portant les éléments les plus abondants comme Al, Fe, S, Ca et K décrivent une tendance croissante de la station S1 vers la station S4. Il s'avère que la densité relative des grains oriente la répartition des minéraux selon la distance.

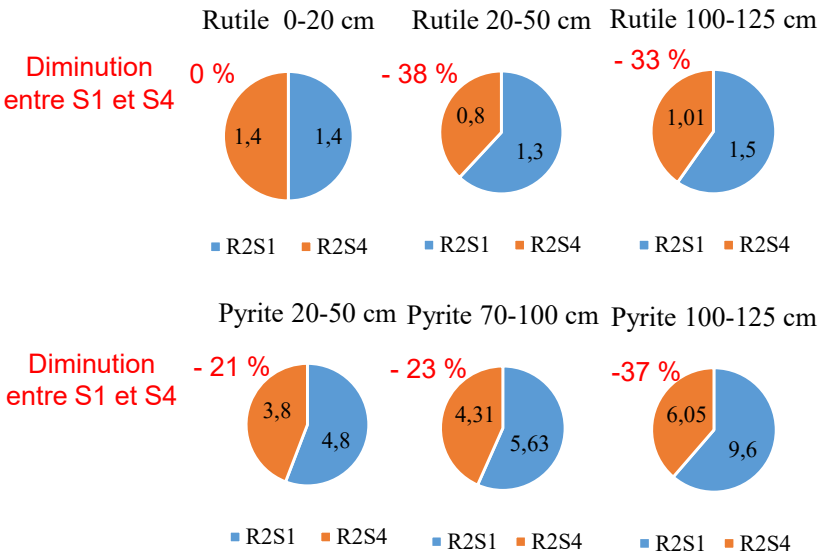


Figure 5.2 Pourcentages massiques de la pyrite et du rutile sur les stations 1 et 4 à différentes profondeurs de la rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

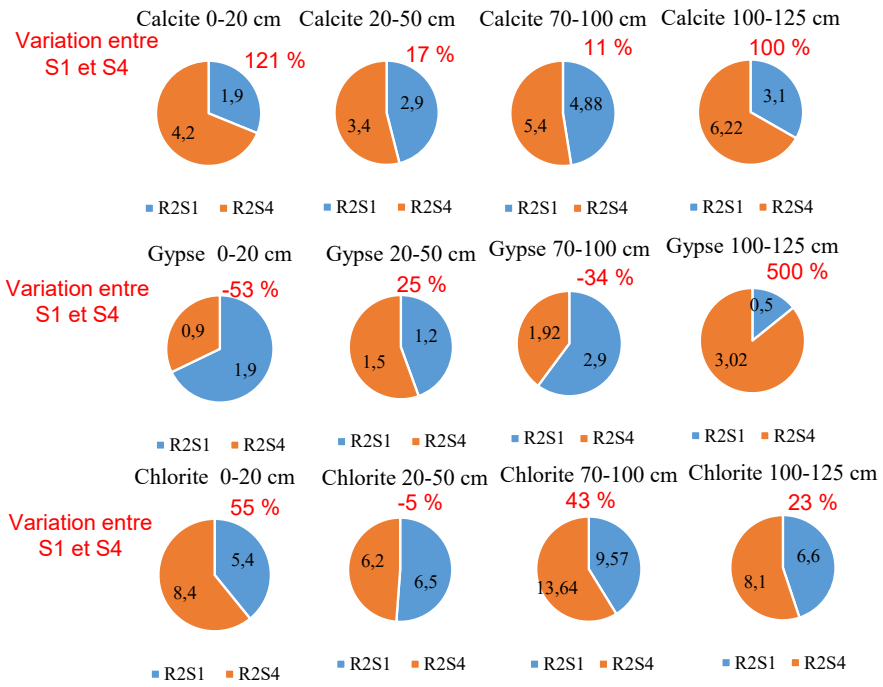


Figure 5.3 Pourcentages massiques de quelques minéraux moyennement lourds sur les stations 1 et 4 à différentes profondeurs de la Rangée R2 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

5.3 Distribution longitudinale des paramètres physiques (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

La répartition longitudinale des courbes granulométriques sur les premiers 60 cm de profondeur (à intervalles de 10 cm) sur les lignes 1, 2, 3 et 4 est respectivement présentée aux Figures 5.4, 5.5, 5.6, et 5.7. Les distributions granulométriques semblent aléatoires. Il n'y a pas de tendance générale d'une rangée à une autre. Pour la majorité des résultats, les résidus semblent plus fins de la rangée R1 vers la rangée R3 (pour toutes les lignes). De plus, les courbes sont rapprochées dans certains des cas.

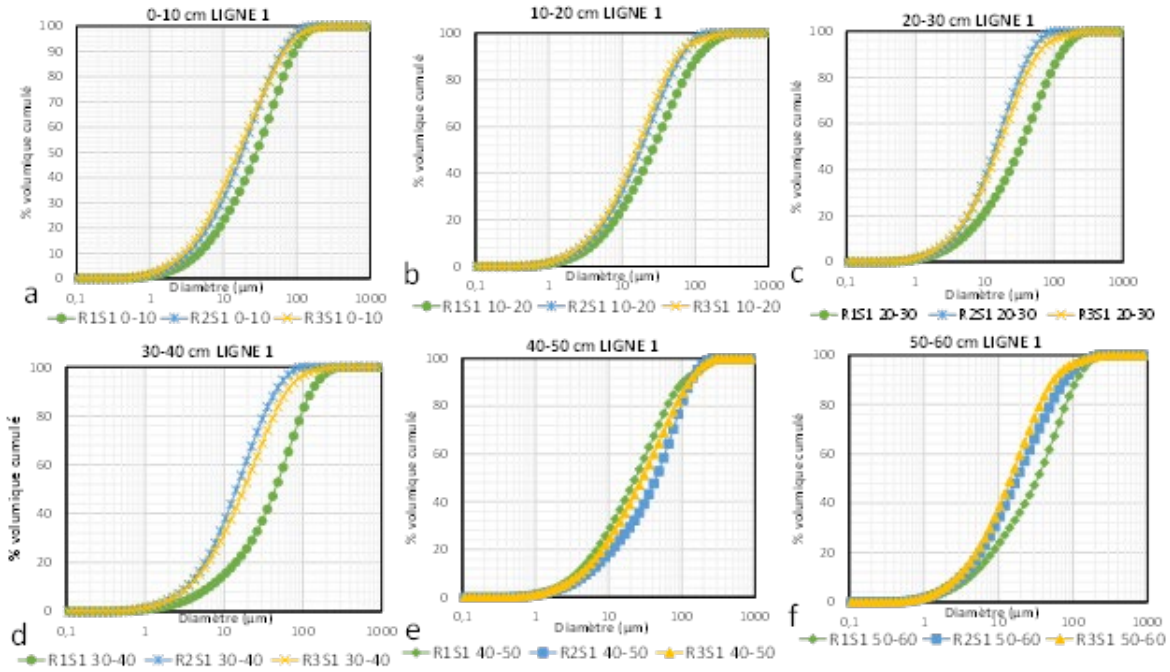


Figure 5.4 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

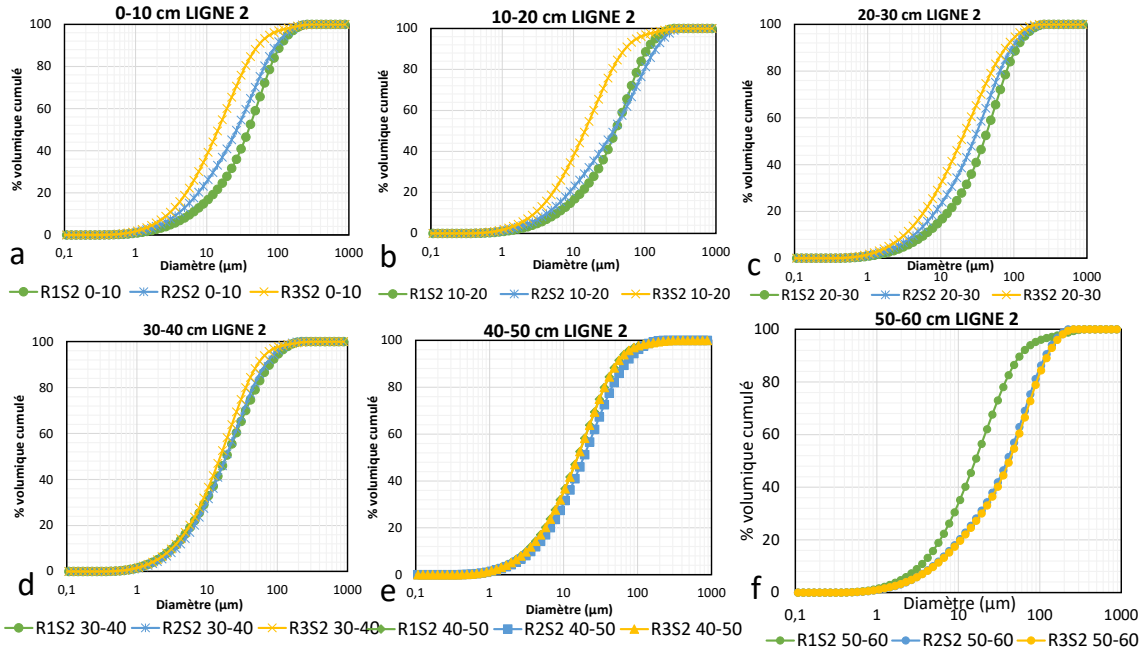


Figure 5.5 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

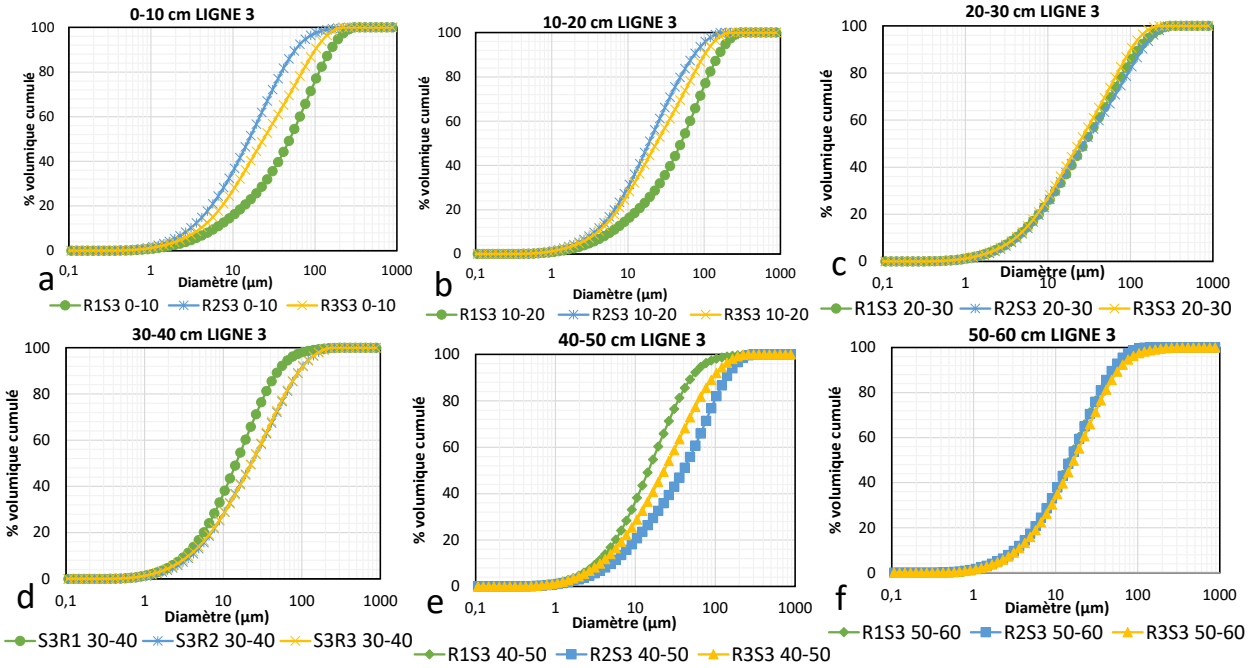


Figure 5.6 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

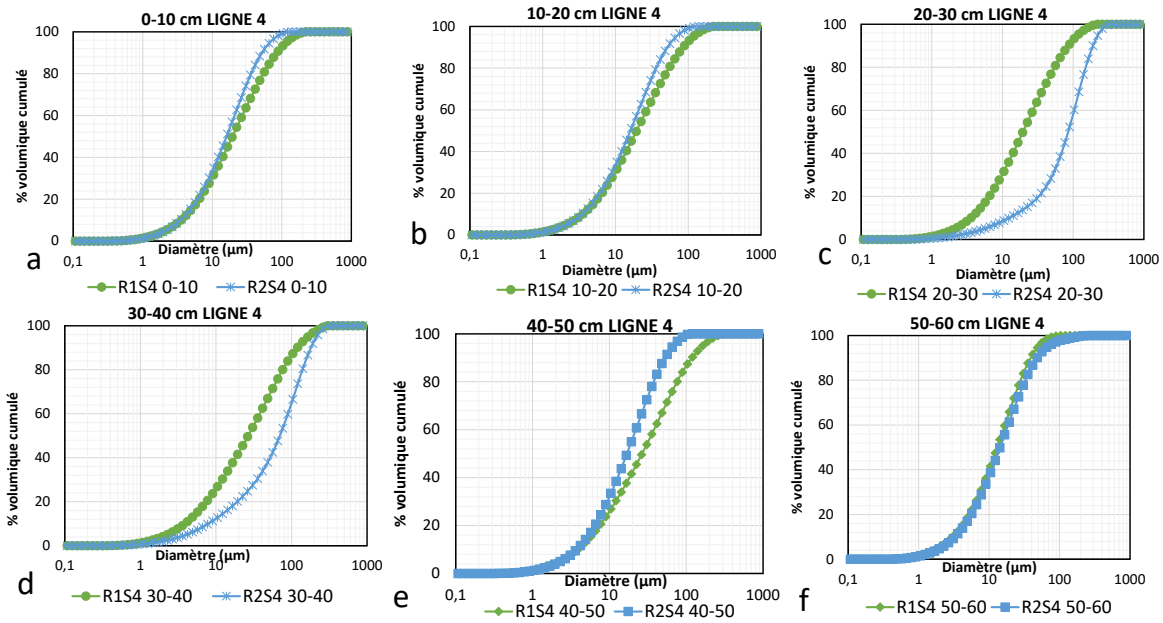


Figure 5.7 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 4 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

Les distributions longitudinales de D_{50} et P_{80} à chaque niveau sont respectivement présentées sur les Figure 5.8, Figure 5.9 et Figure 5.10. La distance entre les stations est de 179 m sur la ligne 1, 165 m sur la ligne 2, 152 m sur la ligne 3 et 52 m sur la ligne 4. Selon les analyses statistiques, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs G_s à chaque niveau, sur les stations de chaque ligne et d'une ligne par rapport à l'autre. Cependant, pour D_{50} et P_{80}, il y a une différence entre les valeurs des différentes stations d'une ligne, mais presque pas de différence au niveau des lignes elles-mêmes.

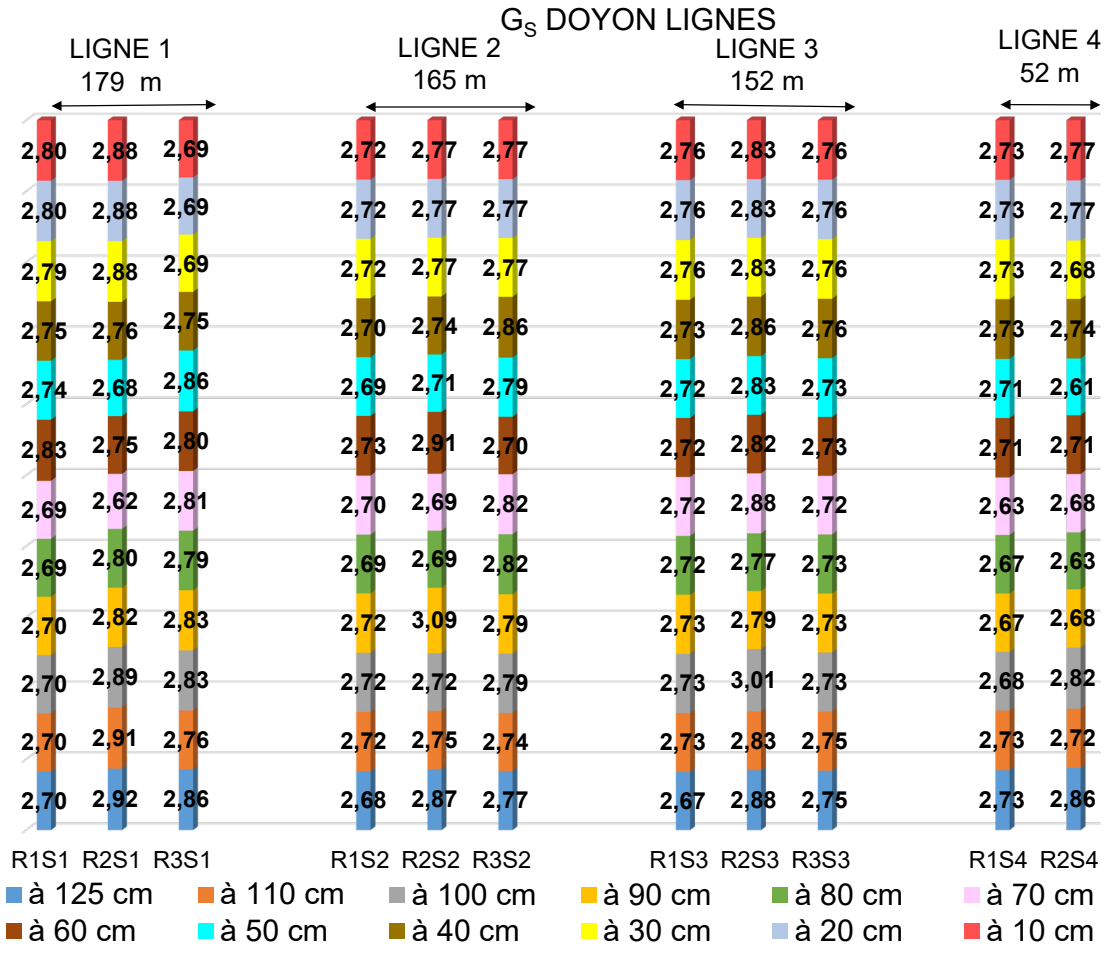


Figure 5.8 Distribution longitudinale de G_S sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

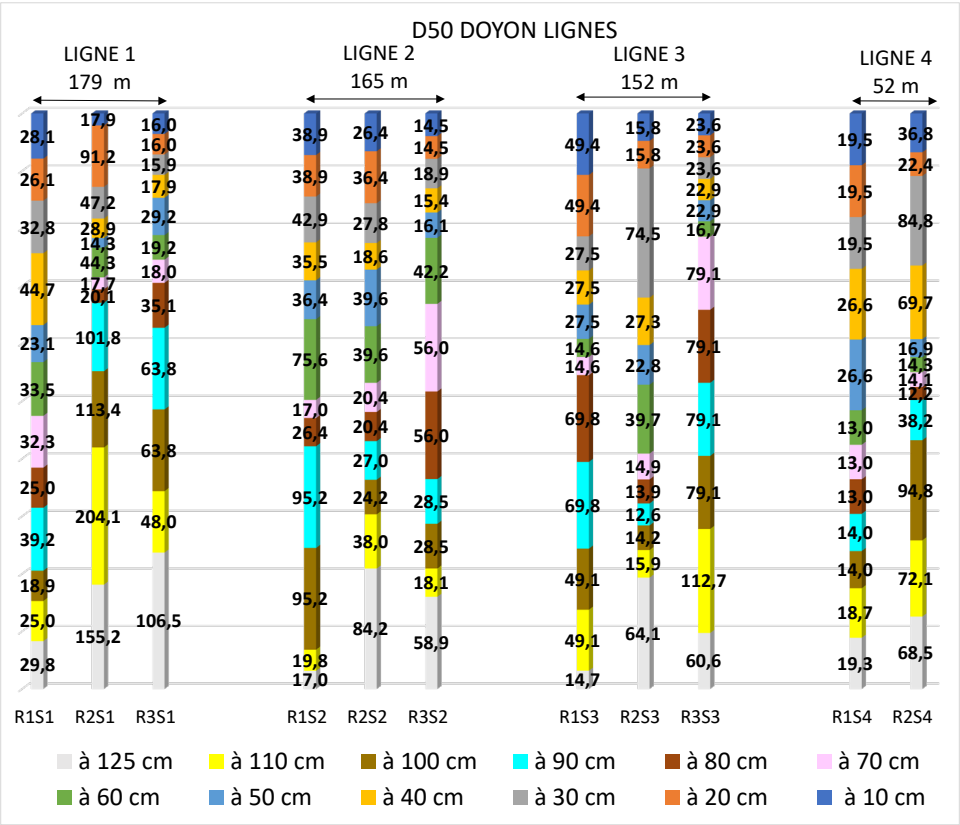


Figure 5.9 Distribution longitudinale de D_{50} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

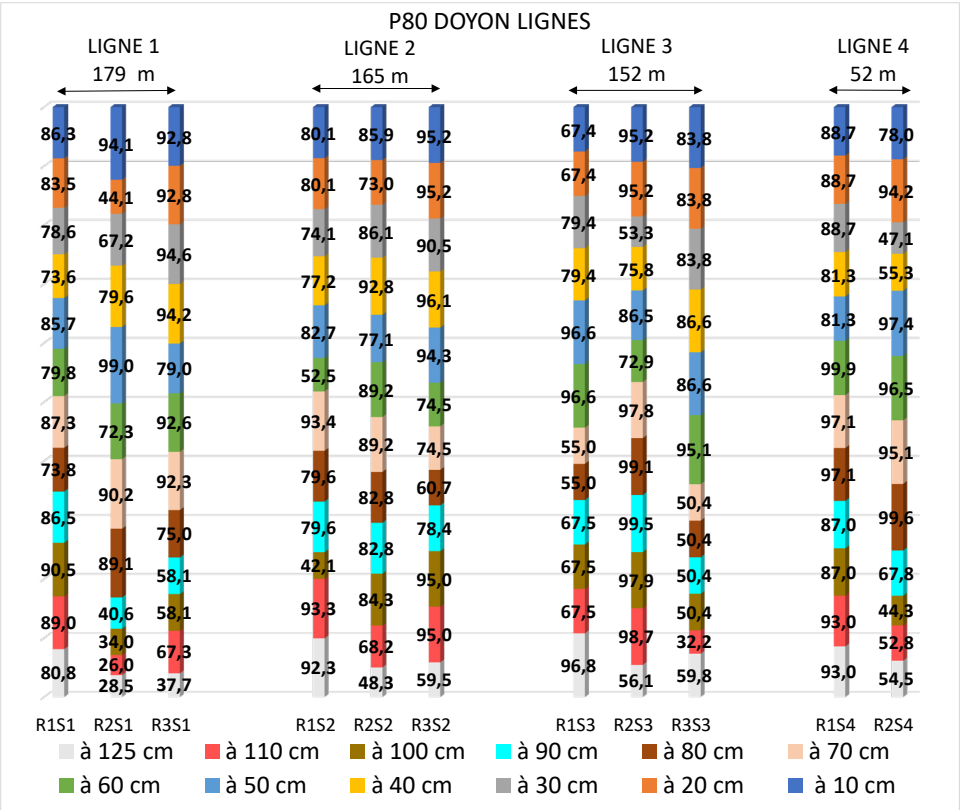


Figure 5.10 Distribution longitudinale de P_{80} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

5.4 Distribution longitudinale des paramètres physiques (Parc 3 Manitou/Goldex)

La répartition longitudinale des courbes granulométriques sur 60 cm de profondeur est aléatoire sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Figure 5.11, Figure 5.12, Figure 5.13, Figure 5.14).

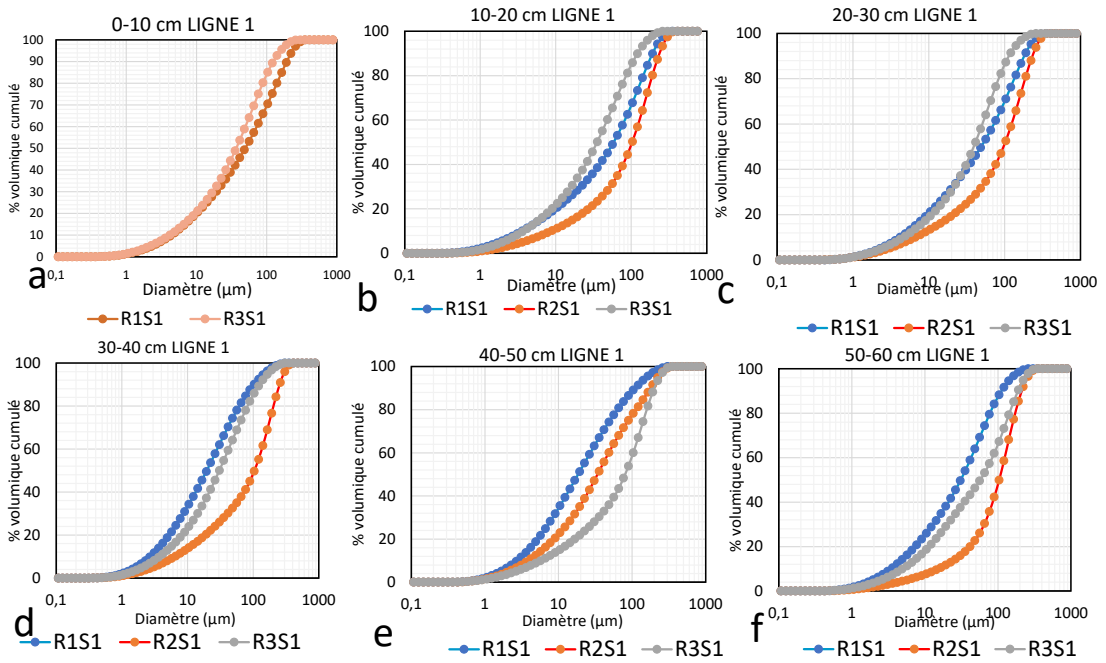


Figure 5.11 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 1 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex)

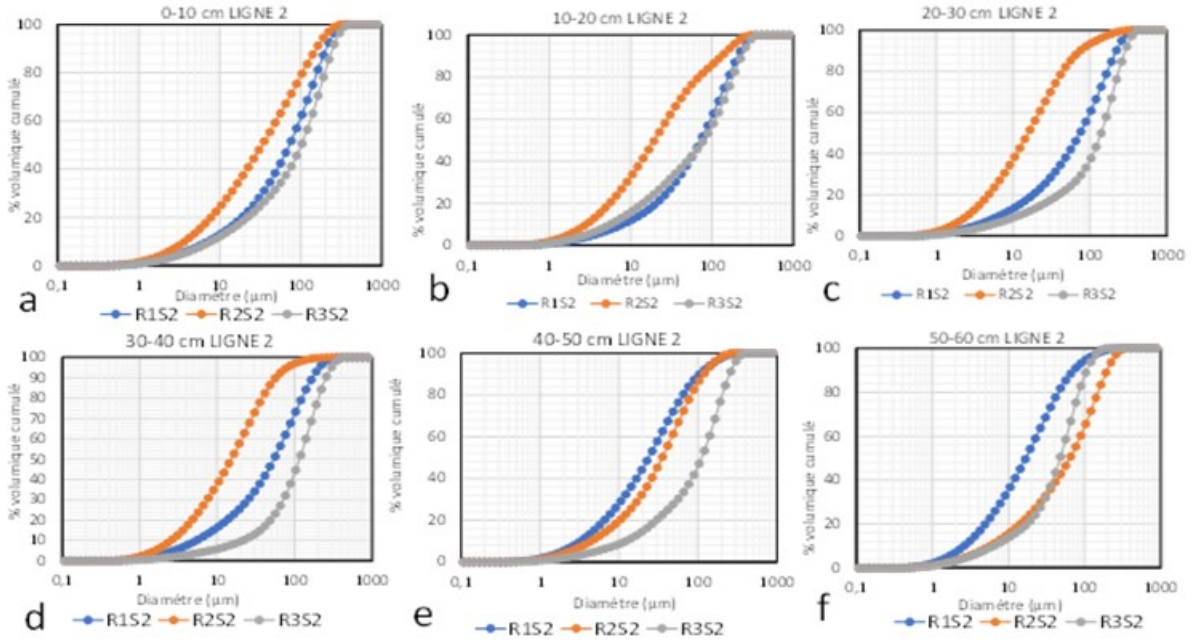


Figure 5.12 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 2 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex)

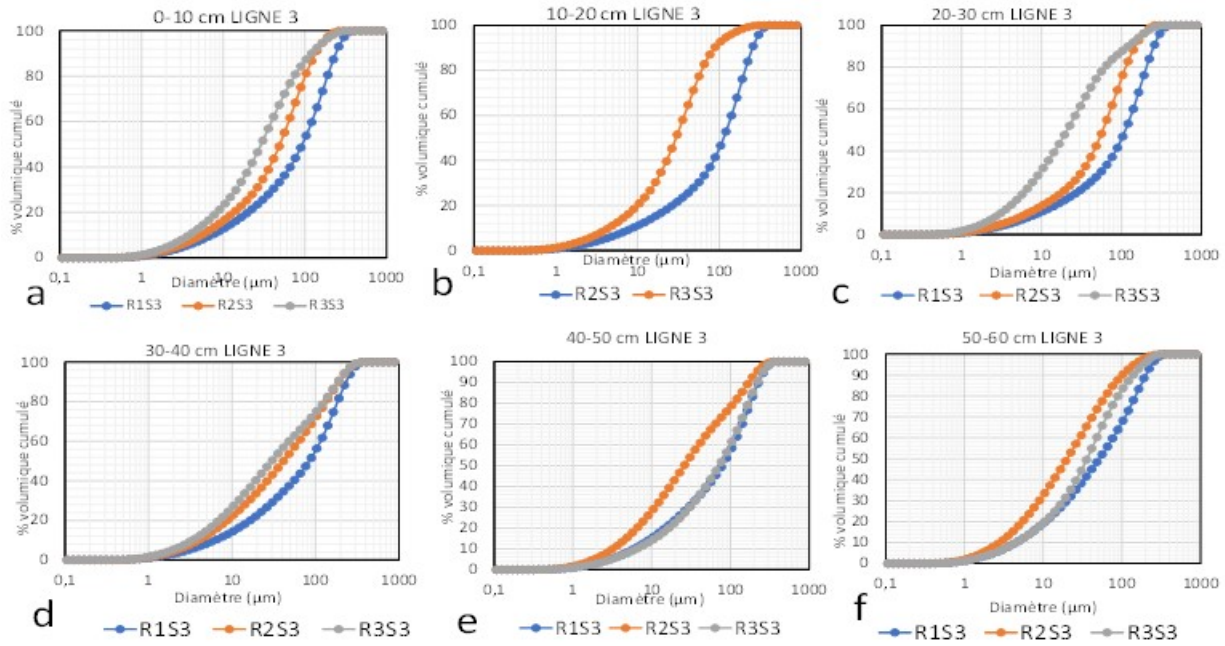


Figure 5.13 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 3 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex)

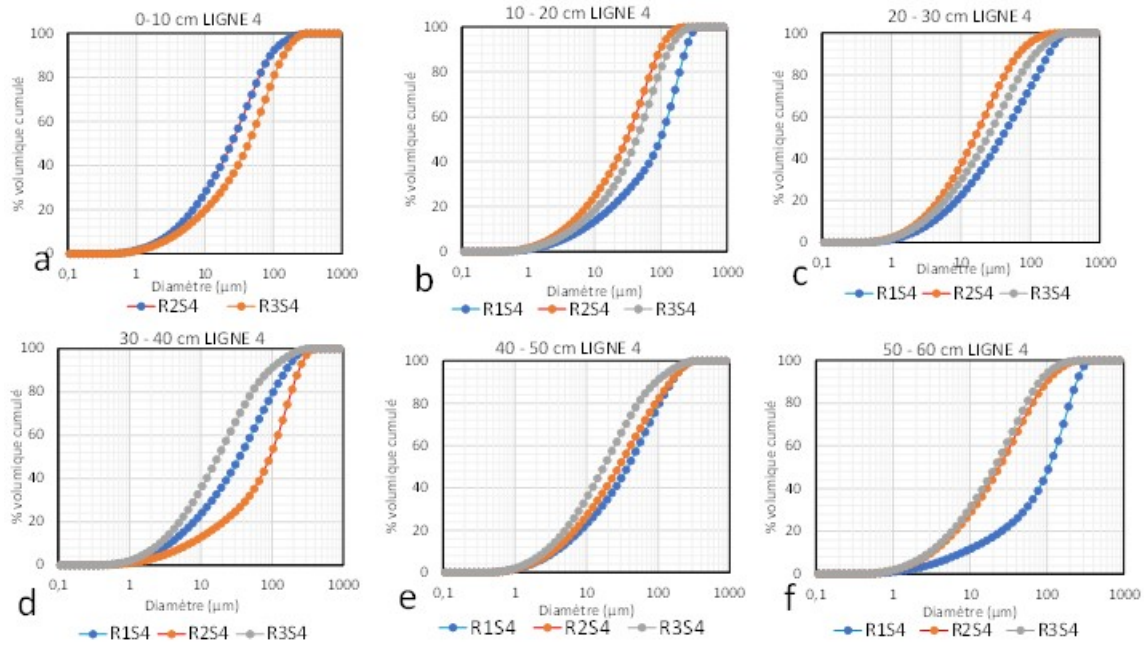


Figure 5.14 Distribution longitudinale des courbes granulométriques des résidus de la ligne 4 aux niveaux : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm, c) 20-30 cm, d) 30-40 cm, e) 40-50 cm, f) 50-60 cm (parc 3 Manitou/Goldex)

Les distributions longitudinales de G_S, D_{50}, P_{80}, à chaque niveau en profondeur, sont présentées respectivement sur les Figure 5.15, Figure 5.16 et Figure 5.17. La distance entre les stations est 529 m sur la ligne 1, 537 m sur la ligne 2, 536 m sur la ligne 3 et 523 m sur la ligne 4. Du fait de l'absence de différence significative entre les paramètres, aucune tendance nette ne peut être décrite, à chaque niveau, sur les stations de chaque ligne et d'une ligne par rapport à l'autre.

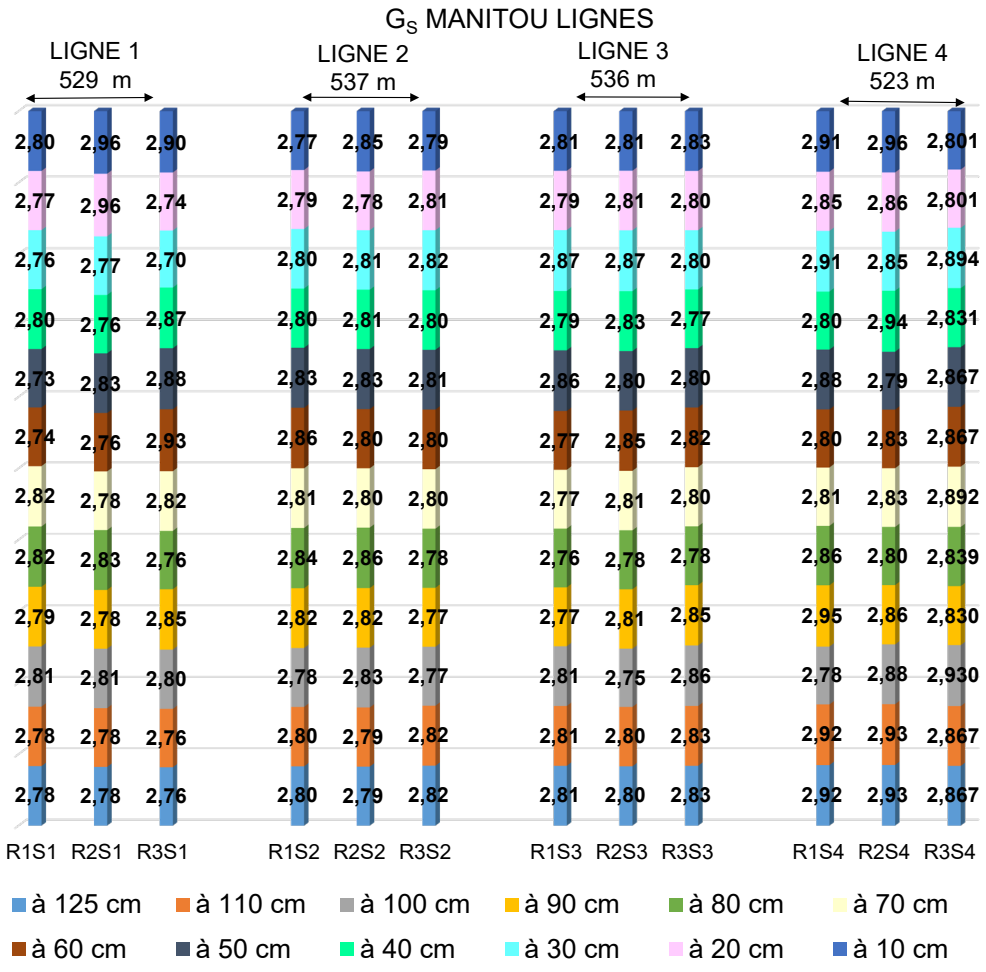


Figure 5.15 Distribution longitudinale de G_S sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (parc 3 Manitou/Goldex)

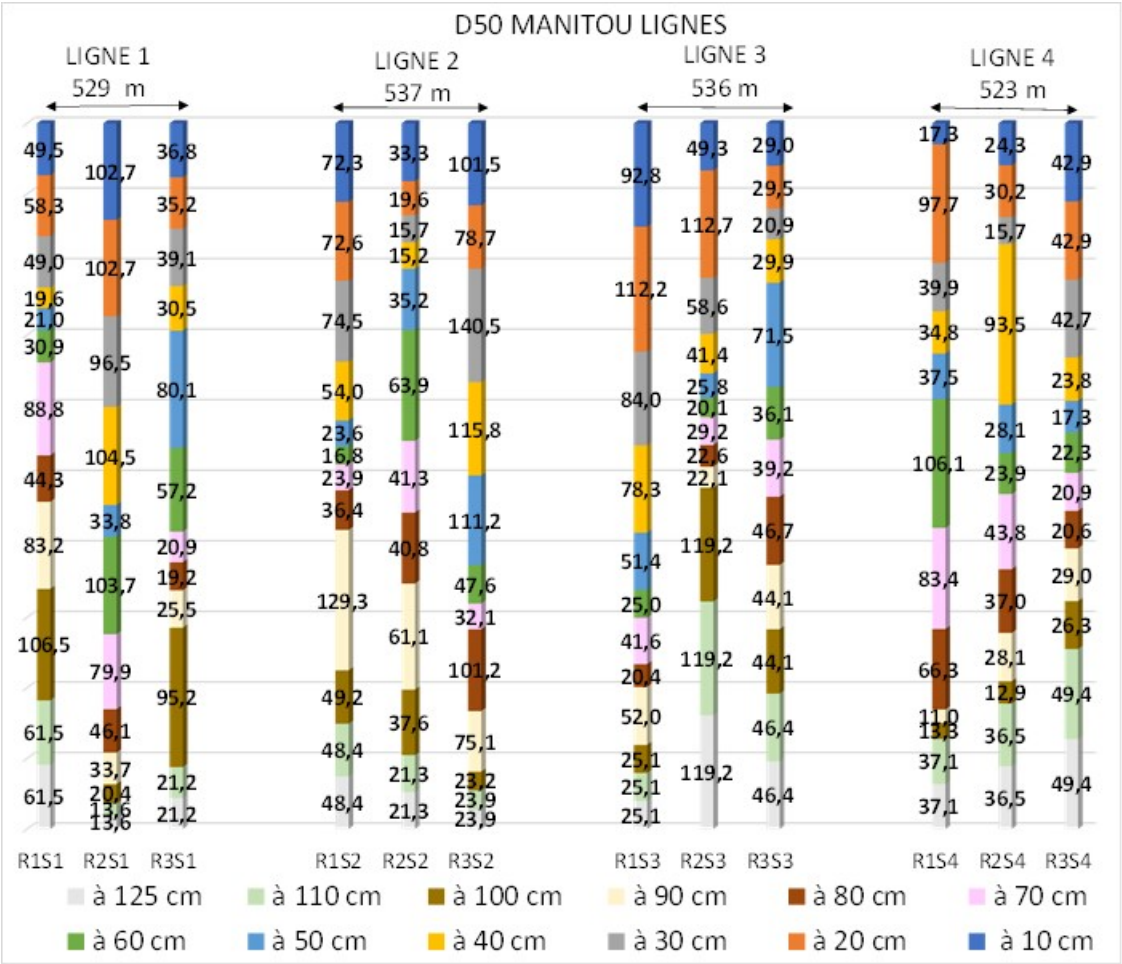


Figure 5.16 Distribution longitudinale de D_{50} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Manitou/Goldex)

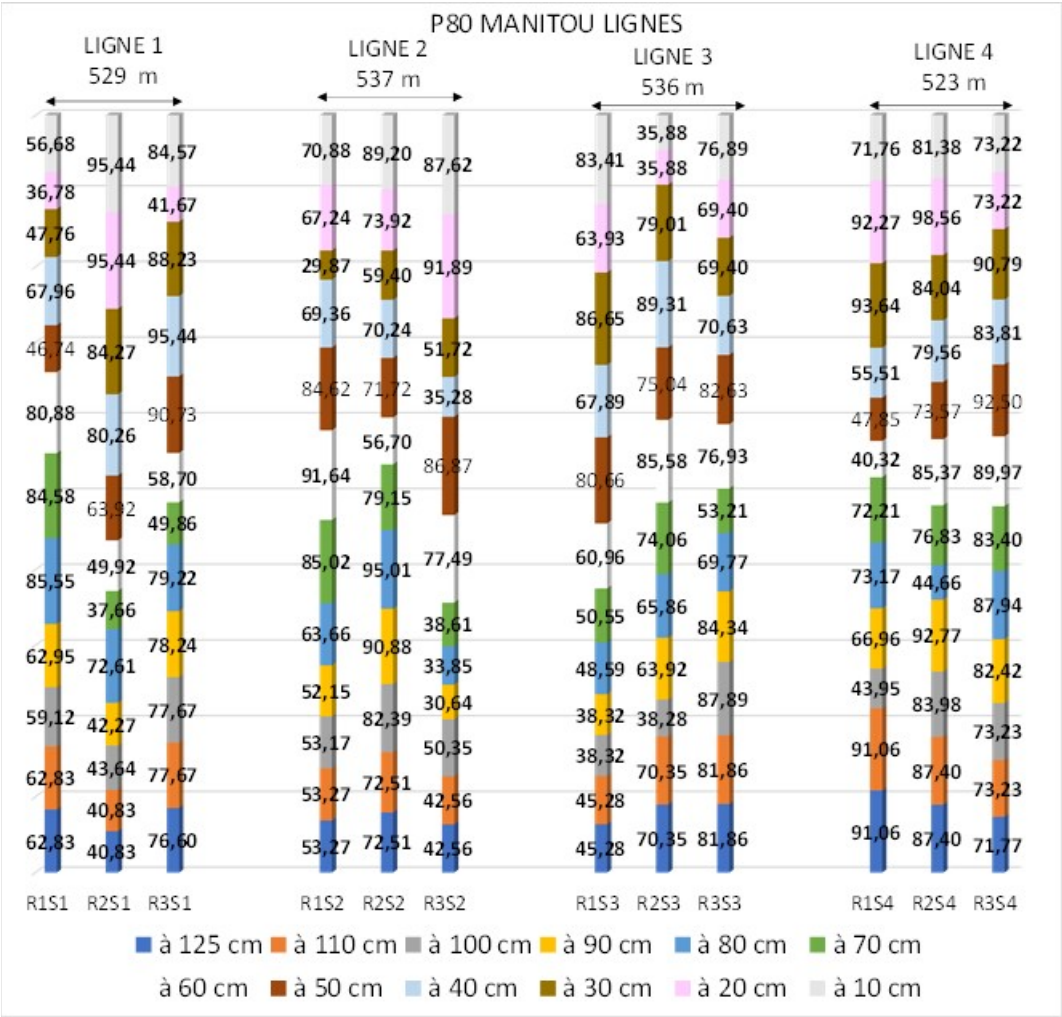


Figure 5.17 Distribution longitudinale de P_{80} sur les lignes 1, 2, 3 et 4 (Parc 3 Manitou/Goldex)

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

Le dépôt hydraulique des résidus miniers peut générer la formation d'une plage de particules grossières près du point de dépôt pendant que les particules fines, entraînées plus loin par l'eau, restent en suspension dans la pulpe. Cette différenciation granulométrique observée le long de la ligne d'écoulement des résidus est appelée ségrégation.

Il était question d'évaluer l'ampleur de la ségrégation sur le parc 3 Est Doyon et sur le parc 3 Manitou. Les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et hydrogéotechniques ont été évaluées. Les distributions transversale, verticale et longitudinale de chacune de ces caractéristiques ont été présentées et analysées. Du point de vue granulométrique, les pourcentages de fines et les diamètres médians des résidus prélevés sur les stations et à plusieurs niveaux en profondeur dans les parcs ne présentaient pas de différence statistique significative. La tendance décroissante escomptée de la granulométrie depuis la digue de dépôt a été rencontrée sur une rangée de stations du parc 3 Est Doyon tandis qu'aucune tendance particulière n'a été remarquée sur les autres rangées. Sur le parc 3 Manitou, la granulométrie des résidus de la monocouche ne présentait pas de tendance dans les directions transversale et longitudinale.

Les densités relatives des grains solides G_s variaient autour de 2,8 sur les deux parcs. Une tendance claire et globale à tous les niveaux de profondeur n'a pas pu être déterminée. La valeur de G_s est proche de la densité relative des minéraux moyennement lourds détectés dans les résidus sur les deux parcs.

Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée et des pressions d'entrée d'air sont distribuées conformément à la granulométrie des résidus observés sur la rangée 2 du parc 3 Est Doyon.

L'absence de tendance nette peut tout de même révéler que la granulométrie dans le parc peut être contrôlée même lors d'un dépôt hydraulique. Une multiplication des points de dépôt, une pente faible du parc, une granulométrie relativement homogène des résidus en sortie d'usine sont quelques éléments qui peuvent minimiser la ségrégation dans un parc à résidus.

6.2 Recommandations

Les distributions transversale et longitudinale des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et hydrogéotechniques, induites par la ségrégation, devraient être mieux interprétées quand les séquences de dépôt des résidus miniers sont connues. Les données sur la séquence de dépôt permettraient de connaitre :

- Les épaisseurs de résidus après un dépôt;
- Les points de dépôt;
- Le pourcentage solide massique lors des différents dépôts;
- La granulométrie des résidus en sortie de l'usine de concentration (pourcentage de fines dans la pulpe par exemple) afin d'évaluer leur potentiel de ségrégation dans un diagramme ternaire de gestion des résidus;
- La minéralogie et la chimie des résidus à la sortie de l'usine de concentration pour évaluer la répartition des minéraux selon leur densité;
- La topographie et la pente de dépôt pour déterminer le sens d'écoulement des résidus. Il faut néanmoins reconnaitre que la direction de l'écoulement, qui peut être variable pour un même point de déposition, n'est pas toujours documentée.

La ségrégation dépend, entre autres paramètres, des propriétés intrinsèques des résidus à savoir le pourcentage solide, la densité relative des grains et de la granulométrie des résidus à la sortie de l'usine de concentration. Ce travail s'est focalisé sur la caractérisation des résidus miniers après le dépôt. Toutefois, des paramètres comme la rhéologie sont également à prendre en compte dans la compréhension de l'ampleur de la ségrégation. Il est important de comprendre le comportement des résidus pendant le dépôt. En vue de minimiser la ségrégation, les travaux futurs peuvent intégrer l'optimisation des propriétés rhéologiques des résidus. Les expérimentations peuvent se faire à grande échelle sur le terrain ou dans un canal d'écoulement en laboratoire.

Dans le cadre de la restauration des parcs à résidus miniers, notamment avec la technique de la nappe phréatique surélevée, il est intéressant de remarquer que même en cas de dépôt hydraulique, la ségrégation sur la monocouche peut être minimisée en multipliant les points de dépôt autour du parc.

RÉFÉRENCES

Aachib, M., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Measurement and Prediction of the Oxygen Diffusion Coefficient in Unsaturated Media, with Applications to Soil Covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156: 163-193.

Antunes, M., & Medronho, R. A. (1992). Bradley hydrocyclones: design and performance analysis. In *Hydrocyclones* (pp. 3-13). Springer.

ASTM D2487-17e1, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org

ASTM D3152-72. (2000). Standard test method for capillary-moisture relationships for fine textured soils by pressure-membrane apparatus (Withdrawn (2007)). ASTM International.

ASTM D5550-14, Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM D5856-95(2007), Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

Aubertin, M, Bussière, B. et Chapuis, R.P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal,* 33: 470-482

Aubertin, M., Ricard, J.-F., & Chapuis, R. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 55–69. [Erratum, 36: 401 (1999)].

Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanes, A.M., Gagnon, D. Barbera, J.M., Aachib, M., Bédard, C., Chapuis, R.P., & Bernier, L. (1999). Étude sur les barrières sèches construites à partir des résidus miniers. Phase II, Essais en place. Rapport de Recherche, Projet CDT P1899. NEDEM/MEND 2.22.2c.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M., & Riffon, O. (2002). *Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle.* Paper presented at the Défis & Perspectives: Symposium.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40 : 1104-1122.

Azam, S., et Scott, J. D. 2005. Revisiting the ternary diagram for tailings characterization and management. Geotechnical news, Vancouver, 23(4), 43.

Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical news, 28*(4): 50-54.

Barnes, HA., Hutton, J. F. and Walters, K. (1989). An introduction to Rheology, Elsevier, 199 pages. Amsterdam.

Belem, Tikou. (2019). Rhéologie et transport des remblais miniers hydraulique et en pâte [notes de cours]. Département de Génie Civil, Géologique et des Mines, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Bentel, G.M. (1981). Some Aspects of the Behaviour of Hydraulically Deposited Tailings. Thesis. Johannesburg, South Africa: University of the Witwatersrand.

Blight, G., & Steffen, O. (1979). *Geotechnics of gold mining waste disposal.* Paper presented at the In Proceeding of Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal. New York.

Blight, G. (1983). The behavior of mine tailings during hydraulic deposition, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 83(4): 87-91.

Blight, G. (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities.

Burger, R. L., & Belitz, K. (1997). Measurement of anisotropic hydraulic conductivity in unconsolidated sands: A case study from a shoreface deposit, Oyster, Virginia. *Water Resources Research, 33*(6), 1515-1522.

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.

Bussière, B., & Guittonny, M. (2020). *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage* (C. Press Ed.): CRC Press.

Bussière, B., Maqsoud A, Demers I, Éthier M-P, Aubertin M, Chapuis R. P. (2008). Modélisation physique de divers scénarios de recouvrement et étude du comportement hydrogéologique : site Manitou, Rapport intermédiaire PU-2008-03-371, URSTM-UQAT, pp. 15.

Cabrera, V. (1979). Slurry pipelines: theory, design and equipment. *Journal of World Mining*, pp. 56-65.

Caldwell, J. A., Oboni, C., & Oboni, F. (2015). Tailings facility failures in 2014 and an update on failure statistics. Proceedings Tailings and Mine Waste 2015, Vancouver, BC, October 26 to 28, 2015.

Chovan, K., Julien, M. R., Ingabire, E.-P., James, M., Masengo, E., Lépine, T., & Lavoie, P. (2021). A risk assessment tool for tailings storage facilities. *Canadian Geotechnical Journal*. doi:10.1139/cgj-2020-0329.

Chopard, A. (2017). Évaluation environnementale de minerais sulfurés polymétalliques basée sur une approche minéralogique pluridisciplinaire. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Conlin, B. H. (1989). Tailings beach slopes. *Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage, The Vancouver Geotechnical Society, Vancouver*.

Cooke, R. (2006). *Thickened and paste tailings pipeline systems: Design procedure–Part 1.* Paper presented at the Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings.

Cosset, G. (2009). Comportement hydrogéologique d'une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux : essais en colonne et simulations numériques. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.

Coulibaly, Y. (2016). Auscultation de la digue Nord-Ouest du parc à résidus miniers no. 1 de Doyon dans une perspective d'évaluation de la stabilité pendant la phase de restauration. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. .

Dagenais, A.M., Aubertin, M., Bussière, B., Cyr, J., & Fontaine, R. (2002). Auscultation et suivi du recouvrement multicouche construit au site minier Lorraine, Latulipe, Québec. In Proceedings of Symposium (2002) sur l'Environnement et les Mines, Novembre 3-5, (2002), Rouyn Noranda, QC.

Dagenais, A. M. (2005). Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires. Thèse de Doctorat, École Polytechnique Montréal.

Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings–the fundamentals. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011, pages 1-9.

Delage P. et Cui Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. Techniques de l'Ingénieur, traité *Construction,* C301 : 1-20.

Demers, I. (2008). Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., & Blier, A. (2008). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering, 21*(4): 317-329.

Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Benzaazoua, M. (2009). Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings covers. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(4): 454-469.

Demers, I., Bussière, B., Rousselle, M., Aubertin, M., Pabst, T., Lacroix, R. (2013). Laboratory evaluation of reclamation scenarios for the spillage areas of the abandoned Manitou site using Goldex tailings, 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada.

Demers, I., Bouda, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Bois, D., & Gagnon, M. (2015a). Valorization of acid mine drainage treatment sludge as remediation component to control acid generation from mine wastes, part 2: field experimentation. *Minerals Engineering*, 76: 117-125.

Demers, I., Huo-Kang, J., & Mbonimpa, M. (2017). Variablility of material properties used for covers to prevent acid mine drainage. *70e Conférence Canadienne de Géotechnique : GeoOttawa 2017, 1-4 octobre 2017, Ottawa, Ontario, Canada.*

Driouky, Z. (2020). Étude de l'impact de la ségrégation des résidus miniers sur la performance de la technique de la nappe phréatique surélevée. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Edahbi, M., Plante, B., Benzaazoua, M., Kormos, L., & Pelletier, M. (2018). Rare earth elements (La, Ce, Pr, Nd, and Sm) from a carbonatite deposit: Mineralogical characterization and geochemical behavior. *Minerals,* 8(2), 55.

Elberling, B., & Nicholson, R.V. (1996). Field determination of sulphide oxidation rates in mine tailings. *Water Resources Research*, 32(6): 1773–1784.

Elberling, B., Nicholson, R.V., & David, D.J. (1993). Field evaluation of sulphide oxidation rates. *Nordic Hydrology*, 24: 323-338.

Eltilib, R. A. E. E., Hussain, H. A. K., & Jaafar, A. (2011). Investigation on the particle settling velocity in non-newtonian fluids. *Journal of Applied Sciences*, 11 (9) : 1528-1535.

Ethier, Marie-Pier (2018). Évaluation de la performance d'un système de recouvrement monocouche avec nappe surélevée pour la restauration d'un parc à résidus miniers abandonné. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Ethier, M.-P., Bussière, B., Aubertin, M., & Broda, S. (2018). Three-dimensional hydrogeological modelling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal,* 26 (4): 1201-1219

Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 104*(5): 461-478.

Fitton, T. (2007). Tailings beach slope prediction. (Thesis). RMIT University.

Fredlund, D.G., and Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4): 521-532

Getzen, R. T. (1983). *Soil mechanics related to permeability anisotropy of coastal sand deposits.* Paper presented at the Coastal Zone'83.

Holtz, D. R., & Kovacs, D. W. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. Englewood Cliffs, New Jersey 07632: PRENTICE HALL.

Jeeravipoolvarn, S. (2010). Geotechnical Behavior of In-Line Thickened Oil Sands Tailings. Ph.D. Thesis, University of Alberta.

Kovács, G. 1981. Seepage Hydraulics. Elsevier Science Publishers, Amsterdam

Küpper, A. M. (1991). Design of hydraulic fill. Ph.D. Thesis, University of Alberta.

Lafrance, B., Moorhead, J., & Davis W., D. (2003). Cadre géologique du camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde.

Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J. et Gélinas, P. (2001). Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage 1: Conceptual model and system characterization. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52:137-164.

Li, X.-Y., & Yuan, Y. (2002). Settling velocities and permeabilities of microbial aggregates. *Water research, 36*: 3110-3120.

Malvern Instruments limited. (2015). Mastersizer S, Mastersizer 2000 and Mastersizer 3000: Method transfer – how to get the same results on all three systems

Månsson, E. (2014). Investigation of Particle Sizes, Beach Profiles and Compounds in Tailings Dams. Master's Thesis. Lund University, Department of Construction Sciences, Geotechnical Engineering.

Marchesse, Y. (2019). Mécanique des fluides. ECAM-LYON, Lyon, France, 210 pages.

Martin, V. (2003). Étude des propriétés non saturées des stériles miniers. Mémoire de Maîtrise en génie minéral, Département des génies civil, géologiques et des mines, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

Mbonimpa, M., Aubertin, M, Bussière, B., and Maqsoud, A. (2006). A predictive function for the water retention curve of compressible soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(9): 1121-1132.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., & Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 916-932.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R.P. et Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20(1): 235-259.

Melent'ev, V. A., Kolpashnikov, N. P., & Volnin, B. A. (1973). Hydraulic Fill Structures, Energy, Moscow (English translation from original Russian).

MEND (1996). Final report 2.17.1. Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings.

Mihiretu, Y. T. (2009). Fundamentals of segregation. (Thesis). University of Alberta. Retrieved from https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-AEU-29626&op=pdf&app=Library

Miller, S. D., Jeffery, J. J., & Wong, J. (1991). Use and misuse of the acid base account for "AMD" prediction. *Proceedings of the 2nd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, 3*: 489-506.

Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2012). Directive 019 sur l'industrie minière. 95 pages.

Mittal, H. K., & Morgenstern, N. R. (1975). Parameters for the design of tailings dams. *Canadian Geotechnical Journal, 12*(2): 235-261.

Oboni, F., & Oboni, C. (2020). *Tailings dam management for the twenty-first century*: Springer.

Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. J. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high-water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7): 1312-1323.

Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J. W., Bussière Bruno, & Zagury Gérald J. (2010). Preventing acid mine drainage with an elevated water table: long-term column experiments and parameter analysis. *Water, Air, & Soil Pollution* : An International Journal of Environmental Pollution, 213(1-4) : 437–458.

Ouattara, D. (2017). Étude expérimentale des propriétés rhéologiques et mécaniques des remblais miniers en pâte cimentés incorporant des superplastifiants, Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Orava, A. D., Tremblay, G. A., Tibble, A., & Nicholson, R. (1997). Prevention of acid rock drainage through the application of in-pit disposal and elevated water table concepts, In Proceedings: 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), vol. 3, Vancouver pp. 973–983.

Pabst, T. (2011). Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal

Refsgaard, J.C., Christensen, T.H. et Ammentorp, H.C. (1991). A model for oxygen transport and consumption in the unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 129(1-4) : 349-369.

Rey, N. (2019). Étude expérimentale et conceptuelle de la technique du recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée incluant l'utilisation de résidus désulfurés. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue,

Rey, N., Demers, I., Bussière, B., & Mbonimpa, M. (2020). Laboratory study of low-sulfide tailings covers with elevated water table to prevent acid mine drainage. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(12): 1998–2009

Rey, N., Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Gagnon, M. (2020). A geochemical evaluation of a monolayer cover with an elevated water table for the reclamation of the Doyon-Westwood tailings ponds, Canada. *Environmental Earth Sciences, 79*(2): 58.

Robertson, A. (1987). The influence of depositional methods on the engineering properties of tailings deposits. Paper presented at the Int. Conf. on Mining and industrial Waste Management. Johannesburg, South Africa, August.

Robinsky, E. I. (1978). Tailings disposal by the thickened discharge method for improved economy and environmental control. *Tailing disposal today, 2*: 75-92.

Robinsky, E. I. (1999). Tailings dam failures need not be disasters: the thickened tailings disposal (TTD) system. *CIM bulletin, 92*(1028): 140-142.

Rozenbaum, O. (1999). Étude de l'influence de la texture sur l'émissivité spectrale de matériaux poreux semi-transparents à haute température.

Saleh-Mbemba, F. (2016). Évaluation du drainage, de la consolidation et de la dessiccation des résidus miniers fins en présence d'inclusions drainantes. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal.

Saleh-Mbemba, F., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Li, L. (2015). Experimental Characterization of the Shrinkage and Water Retention Behaviour of Tailings from Hard Rock Mines. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1): 251-266

Saleh-Mbemba, F. (2010). Évaluation de la dessiccation, du retrait et de la fissuration de matériaux silteux peu plastiques. Mémoire de maitrise, École Polytechnique de Montréal

Savoie, A., Trudel, P., Sauvé, P., Hoy, L., & Lao, K. (1991). Géologie de la mine Doyon (région de Cadillac). Retrieved from http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/ET9005/ET9005.pdf

Scott, J. D., & Cymerman, G. J. (1984). *Prediction of viable tailings disposal methods.* Paper presented at the Sedimentation Consolidation Models—Predictions and Validation.

SENES. (1996). Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings. Ottawa, Canada

Simms, P, Williams, MPA, Fitton, TG & McPhail, G 2011, 'Beaching angles and evolution of stack geometry for thickened tailings - a review', in R Jewell & AB Fourie (eds), Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 323-338, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1104_29_Simms

Stokes, G. G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums, Pitt Press Cambridge.

Talmon, A., & Huisman, M. (2005). Fall velocity of particles in shear flow of drilling fluids. Tunnelling and underground space technology, 20(2), 193-201.

Talmon, A. M., van Kesteren, W. G. M., Sittoni, L., & Hedblom, E. P. (2014). Shear cell tests for quantification of tailings segregation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(2): 362-373.

Tassé, N. et Germain, D. (1999). Le parc à résidus miniers Manitou et ses épandages - Caractérisation et options de restauration. Rapport INRS-Eau, Terre et Environnement.

Truche, C. (2011). Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain. Planète et Univers [Physiques]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. Français. p. 230

van Rhee, C. (2002). Modelling the sedimentation process in a Trailing Suction Hopper Dredge. *Terra et Aqua*, 86: 18-27.

Vick, S. G. (1984). Discussion to "Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams" and "Investigation of Flow Failures of Tailings Dams" by Jey K. Jeyapalan, by J. Michael Duncan, and H. Bolton Seed (February, 1983). *Journal of Geotechnical Engineering, 110*(3): 454-456.

Vick, S. G. (1990). *Planning, design and analysis of tailings dams*. Vancouver, B.C.: BiTech Publishers.

Wang, Y., Wu, A., Zhang, L., Wang, H., & Jin, F. (2018). Investigation of the Sedimentation Property of Backfill Material on the Basis of Rheological Test: A Case Study of Iron Tailings. *Journal of Chemistry*, 2018, Article ID 9530767.

ANNEXE A CONSTRUCTION DES DIGUES

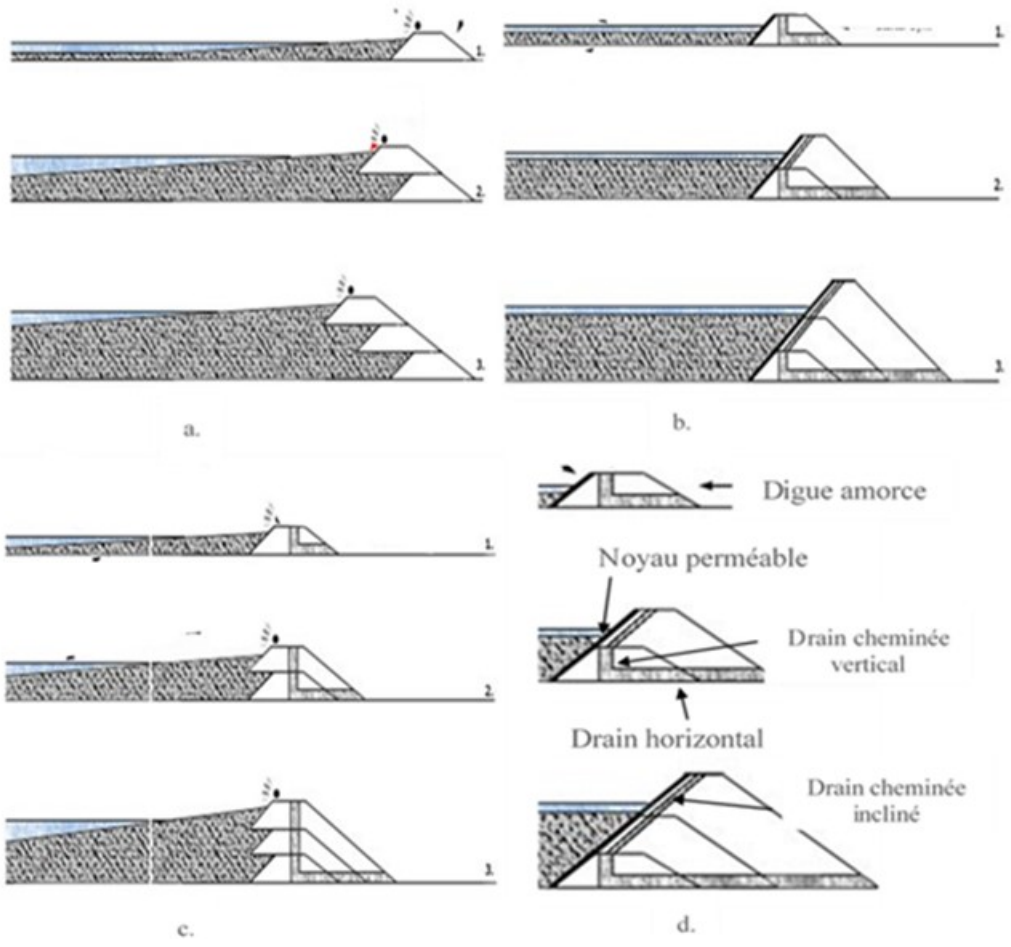


Figure A. 1 Méthodes de construction des digues des parcs à résidus miniers. a. Amont, b. Avale, c. Centrale, d. Types d'ouvrage de décantation (https ://www.tailings.info/disposal/conventional.htm)

ANNEXE B DIAGRAMME TERNAIRE DE GESTION DES RÉSIDUS MINIERS

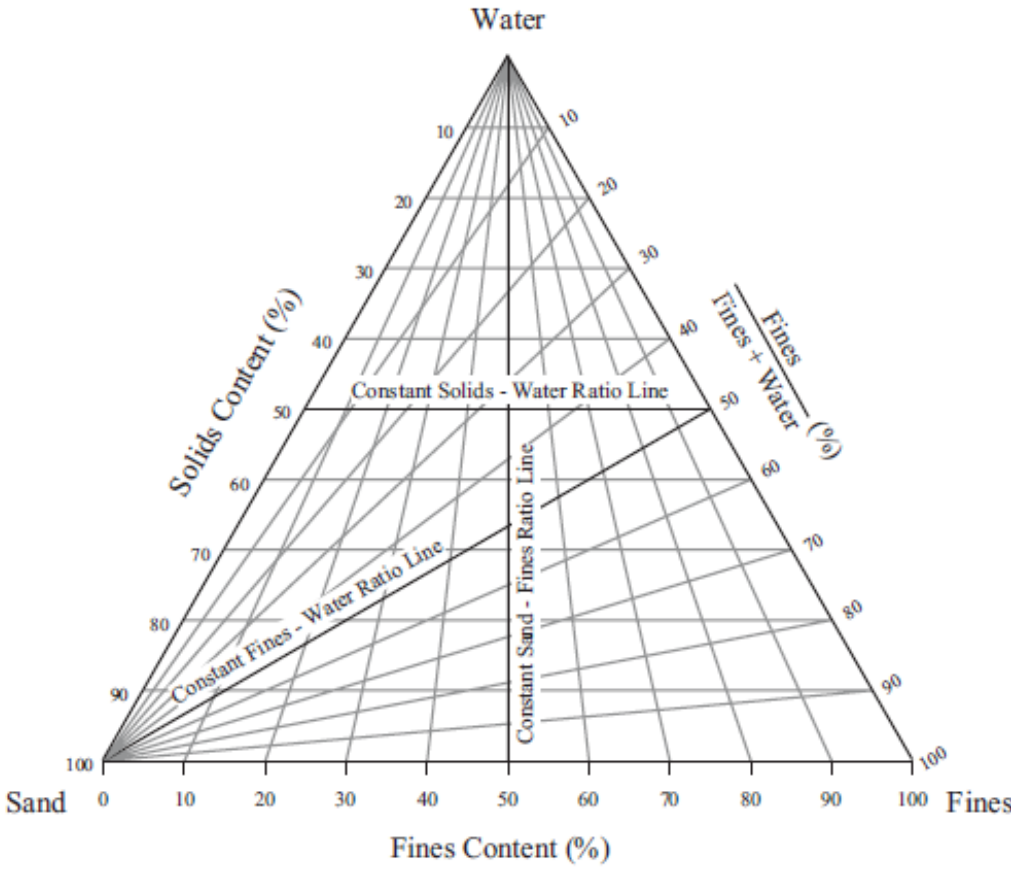


Figure A. 2 Diagramme ternaire de gestion des résidus miniers (Mihiretu, 2009)

ANNEXE C DISPOSITIFS POUR ESSAIS DE SÉDIMENTATION

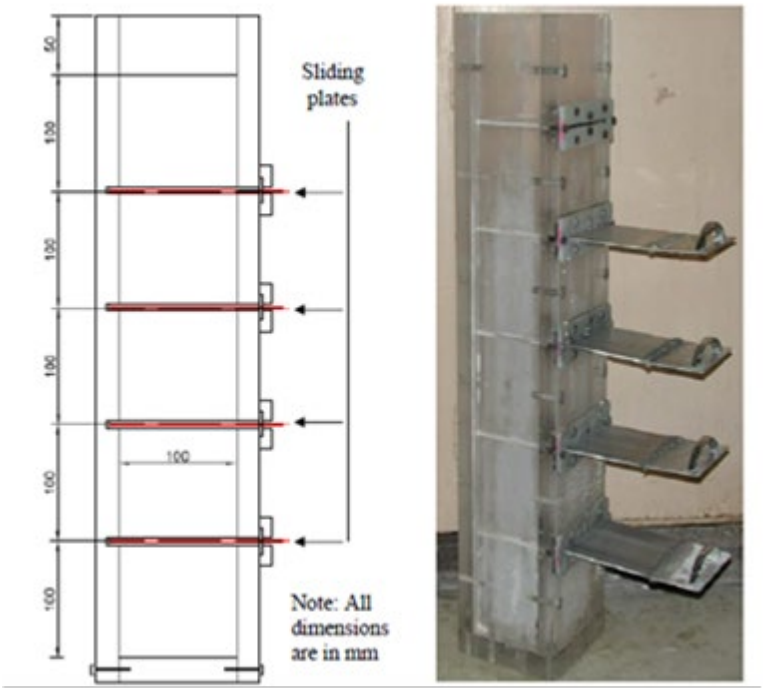


Figure A. 3 Colonne utilisée pour des essais statiques de sédimentation (Mihiretu, 2009)

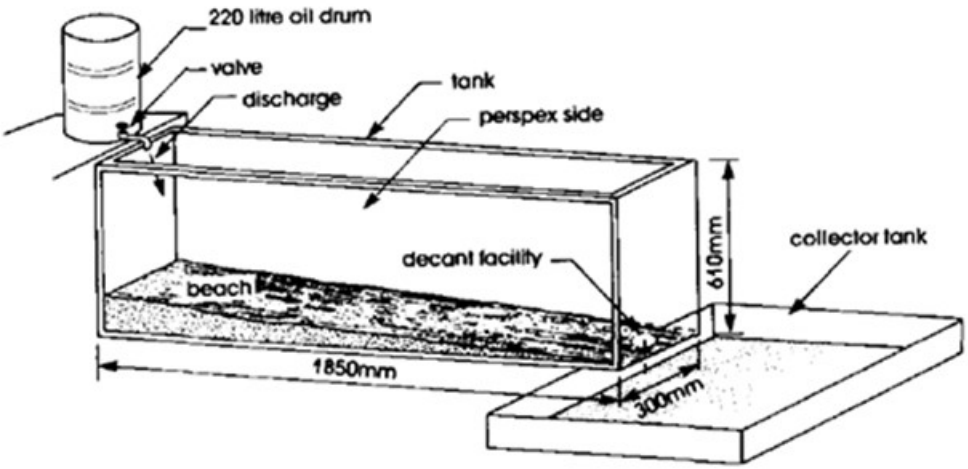


Figure A. 4 Canal d'écoulement ouvert pour des essais dynamiques (Blight et Bentel, 1985)

ANNEXE D DÉTERMINATION DE G_s À L'AIDE DU PYCNOMÈTRE À HÉLIUM MICROMERITICS ACCUPYC 1330

Le pycnomètre Micromeritics Accupyc 1330 est un appareil de mesure automatique de volume d'échantillon solide, en poudre, granulaire ou fragmenté. Son fonctionnement relève de la présence d'Hélium (He), gaz inerte qui occupe tous les vides dans l'échantillon sans être adsorbé sur la surface des grains. Une masse connue d'échantillon est mise dans un bocal cylindrique de volume connu placé dans une enceinte de mesure. L'appareil effectue 15 séries de purge de l'air de l'enceinte de mesure vers l'enceinte vide. À chaque purge, les pressions dans les 2 enceintes sont mesurées automatiquement. La purge prend fin lorsque tout l'air contenu dans l'échantillon est remplacé par He qui remplit rapidement tous les pores de l'échantillon. Les volumes des enceintes et la masse de l'échantillon étant connus, le volume de l'échantillon dans le bocal est l'inconnu à déterminer à partir de la loi des gaz parfaits. L'équation A.1 (Rozenbaum, 1999) donne l'expression du volume V_s de l'échantillon.

$$V_s\ (cm^3) = V_{ch} - \frac{V_{dep}}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \qquad (A.1)$$

P_1 et P_2 sont les pressions dans l'enceinte de mesure et l'enceinte vide à la dernière purge; V_{ch} (cm^3) est le volume de He occupé dans l'enceinte de mesure, V_{dep} (cm^3) est le volume de He déplacé par le solide vers l'enceinte vide à la dernière purge.

À partir de V_s, il est alors possible de calculer la masse volumique des grains solides ρ_s, selon l'équation A.2. L'appareil calcule, avec une erreur relative de ± 0,01 (Chopard, 2017), la densité relative des grains solides à partir de l'équation A.3.

$$\rho_s\ (g/cm^3) = \frac{M_s}{V_s} \qquad (A.2)$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \qquad (A.3)$$

M_s (g) est la masse du solide (prise sur une balance de précision) et ρ_w est la masse volumique de l'eau (ρ_w = 1 g/cm^3 à 4° C).

ANNEXE E SUIVI DE L'ESSAI ET DÉMONTAGE DE LA CELLULE TEMPE (ASTM D3152-72)

Le montage de la cellule consiste à ajouter une quantité de résidus humides dans le cylindre métallique. Avant le montage de la cellule, on procède à la mesure en 3 points du diamètre intérieur et de la hauteur totale du cylindre métallique ($Ø_t$ et h_t) et à la pesée de la cellule complète vide. La masse de la cellule vide ($M_{cel(vide)}$) soustraite de la masse de la cellule remplie ($M_{cel(remplie)}$) permet de déduire la masse initiale des résidus humides (M_{hi}). Le diamètre ($Ø_i$) de l'échantillon humide et la hauteur libre dans le cylindre (h_l) sont mesurés. La hauteur initial (h_i) de l'échantillon s'obtient en soustrayant la valeur de h_l de celle de h_t. En parallèle, la densité relative des grains (G_s) et la teneur en eau massique initiale (w_i) sont déterminées respectivement à l'aide d'un pycnomètre à hélium et d'un sous-échantillon séché à l'étuve. Les dimensions, la masse initiale et la teneur en eau massique initiale de l'échantillon permettent de calculer son volume total initial, sa masse volumique humide, la porosité ou l'indice des vides et le degré de saturation initiaux au début de l'essai. La courbe de rétention étant réalisée en drainage, la saturation initiale est Sr = 100 %.

Au cours de l'essai, les cellules sont pesées après 48 h à chaque palier de pression exercée sur la tête de la cellule. À chaque palier de succion $\psi_{(i)}$, la masse d'eau perdue est M_w, M est la masse humide de l'échantillon, $M_{cel\psi(i)}$ est la masse de la cellule complète.

À la fin de l'essai, la cellule complète est pesée puis démontée. Au dernier palier de pression, $Ø_f$ (cm) et h_f (cm) sont le diamètre et la hauteur finaux de l'échantillon, V_{tf} est le volume final de l'échantillon, la masse humide finale de l'échantillon est M_{hf} (g), la masse sèche finale de l'échantillon est M_{sf}, ρ_w est la masse volumique de l'eau (ρ_w =1 g/cm^3). Les formules ci-après présentent successivement les calculs effectués afin de déterminer la teneur en eau volumique correspondant à chaque palier de succion. La courbe de rétention d'eau décrit l'évolution de θ_w en fonction de la succion ψ appliquée et est présentée sous forme logarithmique.

- Volume final de l'échantillon

$$V_{tf}\,(cm^3) = \pi \times \left(\frac{Ø_f}{2}\right)^2 \times h_f \qquad (A.4)$$

- Teneur en eau massique finale après séchage à l'étuve

$$w_f = \frac{M_{hf} - M_{sf}}{M_{sf}} \qquad (A.5)$$

- Volume des solides final

$$V_{sf}(cm^3) = \frac{M_{sf}}{\rho_s} = \frac{M_{sf}}{\rho_w \times G_s} \quad (A.6)$$

- Volume des vides final

$$V_{vf}(cm^3) = V_{tf} - V_{sf} \quad (A.7)$$

- Indice des vides (final)

$$e_f = \frac{V_{vf}}{V_{sf}} \quad (A.8)$$

- Porosité finale

$$n_f = \frac{e_f}{1+e_f} \quad (A.9)$$

- Masse d'eau perdue à chaque palier de pression $\psi_{(i)}$

$$M_w = M_{cel\psi(i-1)} - M_{cel\psi(i)} \quad (A.10)$$

- Masse humide d'échantillon à chaque palier de pression $\psi_{(i)}$

$$M = M_{cel\psi(i)} - M_{cel(vide)} \quad (A.11)$$

- Teneur en eau massique à chaque palier de pression

$$w = \frac{M - M_{sf}}{M_{sf}} \quad (A.12)$$

- Degré de saturation à chaque palier de pression $\psi_{(i)}$

$$S_r = \frac{G_s \times w}{e_f} \quad (A.13)$$

- Teneur en eau volumique à chaque palier de pression $\psi_{(i)}$

$$\theta_w = S_r \times n_f \quad (A.14)$$

ANNEXE F POURCENTAGE MASSIQUE DES MINERAUX SUR LES ÉCHANTILLONS DE LA RANGÉE 2 DU PARC 3 EST DOYON/WESTWOOD

INTERVALLES DE PROFONDEUR (cm)	0-10	0-10	10-20	10-20	0-20	0-20	20-30	20-30	20-30	30-40	30-40	30-40	40-50
STATIONS	R2S2	R2S4	R2S2	R2S4	R2S1	R2S3	R2S2	R2S3	R2S4	R2S1	R2S3	R2S4	R2S3
MINÉRAUX	Pourcentage massique (%)												
Sphalérite						0,01							
Calcite	2,8	3,1	3,3	4,2	1,9	7,62	8,9	0,6	2,6	2,9	2,6	3,4	3,99
Dolomite		0,9		0,6		2,13	1,29		0,5			0,2	
Chlorapatite						0,61	0,7						
Gypse	6,6	1,1	4,4	0,9	1,9	2,41	0,12	0,7	0,6	1,2	0,7	1,5	0,57
Chlorite	8,4	6,6	7,2	8,4	5,4	9,97	11,6	6,2	6,1	6,5	7,8	6,2	12,9
Muscovite	16,3	12,4	15,2	23,3	14,2	14,8	20,1	12,5	13,7	20,2	20,8	15,1	27,8
Feldspath	14,3	21	15	15,9	15,5			13,5	15,2	10,5	8,7	12,6	
Quartz	47,2	48,2	49,2	41,8	45,8	44,7	40,8	57,1	55,8	52,2	50,5	56,4	40,9
Albite						5,68	4,62						5,09
Oligoclase						6,62	8,19						5
Pyrite	3,5	5,5	4,6	3,5		4,02	2,96	7,1	4,2	4,8	7	3,8	3,12
Rutile	0,7	1,3	0,8	1,4	1,4	1,06	0,72	1,6	1,3	1,3	1,4	0,8	0,6
Magnétite						0,36	0,08						
Chalcopyrite	0,3		0,3		0,8			0,8		0,5	0,7		

INTERVALLES DE PROFONDEUR (cm)	70-80	70-80	80-90	90-100	90-100	90-100	100-110	110-125	110-125	110-125	110-125	110-125
STATIONS	R2S1	R2S3	R2S2	R2S1	R2S3	R2S4	R2S1	R2S1	R2S2	R2S3	R2S3	R2S4
MINÉRAUX	Pourcentage massique (%)											
Sphalérite			0,08	0,02								0,04
Calcite	7,8	4,64	7,13	4,88	4,31	5,4	1,9	3,1	8,02	1,7	1,3	6,22
Dolomite	2,21		0,48	1,88		1,84	0,7	0,9	1,61			2,22
Chlorapatite	0,63		0,45	0,37		0,3			0,77			0,4
Gypse	0,48	0,6	3,94	2,9	0,71	1,92	1,1	0,5	1,2	2,1	0,7	3,02
Chlorite	7,95	11,2	13,7	9,57	12,88	13,64	6,1	6,6	6,35	8	5,9	8,1
Muscovite	24,2	25,4	13,3	12,74	29,04	14,01	12,4	12,7	15,81	25,4	17,4	14,36
Feldspath							15,7	15,3		8,4	9,6	
Quartz	40,1	35,4	40,4	47,12	31,13	46,39	50,5	49,7	43,71	49,1	55,9	46,29
Albite	4,14	9,77	6,5	6,73	10,82	5,92			5,41			5,56
Oligoclase	7,56	8,5	9,85	6,84	7,08	5,09			7,11			6,72
Pyrite	3,79	3,44	2,93	5,63	3,16	4,31	10	9,6	9,23	4,4	7,4	6,05
Rutile	0,84	1,06	1,15	1,02	0,87	1,16	1,5	1,5	0,77	0,5	1,3	1,01
Magnétite	0,29		0,07	0,31								
Chalcopyrite										0,3	0,6	

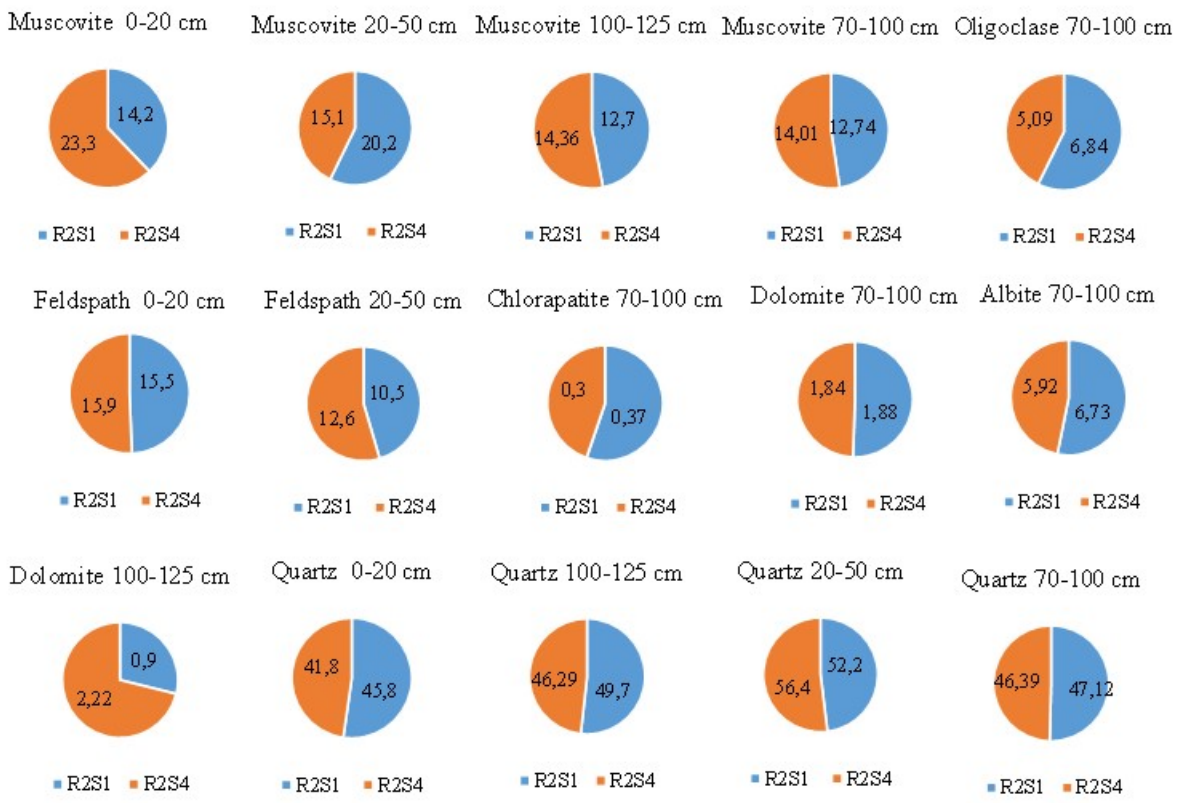


Figure A. 6 Pourcentages massiques des minéraux moyennement lourds sur les stations 1 et 4 à différentes profondeurs (Parc 3 Est Doyon -Westwood)

ANNEXE G CARACTÉRISATION CHIMIQUE EN PARTIE POUR MILLION (PPM) DES RÉSIDUS DU PARC 3 EST DOYON/WESTWOOD

Elément	Ag	Al	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Ta	Tb	Te	Th	Tl	U	W	Y	Sn	Mg	Mn	Na	Ni	P	S	Sr
Limite de détection (ppm)	0,02	100	1	100	1	0,5	100	100	0,05	0,1	0,05	0,2	0	0,05	0,1	0,1	0,3	100	2	100	0,5	100	100	0,5
Stations																								
S4R2 20-30	2,03	52300	262	14100	44	1092	41600	18300	0,15	0,6	4,57	11	0,1	2,04	8,5	18	4,5	7900	589	6500	27	574	32800	47
S4R2 10-20	4,63	71300	192	18600	31	876	41500	27700	0,18	0,8	9,41	12	0,1	2,53	9,1	21	6,9	9000	631	6200	19	604	28900	54
S4R2 0-10	0,99	53900	157	22000	35	536	61200	15100	0,26	0,8	4,75	7,8	0,1	2,8	7,5	28	3,3	10000	627	10500	21	704	41800	77
S3R2 30-40	4,62	57800	74	16500	35	1835	61400	21700	0,15	0,7	8,61	11	0,1	2,27	9,6	23	5,5	7700	636	5900	34	662	>50000	51
S3R2 0-20	0,9	63200	114	27500	35	392	53100	19000	0,23	0,8	6,27	7,5	0,1	1,87	9,5	27	4,2	11800	624	11000	23	694	31200	85
S1R2 0-20	1,49	48600	70	23800	123	833	100000	13500	0,26	0,8	6,7	7	0,1	1,95	3,1	31	3,6	8400	671	9400	179	829	>50000	75
S2R2 0-20	0,75	61400	452	19200	380	412	56900	18300	0,24	0,8	4,9	8,3	0,1	2,48	2,4	28	4,3	11200	694	11000	324	677	28200	79
S3R2 20-30	3,48	47700	123	11100	37	1745	58500	17000	0,13	0,6	5,45	11	0,1	2,07	11	21	4,4	6700	593	5700	33	671	49200	46
S2R2 20-30	0,81	58400	373	21700	37	639	61100	17000	0,23	0,8	4,84	8,2	0,1	2,08	14	27	3,7	10900	692	10600	38	733	35700	82
S1R2 30-40	1,85	61400	189	18500	196	1018	45300	21700	0,16	0,7	7,21	10	0,1	2,11	2,2	22	5,8	9100	624	7400	154	625	32800	56
S4R2 30-40	1,6	54200	329	15400	47	973	42200	18700	0,16	0,6	4,87	10	0,1	2,16	11	19	4,5	8200	596	7000	28	567	30100	53
Élément	Ce	Co	Cs	Ga	Hf	In	La	Lu	Ti	V	Zn	Zr	As	Be	Bi	Cd	Mo	Nb	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Li
Limite de détection (ppm)	0,05	0,1	1	0,1	0	0,02	0,1	0,01	100	2	1	0,5	1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,5	0,2	0,1	0,5	2	1
Stations																								
S4R2 20-30	60,3	13,6	<1	10,9	4,8	0,27	32,6	0,36	1000	36	260	170	3	1,1	3,4	1	3,6	2,2	17	70,9	0,1	9,8	2	8
S4R2 10-20	68,4	12,4	1	15,3	5,7	0,28	37,2	0,42	1300	55	252	195	3	1,2	6,5	0,8	3,9	2,8	56	104	0,2	14	2	9
S4R2 0-10	59,5	28	<1	13,2	4,1	0,15	32,8	0,46	1900	64	115	142	8	1	2,2	0,5	3,3	4,5	23	55,9	0,2	15	3	9
S3R2 30-40	74	23,2	<1	13,7	4,8	0,36	40,8	0,4	1100	42	310	177	5	1,1	6,5	1,2	3,9	2,6	40	87,4	0,2	12	4	8
S3R2 0-20	55,8	22,9	1	15,6	3,4	0,16	30,8	0,44	1900	80	90	115	6	0,9	2,8	0,3	3,1	4	35	73,1	0,2	17	<2	11
S1R2 0-20	61,4	53,8	<1	12,4	4	0,24	34,3	0,5	2200	66	133	147	15	0,9	3,9	0,6	11	4,8	23	54,8	0,3	15	5	8
S2R2 0-20	63,6	28	1	15	3,8	0,15	34,9	0,46	1800	74	99	137	6	0,8	2,2	0,4	15	4,3	27	69	0,1	16	3	11
S3R2 20-30	69,9	21,7	<1	10,4	4,4	0,32	38,2	0,39	1000	32	296	165	5	0,8	4,5	1,2	4,7	2,3	26	67	0,2	9,3	3	7
S2R2 20-30	62,1	24,4	<1	13,1	3,7	0,19	34,1	0,44	1900	69	127	128	6	1,2	2,6	0,4	4,5	3,8	24	64,8	0,2	14	3	10
S1R2 30-40	63	16,9	<1	14,8	4,8	0,29	34,2	0,38	1300	52	254	170	4	1	4,6	1	9,4	3	28	87,1	0,2	14	3	9
S4R2 30-40	64,1	13,5	<1	12,1	4,5	0,26	35,1	0,36	1200	40	245	161	3	1	3,3	0,9	3,1	2,7	22	75,2	0,1	11	<2	8

ANNEXE H DENSITÉS RELATIVES DES GRAINS SOLIDES DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 EST DOYON /WESTWOOD

Station Doyon	Profondeur (cm)	GS	Station Doyon	Profondeur (cm)	GS	Station Doyon	Profondeur (cm)	GS
R1S1 76-113	76-113	2,7031	R2S1 115-125	115-125	2,9201	R3S1 110-125	110-125	2,8594
R1S1 50-76	50-76	2,685	R2S1 100-110	100-110	2,9069	R3S1 100-110	100-110	2,7578
R1S1 40-50	40-50	2,8294	R2S1 90-100	90-100	2,8888	R3S1 90-100	90-100	2,8277
R1S1 30-40	30-40	2,7388	R2S1 80-90	80-90	2,8198	R3S1 70-80	70-80	2,8484
R1S1 20-30	20-30	2,7525	R2S1 70-80	70-80	2,7975	R3S1 60-70	60-70	2,7922
R1S1 10-20	10--20	2,7901	R2S1 55-65	55-65	2,6239	R3S1 50-60	50-60	2,8093
R1S1 0-10	0-10	2,8004	R2S1 50-55	50-55	2,7472	R3S1 40-50	40-50	2,8022
R1S2 110-125	110-125	2,6845	R2S1 45-55	45-55	2,6808	R3S1 30-40	30-40	2,8624
R1S2 100-110	100-110	2,7237	R2S1 32-45	32-45	2,7633	R3S1 20-30	20-30	2,7512
R1S2 83-100	83-100	2,7179	R2S1 0-22	0-22	2,8802	R3S1 10-20	10--20	2,689
R1S2 71-78	71-78	2,7194	R2S2 110-125	110-125	2,8744	R3S2 110-125	110-125	2,7698
R1S2 61-71	61-71	2,6902	R2S2 100-110	100-110	2,7476	R3S2 100-110	100-110	2,7434
R1S2 50-60	50-60	2,7049	R2S2 95-100	95-100	2,7183	R3S2 83-100	83-100	2,7933
R1S2 40-50	40-50	2,7334	R2S2 80-95	80-95	3,0917	R3S2 63-83	63-83	2,8231
R1S2 30-40	30-40	2,69	R2S2 60-80	60-80	2,6918	R3S2 53-63	53-63	2,7049
R1S2 20-30	20-30	2,7014	R2S2 37-50	37-50	2,9125	R3S2 42-53	42-53	2,7891
R1S2 0-20	0-20	2,7195	R2S2 22-30	22-30	2,7122	R3S2 30,5-35	30,5-35	2,8554
R1S3 110-125	110-125	2,6718	R2S2 15,5-22	15,5-22	2,7398	R3S2 17,5-30,5	17,5-30,5	2,7696
R1S3 80-110	80-110	2,7287	R2S2 5,5-15,5	5,5-15,5	2,7713	R3S2 0-17,5	0-17,5	2,7715
R1S3 60-80	60-80	2,7193	R2S3 117.5-125	117,5-125	2,8794	R3S3 115-125	115-125	2,7499
R1S3 35-60	35-60	2,722	R2S3 108-117,5	108-117,5	2,8268	R3S3 100-115	100-115	2,7482
R1S3 23-35	23-35	2,7321	R2S3 96-98,3	96-98,3	3,0101	R3S3 60-100	60-100	2,7344
R1S3 0-23	0-23	2,7631	R2S3 92-96	92-96	2,7949	R3S3 50-60	50-60	2,7159
R1S4 110-125	110-125	2,7304	R2S3 72-82	72-82	2,8267	R3S3 30-50	30-50	2,7292
R1S4 90-100	90-100	2,6795	R2S3 62-72	62-72	2,7742	R3S3 0-30	0-30	2,7573
R1S4 60-80	60-80	2,6713	R2S3 51-62	51-62	2,8849	R2S4 110-125	110-125	2,863
R1S4 55-60	55-60	2,6296	R2S3 41-51	41-51	2,8164	R2S4 100-110	100-110	2,717
R1S4 30-55	30-55	2,7097	R2S3 30-41	30-41	2,8273	R2S4 90-100	90-100	2,8164
R1S4 0-30	0-30	2,7252	R2S3 21-30	21-30	2,8629	R2S4 85-90	85-90	2,6835
R2S4 70-80	70-80	2,6966	R2S3 0-21	0-21	2,8307	R2S4 80-85	80-85	2,7131
R2S4 60-70	60-70	2,6253	R2S4 40-50	40-50	2,7072	R2S4 20-30	20-30	2,7426
R2S4 50-60	50-60	2,6811	R2S4 30-40	30-40	2,6096	R2S4 10-20	10--20	2,6828
						R2S4 0-10	0-10	2,7703

ANNEXE I DISTRIBUTION TRANSVERSALE DE LA DENSITÉS RELATIVES DES GRAINS SOLIDES DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 EST DOYON /WESTWOOD

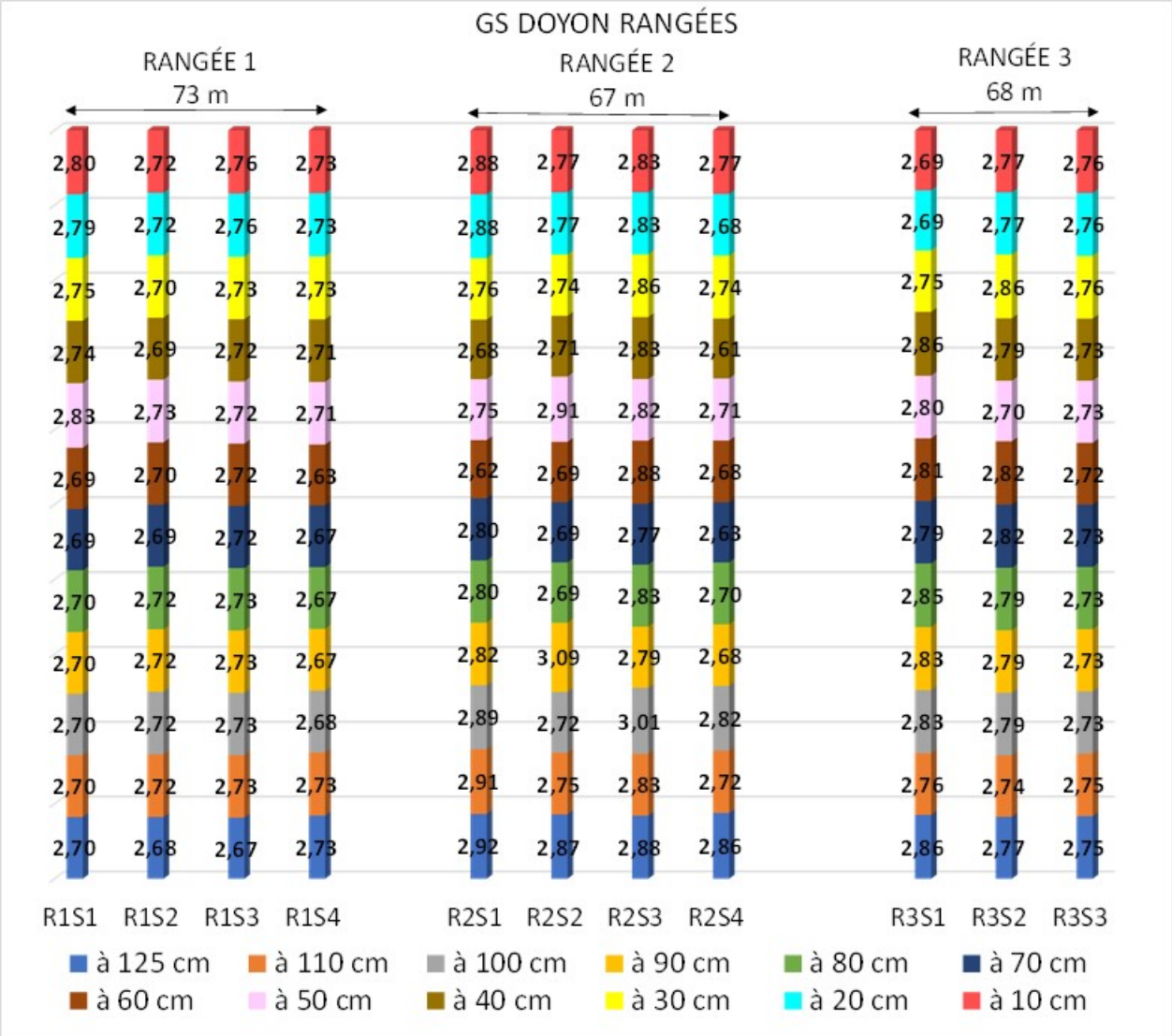


Figure A.7 Distribution transversale de G_S sur les rangées R1, R2 et R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

ANNEXE J PARAMÈTRES C_U, D_{10}, D_{90}, P_{44}, ET P_{80} DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 EST DOYON/WESTWOOD

Stations	R1541	R1542	R1543	R1544	R1545	R1546	R1547	R1548	R1849	R15410	R15411	R2541	R2542	R2543	R2544	R2545
Profondeur (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50
Cu	9,35	19,22	15,00	13,34	14,58	16,94	5,70	19,25	7,33	9,94	16,94	10,01	11,65	8,70	17,16	12,46
D_{10} (µm)	2,59	6,60	4,01	3,74	3,65	7,89	17,78	4,75	2,09	1,95	3,20	3,34	3,51	2,50	7,02	3,30
D90 (µm)	74,46	238,92	190,50	154,84	153,27	243,47	195,67	198,22	59,92	68,13	148,76	89,64	98,37	67,07	237,77	148,11
P44 (%)	77,92	31,95	52,29	56,35	54,39	27,28	24,29	40,38	84,98	81,18	54,23	69,03	80,62	80,62	30,37	61,73
P80 (%)	91,06	43,95	66,96	73,17	72,21	40,32	47,85	55,51	93,64	92,27	71,76	87,40	83,98	92,77	44,66	76,83
Stations	R3541	R3542	R3543	R3544	R3545	R3546	R3547	R3548	R3849	R35410	R1511	R1512	R1513	R1514	R1515	R1516
Profondeur (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	10	20	30	40	50	60
Cu	13,42	12,17	11,98	9,36	11,78	9,89	9,80	12,22	9,86	11,36	16,35	23,02	17,39	10,52	9,92	12,46
D_{10} (µm)	4,31	4,65	2,85	2,63	2,73	2,98	2,85	3,22	3,46	5,39	4,42	3,56	4,14	2,69	2,72	3,43
D90 (µm)	139,54	134,95	117,56	92,01	114,28	79,91	70,43	101,30	76,97	120,72	193,81	191,31	182,02	102,55	109,87	111,90
P44 (%)	50,70	50,90	67,05	75,74	68,58	73,44	76,11	63,74	70,38	45,04	47,03	43,07	47,44	71,84	72,05	60,84
P80 (%)	71,77	73,23	82,42	87,94	83,40	89,97	92,50	83,81	90,79	73,22	62,83	59,12	62,95	85,55	84,58	80,88
Stations	R2513	R2514	R2515	R2516	R2517	R2518	R2819	R25110	R25112	R3511	R3512	R3513	R3514	R3515	R3516	R3517
Profondeur (m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50	60	70
Cu	18,80	21,09	12,47	8,07	15,97	18,64	16,60	11,60	8,24	11,95	12,86	11,08	11,28	18,05	16,74	8,92
D_{10} (µm)	6,58	6,42	3,86	15,30	6,24	3,74	2,75	2,56	2,27	4,17	3,72	4,59	3,74	5,73	4,97	3,16
D90 (µm)	234,11	253,61	177,95	212,57	188,90	169,93	109,95	109,81	53,92	124,41	121,02	114,48	125,02	201,21	188,06	76,63
P44 (%)	30,01	31,08	57,43	20,97	30,52	48,97	58,60	70,40	85,59	56,69	57,07	54,26	61,18	34,08	44,46	74,92
P80 (%)	43,64	42,27	72,61	37,66	49,92	63,92	80,26	84,27	95,44	76,60	77,67	78,24	79,22	49,86	58,70	90,73
Stations	R1523	R1524	R1525	R1526	R1527	R1528	R1529	R15210	R15211	R2521	R2522	R2523	R2524	R2525	R2526	R2527
Profondeur (m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50	60	70
Cu	14,90	13,46	10,13	8,98	10,81	14,56	9,05	11,10	7,81	13,56	9,95	8,56	8,18	10,52	15,58	12,89
D_{10} (µm)	6,78	5,36	3,22	2,60	3,08	3,75	17,01	5,86	7,85	3,66	2,84	2,56	2,53	4,42	5,67	4,38
D90 (µm)	220,35	169,94	104,64	71,78	106,68	174,14	259,51	166,02	144,69	155,45	131,60	74,50	56,79	118,30	197,55	144,73
P44 (%)	35,96	43,62	69,22	79,21	68,51	54,61	18,04	46,11	45,96	56,84	71,10	79,87	83,99	57,90	40,49	51,88
P80 (%)	52,15	63,66	85,02	91,64	84,62	69,36	29,87	67,24	70,88	72,51	82,39	90,88	95,01	79,15	56,70	71,72
Stations	R3523	R3524	R3525	R3526	R3527	R3528	R3529	R35210	R35211	R1531	R1533	R1534	R1535	R1536	R1537	R1538
Profondeur (m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50	60	70
Cu	14,18	6,56	11,40	9,06	11,32	2,96	17,65	9,23	10,48	16,99	15,84	18,32	18,34	17,05	11,17	14,99
D_{10} (µm)	11,97	21,42	12,20	6,38	3,68	39,80	5,88	3,28	3,14	7,15	8,87	6,27	5,89	4,52	3,19	4,03
D90 (µm)	288,88	255,01	251,64	107,09	87,93	199,73	219,29	88,29	88,29	238,74	254,78	233,07	225,89	201,07	127,01	171,49
P44 (%)	21,28	18,14	26,04	46,13	62,24	11,90	37,67	74,21	69,52	31,60	26,09	35,70	37,17	46,32	65,76	51,35
P80 (%)	30,64	33,85	38,61	77,49	86,87	35,28	51,72	91,89	87,62	45,28	38,32	48,59	50,55	60,96	80,66	67,89
Stations	R2534	R2535	R2536	R2537	R2538	R2539	R25310	R3531	R3532	R3533	R3534	R3535	R3536	R3537	R3538	R35310
Profondeur (m)	40	50	60	70	80	90	100	10	20	30	40	50	60	70	80	100
Cu	15,86	12,37	10,42	12,86	10,33	11,80	17,55	10,21	8,44	9,65	14,47	15,34	10,45	8,32	10,14	15,54
D_{10} (µm)	3,98	3,19	2,79	3,34	2,99	2,85	8,32	3,81	4,42	3,02	3,33	6,43	4,57	5,83	5,96	3,92
D90 (µm)	190,24	170,04	101,33	155,53	82,48	145,09	255,08	120,23	88,03	121,57	185,62	217,79	139,50	102,12	153,56	147,31
P44 (%)	51,34	62,32	71,12	60,52	71,92	66,27	24,93	64,15	67,05	71,86	58,10	37,69	56,95	55,22	47,66	49,84
P80 (%)	65,86	74,06	85,58	75,04	89,31	79,01	35,88	81,86	87,89	84,34	69,77	53,21	76,93	82,63	70,63	69,40
Stations	R2547	R2548	R2849	R25410	R25411	R1518	R1819	R15110	R15111	R3819	R35110	R35111	R1521	R2529	R25210	R25211
Profondeur (m)	70	80	90	100	110	80	90	100	110	90	100	110	10	90	100	110
Cu	14,52	12,01	11,16	8,37	10,43	13,52	5,41	5,35	17,31	9,53	6,21	11,63	13,69	14,82	12,93	10,06
D_{10} (µm)	3,95	4,06	3,46	2,06	4,52	4,58	18,43	23,97	5,20	3,52	18,59	2,63	7,05	5,47	4,01	3,00
D90 (µm)	127,36	110,50	100,61	42,94	103,68	166,32	181,46	220,22	213,44	86,54	213,87	107,88	206,70	179,56	141,98	83,05
P44 (%)	50,07	56,02	64,34	90,48	57,09	49,69	23,19	18,61	42,22	69,87	21,63	70,05	36,02	40,31	54,67	72,35
P80 (%)	73,57	79,56	84,04	98,56	81,38	67,96	47,76	36,78	56,68	88,23	41,67	84,57	53,27	59,40	73,92	89,20
Stations	R15310	R15311	R2531	R2532	R2533	R3522	R1522	R2512	R2546	R1517	R3518	R2528	R1539	R35311	R3521	
Profondeur (m)	90	100	10	20	30	20	20	20	60	70	80	80	80	110	10	
Cu	13,70	11,13	11,73	16,18	11,17	19,61	12,12	14,80	10,60	18,06	8,79	13,85	9,39	7,69	16,86	
D_{10} (µm)	5,20	3,15	5,37	8,71	6,57	5,63	7,97	8,68	3,15	46,74	2,86	4,14	3,08	7,40	7,76	
D90 (µm)	167,84	109,97	135,03	255,04	149,17	230,40	208,63	237,82	99,00	228,44	59,01	158,82	97,35	112,96	247,91	
P44 (%)	45,18	66,89	45,73	26,41	39,05	37,82	35,21	26,72	68,51	33,39	81,37	52,08	72,71	47,39	29,91	
P80 (%)	63,93	83,41	70,35	38,28	63,92	50,35	53,17	40,83	85,37	46,74	95,44	70,24	86,65	76,89	42,56	

ANNEXE K DISTRIBUTION TRANSVERSALE DE D_{50} ET P_{80} DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 EST DOYON /WESTWOOD

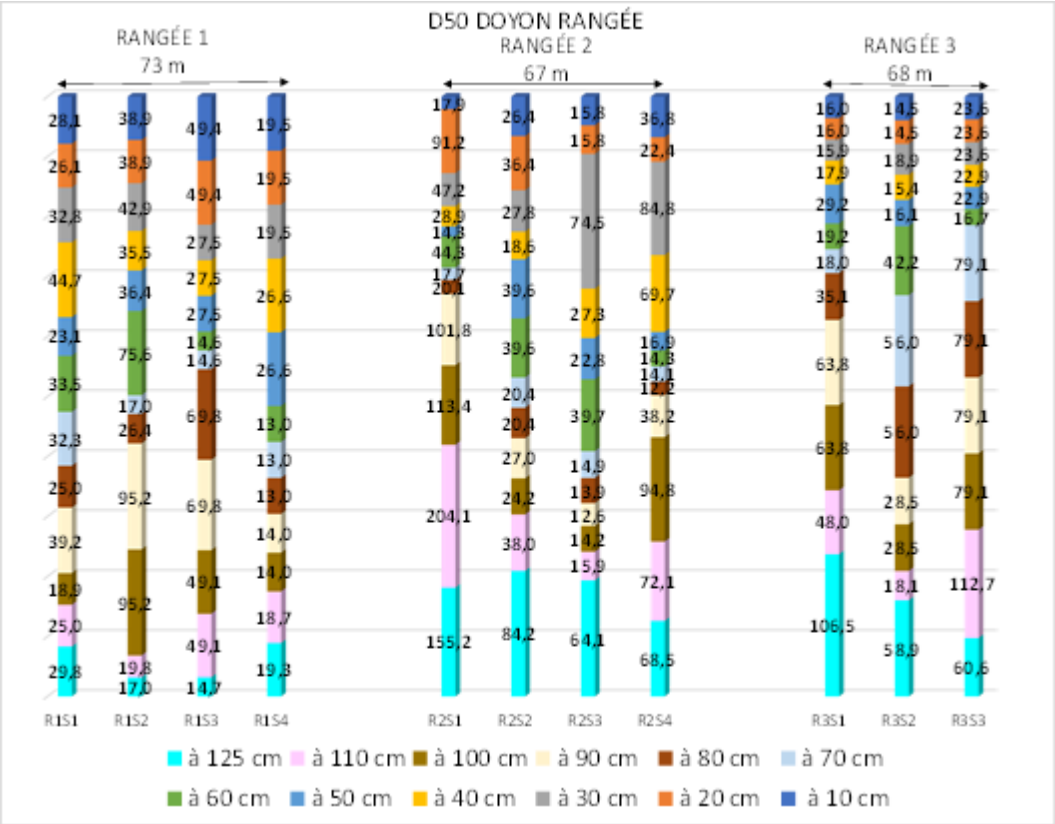


Figure A.8 Distribution transversale de D_{50} sur les rangées R1, R2 et R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

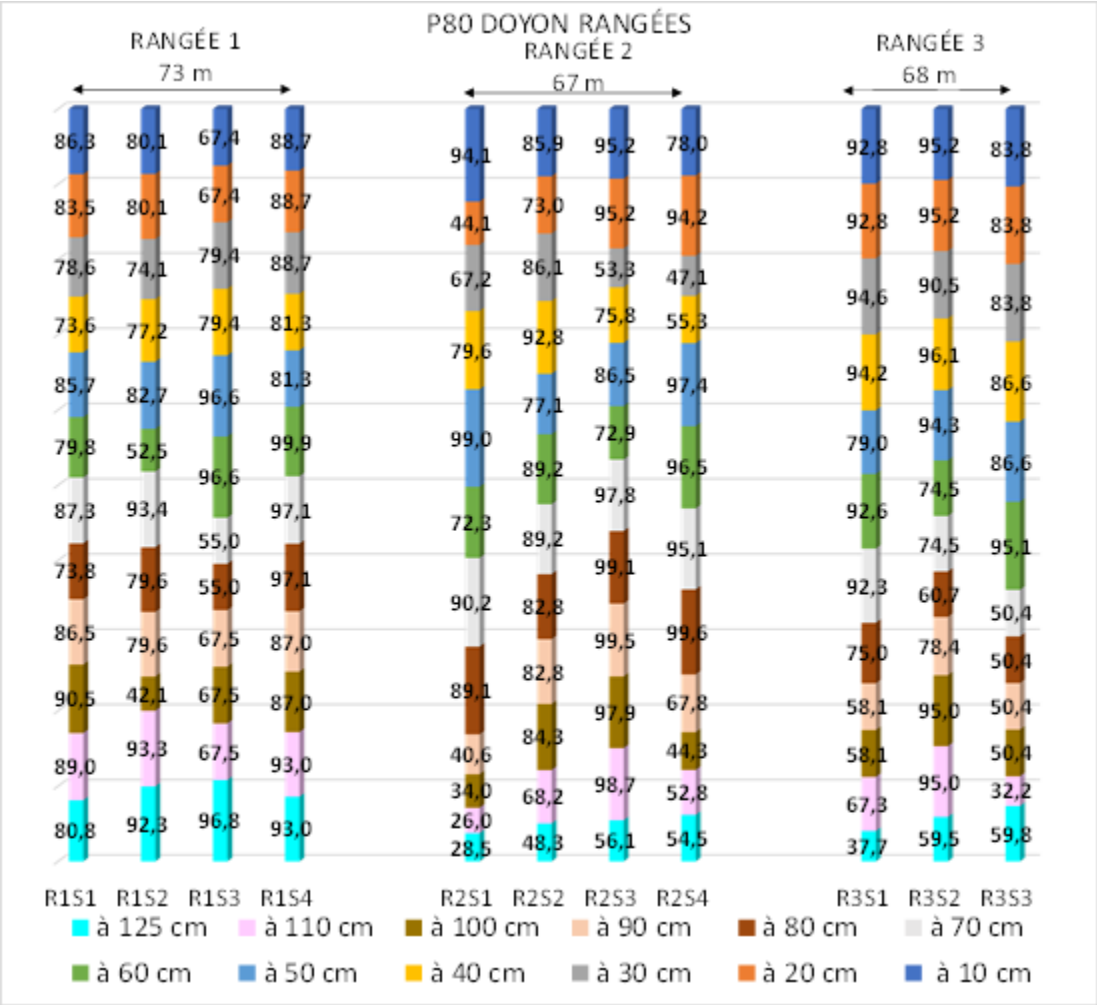


Figure A.9 Distribution transversale de P_{80} sur les rangées R1, R2 et R3 (Parc 3 Est Doyon/Westwood)

ANNEXE L POURCENTAGE MASSIQUE DES MINÉRAUX PRÉLEVÉS EN SURFACE (0-20 CM) SUR LES STATIONS DE LA RANGÉE 1 DU PARC 3 MANITOU/GOLDEX

Minéraux	R1S1	R1S2	R1S3	R1S4
Quartz	21,89	24,23	19,89	18,06
Albite	38,12	38,95	35,94	36,01
Albite Calcique	14,41	15,45	12,99	14,78
Calcite	5,95	6,39	6,45	6,63
Dolomite	0,57	0,83	0,58	0,75
Ferro-actinolite	0,22	0,69	0,38	0,47
Clinozoisite	2,07	2,26	4,01	2,61
Illite	4,44		6,66	8,82
Muscovite	5,3	3,57	5,98	4,49
Chlorite	6,48	7,14	6,63	6,68
Gypse	0,55	0,49	0,48	0,71

ANNEXE M DENSITÉS RELATIVES DES GRAINS SOLIDES DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 DU SITE MANITOU/GOLDEX

Station 1 Goldex	Profondeur (cm)	Gs	Station 2 Goldex	Profondeur (cm)	Gs	Station 3 Goldex	Profondeur (cm)	Gs	Station 4 Goldex	Profondeur (cm)	Gs
R1S111	110	2,780	R1S211	110	2,800	R1S311	110	2,814	R1S411	110	2,916
R1S110	100	2,815	R1S210	100	2,780	R1S310	90	2,767	R1S410	100	2,784
R1S19	90	2,787	R1S29	90	2,820	R1S39	80	2,765	R1S49	90	2,952
R1S18	80	2,818	R1S28	80	2,843	R1S38	70	2,770	R1S48	80	2,860
R1S17	70	2,819	R1S27	70	2,812	R1S37	60	2,768	R1S47	70	2,807
R1S16	60	2,745	R1S26	60	2,858	R1S36	50	2,856	R1S46	60	2,795
R1S15	50	2,728	R1S25	50	2,829	R1S35	40	2,790	R1S45	50	2,877
R1S14	40	2,796	R1S24	40	2,795	R1S34	30	2,866	R1S44	40	2,796
R1S13	30	2,760	R1S23	30	2,803	R1S33	20	2,790	R1S43	30	2,914
R1S12	20	2,766	R1S22	20	2,788	R1S31	10	2,808	R1S42	20	2,852
R1S11	10	2,797	R1S21	10	2,774	R2S310	110	2,804	R1S41	10	2,915
R2R112	110	2,782	R2S210	100	2,826	R2S39	100	2,749	R2S411	110	2,930
R2S211	110	2,791	R2S29	90	2,817	R2S38	90	2,808	R2S410	100	2,885
R2R110	100	2,809	R2S28	80	2,857	R2S37	80	2,782	R2S49	90	2,864
R2R19	90	2,783	R2S27	70	2,801	R2S36	70	2,812	R2S48	80	2,805
R2S18	80	2,833	R2S26	60	2,797	R2S35	60	2,850	R2S47	70	2,833
R2S17	70	2,780	R2S25	50	2,835	R2S34	50	2,805	R2S46	60	2,828
R2S16	60	2,764	R2S24	40	2,806	R2S33	40	2,831	R2S45	50	2,795
R2S15	50	2,826	R2S23	30	2,811	R2S32	30	2,873	R2S44	40	2,941
R2S14	40	2,764	R2S22	20	2,779	R2S31	20	2,815	R2S43	30	2,851
R2S13	30	2,771	R2S21	10	2,847	R3S311	110	2,826	R2S42	20	2,856
R2S12	10	2,964	R3S211	110	2,817	R3S310	100	2,859	R2S41	10	2,960
R3S111	125	2,759	R3S210	100	2,772	R3S38	90	2,849	R3S410	125	2,867
R3S110	100	2,803	R3S29	90	2,770	R3S37	80	2,780	R3S49	100	2,930
R3S19	90	2,854	R3S28	80	2,776	R3S36	70	2,796	R3S48	90	2,830
R3S18	80	2,756	R3S27	70	2,799	R3S35	60	2,819	R3S47	80	2,839
R3S17	70	2,822	R3S26	60	2,801	R3S34	50	2,801	R3S46	70	2,892
R3S16	60	2,927	R3S25	50	2,808	R3S33	40	2,774	R3S45	60	2,867
R3S15	50	2,884	R3S24	40	2,800	R3S32	20	2,801	R3S44	50	2,867
R3S14	40	2,868	R3S23	30	2,819	R3S31	10	2,826	R3S43	40	2,831
R3S13	30	2,695	R3S22	20	2,807	R3S11	10	2,903	R3S42	30	2,894
R3S12	20	2,742	R3S21	10	2,790				R3S41	20	2,801

ANNEXE N DISTRIBUTION TRANSVERSALE DES DENSITÉS RELATIVES DES GRAINS SOLIDES DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 DU SITE MANITOU/GOLDEX

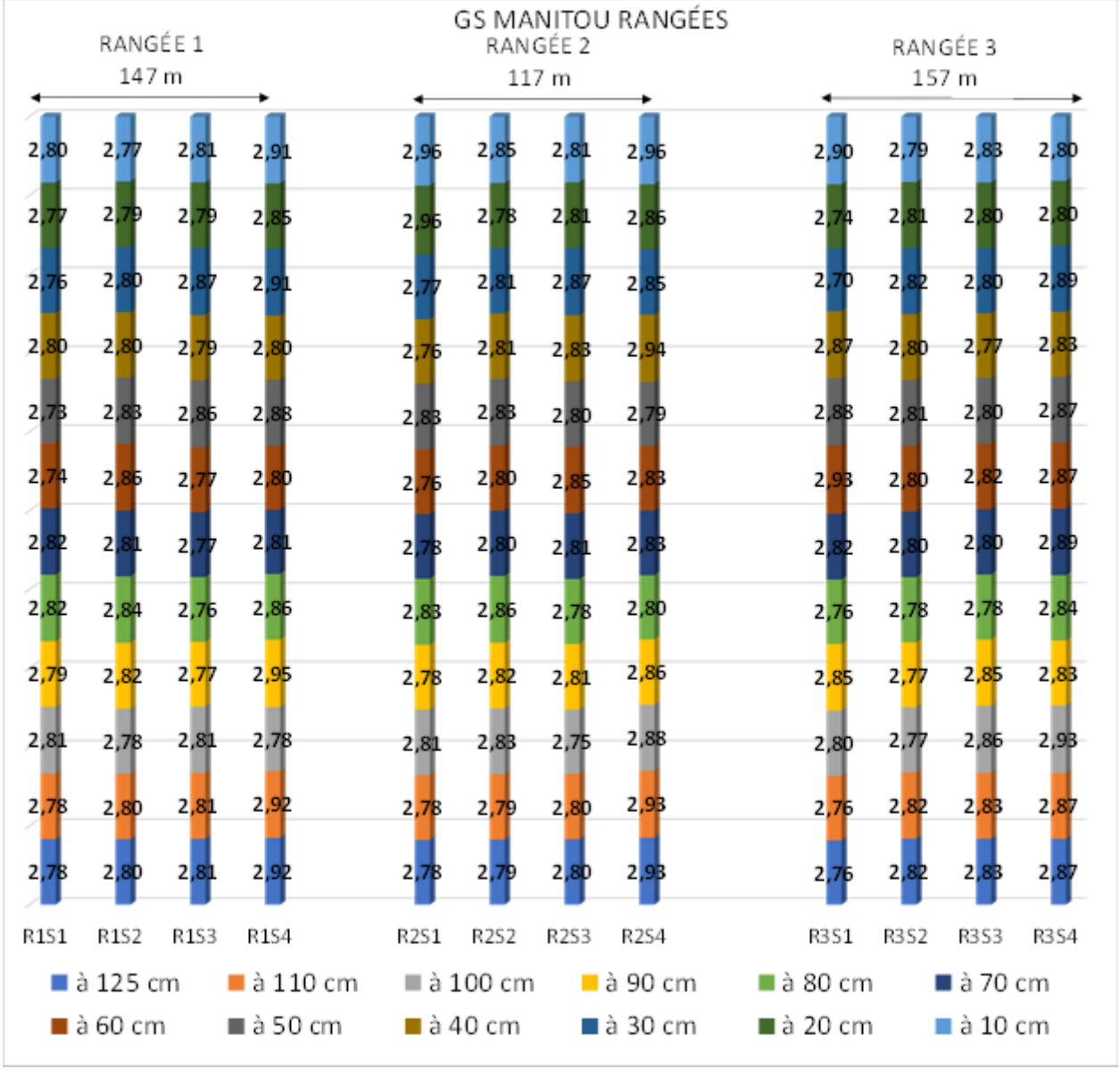


Figure A.10 Distribution transversale de Gs sur toutes les profondeurs pour toutes les stations des rangées R1, R2 et R3 (Parc 3 Manitou/Goldex)

ANNEXE O PARAMÈTRES C_U, D_{10}, D_{90}, P_{44}, ET P_{80} DES RÉSIDUS SUR LES STATIONS (MANITOU/GOLDEX)

Stations	R1S41	R1S42	R1S43	R1S44	R1S45	R1S46	R1S47	R1S48	R1849	R1S410	R1S411	R2S41	R2S42	R2S43	R2S44	R2S45
Profondeur (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50
Cu	9,35	19,22	15,00	13,34	14,58	16,94	5,70	19,25	7,33	9,94	16,94	10,01	11,65	8,70	17,16	12,46
D_{10} (µm)	2,59	6,60	4,01	3,74	3,65	7,89	17,78	4,75	2,09	1,95	3,20	3,34	3,51	2,50	7,02	3,30
D90 (µm)	74,46	238,92	190,50	154,84	153,27	243,47	195,67	198,22	59,92	68,13	148,76	89,64	98,37	67,07	237,77	148,11
P44 (%)	77,92	31,95	52,29	56,35	54,39	27,28	24,29	40,38	84,98	81,18	54,23	69,03	80,62	80,62	30,37	61,73
P80 (%)	91,06	43,95	66,96	73,17	72,21	40,32	47,85	55,51	93,64	92,27	71,76	87,40	83,98	92,77	44,66	76,83
Stations	R3S41	R3S42	R3S43	R3S44	R3S45	R3S46	R3S47	R3S48	R3849	R3S410	R1S11	R1S12	R1S13	R1S14	R1S15	R1S16
Profondeur (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	10	20	30	40	50	60
Cu	13,42	12,17	11,98	9,36	11,78	9,89	9,80	12,22	9,86	11,36	16,35	23,02	17,39	10,52	9,92	12,46
D_{10} (µm)	4,31	4,65	2,85	2,63	2,73	2,93	2,85	3,22	3,46	5,39	4,42	3,56	4,14	2,69	2,72	3,43
D90 (µm)	139,54	134,95	117,56	92,01	114,28	79,91	70,43	101,30	76,97	120,72	193,81	191,31	182,02	102,55	109,87	111,90
P44 (%)	50,70	50,90	67,05	75,74	68,58	73,44	76,11	63,74	70,38	45,04	47,03	43,07	47,44	71,84	72,05	60,84
P80 (%)	71,77	73,23	82,42	87,94	83,40	89,97	92,50	83,81	90,79	73,22	62,83	59,12	62,95	85,55	84,58	80,88
Stations	R2S13	R2S14	R2S15	R2S16	R2S17	R2S18	R2819	R2S110	R2S112	R3S11	R3S12	R3S13	R3S14	R3S15	R3S16	R3S17
Profondeur (m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50	60	70
Cu	18,80	21,09	12,47	8,07	15,97	18,64	16,60	11,60	8,24	11,95	12,86	11,08	11,28	18,05	16,74	8,92
D_{10} (µm)	6,58	6,42	3,86	15,30	6,24	3,74	2,75	2,56	2,27	4,17	3,72	4,59	3,74	5,73	4,97	3,16
D90 (µm)	234,11	253,61	177,95	212,57	188,90	169,93	109,95	109,81	53,92	124,41	121,02	114,48	125,02	201,21	188,06	76,63
P44 (%)	30,01	31,08	57,43	20,97	30,52	48,97	58,60	70,40	85,59	55,69	57,07	54,26	61,18	34,08	44,46	74,92
P80 (%)	43,64	42,27	72,61	37,66	49,92	63,92	80,26	84,27	95,44	76,60	77,67	78,24	79,22	49,86	58,70	90,73
Stations	R1S23	R1S24	R1S25	R1S26	R1S27	R1S28	R1S29	R1S210	R1S211	R2S21	R2S22	R2S23	R2S24	R2S25	R2S26	R2S27
Profondeur (m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50	60	70
Cu	14,90	13,46	10,13	8,98	10,81	14,56	9,05	11,10	7,81	13,56	9,95	8,56	8,18	10,52	15,58	12,89
D_{10} (µm)	6,78	5,36	3,22	2,60	3,08	3,75	17,01	5,86	7,85	3,66	2,84	2,56	2,53	4,42	5,67	4,38
D90 (µm)	220,35	169,94	104,64	71,78	106,68	174,14	259,51	166,02	144,69	155,45	131,60	74,50	56,79	118,30	197,55	144,73
P44 (%)	35,96	43,62	69,22	79,21	68,51	54,61	18,04	46,11	45,96	56,84	71,10	79,87	83,99	57,90	40,49	51,88
P80 (%)	52,15	63,66	85,02	91,64	84,62	69,36	29,87	67,24	70,88	72,51	82,39	90,88	95,01	79,15	56,70	71,72
Stations	R3S23	R3S24	R3S25	R3S26	R3S27	R3S28	R3S29	R3S210	R3S211	R1S31	R1S33	R1S34	R1S35	R1S36	R1S37	R1S38
Profondeur (m)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	10	20	30	40	50	60	70
Cu	14,18	6,56	11,40	9,06	11,32	2,96	17,65	9,23	10,48	16,99	15,84	18,32	18,34	17,05	11,17	14,99
D_{10} (µm)	11,97	21,42	12,20	6,38	3,68	39,80	5,88	3,28	3,14	7,15	8,87	6,27	5,89	4,52	3,19	4,03
D90 (µm)	288,88	255,01	251,64	107,09	87,93	199,73	219,29	88,29	88,29	238,74	254,78	233,07	225,89	201,07	127,01	171,49
P44 (%)	21,28	18,14	26,04	46,13	62,24	11,90	37,67	74,21	69,52	31,60	26,09	35,70	37,17	46,32	65,76	51,35
P80 (%)	30,64	33,85	38,61	77,49	86,87	35,28	51,72	91,89	87,62	45,28	38,32	48,59	50,55	60,96	80,66	67,89
Stations	R2S34	R2S35	R2S36	R2S37	R2S38	R2S39	R2S310	R3S31	R3S32	R3S33	R3S34	R3S35	R3S36	R3S37	R3S38	R3S310
Profondeur (m)	40	50	60	70	80	90	100	10	20	30	40	50	60	70	80	100
Cu	15,86	12,37	10,42	12,86	10,33	11,80	17,55	10,21	8,44	9,65	14,47	15,34	10,45	8,32	10,14	15,54
D_{10} (µm)	3,98	3,19	2,79	3,34	2,99	2,85	8,32	3,81	4,42	3,02	3,33	6,43	4,57	5,83	5,96	3,92
D90 (µm)	190,24	170,04	101,33	155,53	82,48	145,09	255,08	120,23	88,03	121,57	185,62	217,79	139,50	102,12	153,56	147,31
P44 (%)	51,34	62,32	71,12	60,52	71,92	66,27	24,93	64,15	67,05	71,86	58,10	37,69	56,95	55,22	47,66	49,84
P80 (%)	65,86	74,06	85,58	75,04	89,31	79,01	35,88	81,86	87,89	84,34	69,77	53,21	76,93	82,63	70,63	69,40
Stations	R2S47	R2S48	R2849	R2S410	R2S411	R1S18	R1819	R1S110	R1S111	R3819	R3S110	R3S111	R1S21	R2S29	R2S210	R2S211
Profondeur (m)	70	80	90	100	110	80	90	100	110	90	100	110	10	90	100	110
Cu	14,52	12,01	11,16	8,37	10,43	13,52	5,41	5,35	17,31	9,53	6,21	11,63	13,69	14,82	12,93	10,06
D_{10} (µm)	3,95	4,06	3,46	2,06	4,52	4,58	18,43	23,97	5,20	3,52	18,59	2,63	7,05	5,47	4,01	3,00
D90 (µm)	127,36	110,50	100,61	42,94	103,68	166,32	181,46	220,22	213,44	86,54	213,87	107,88	206,70	179,56	141,98	83,05
P44 (%)	50,07	56,02	64,34	90,48	57,09	49,69	23,19	18,61	42,22	69,87	21,63	70,05	36,02	40,31	54,67	72,35
P80 (%)	73,57	79,56	84,04	98,56	81,38	67,96	47,76	36,78	56,68	88,23	41,67	84,57	53,27	59,40	73,92	89,20
Stations	R1S310	R1S311	R2S31	R2S32	R2S33	R3S22	R1S22	R2S12	R2S46	R1S17	R3S18	R2S28	R1S39	R3S311	R3S21	
Profondeur (m)	90	100	10	20	30	20	20	20	60	70	80	80	80	110	10	
Cu	13,70	11,13	11,73	16,18	11,17	19,61	12,12	14,80	10,60	18,06	8,79	13,85	9,39	7,69	16,86	
D_{10} (µm)	5,20	3,15	5,37	8,71	6,57	5,63	7,97	8,68	3,15	46,74	2,86	4,14	3,03	7,40	7,76	
D90 (µm)	167,84	109,97	135,03	255,04	149,17	230,40	208,63	237,82	99,00	228,44	59,01	158,82	97,35	112,96	247,91	
P44 (%)	45,18	66,89	45,73	26,41	39,05	37,82	35,21	26,72	68,51	33,39	81,37	52,08	72,71	47,39	29,91	
P80 (%)	63,93	83,41	70,35	38,28	63,92	50,35	53,17	40,83	85,37	46,74	95,44	70,24	86,65	76,89	42,56	

ANNEXE P DISTRIBUTION TRANSVERSALE DE D_{50} ET P_{80} DES RÉSIDUS DES STATIONS DU PARC 3 MANITOU/GOLDEX

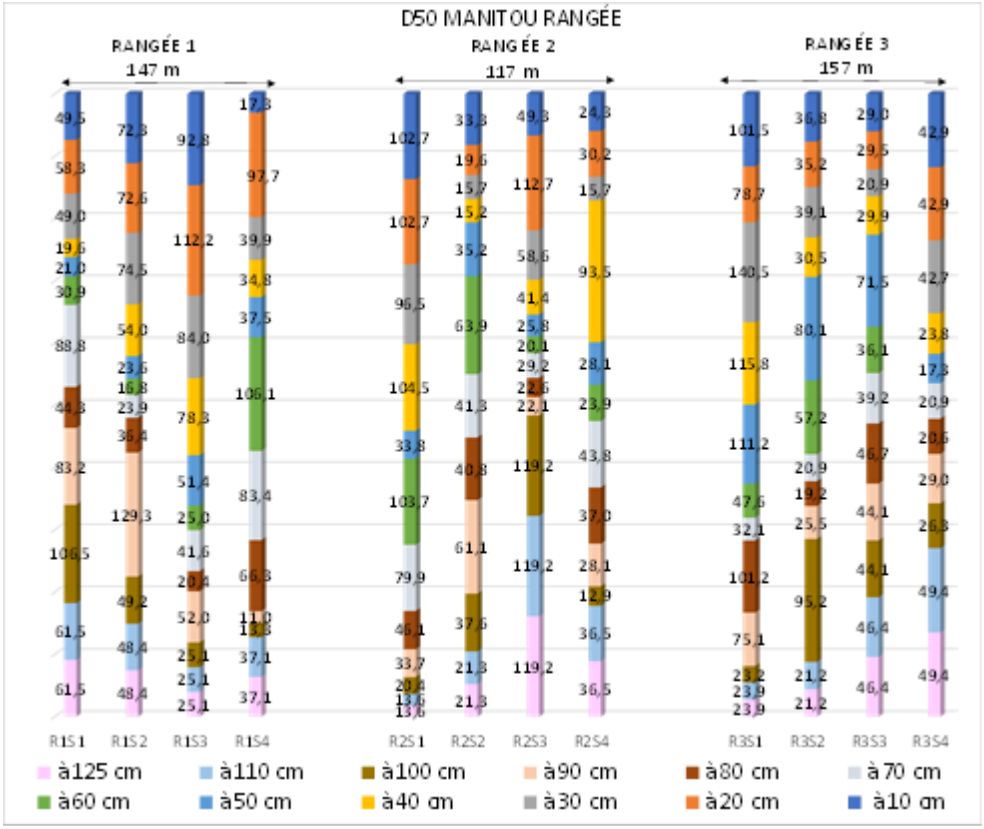


Figure A.11 Distribution transversale de D_{50} sur les rangées R1, R2 et R3 (Parc 3 Manitou/Goldex)

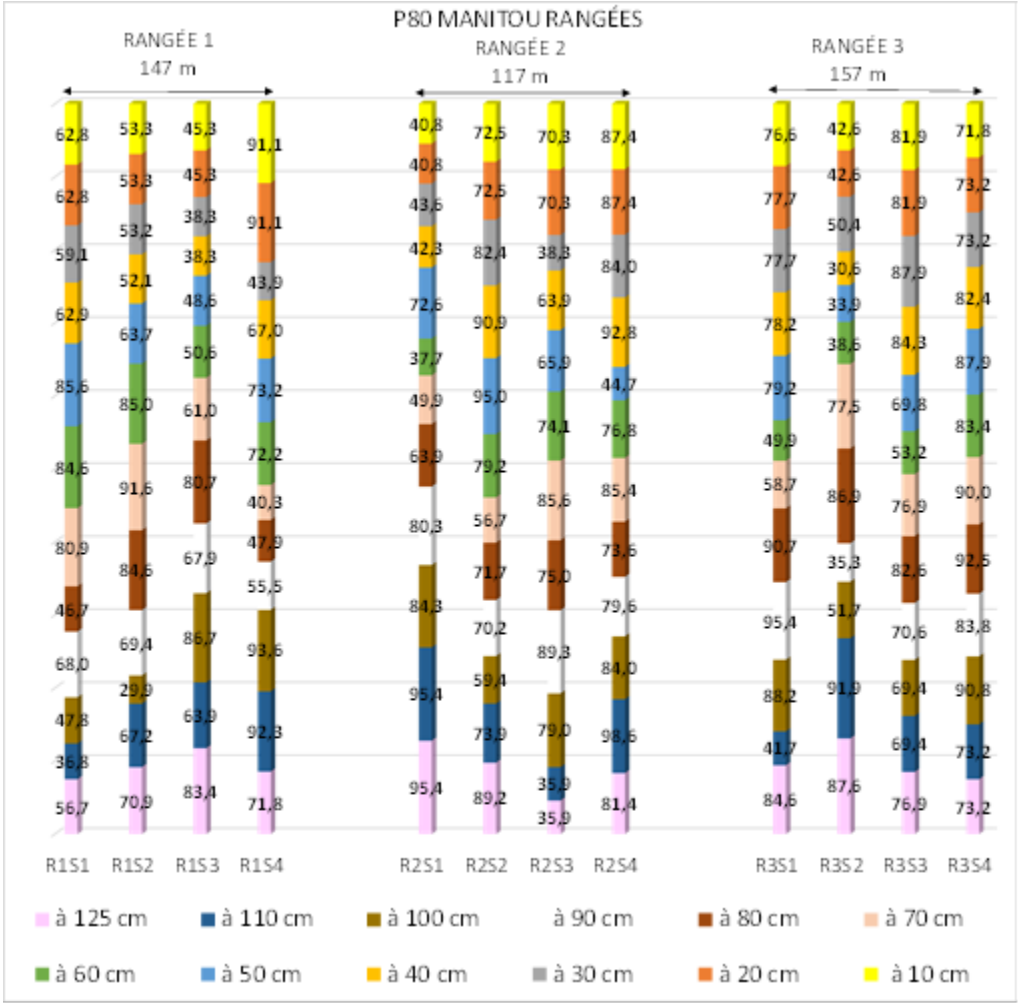


Figure A.12 Distribution transversale de P_{80} sur les rangées 1, 2 et 3 (Parc 3 Manitou/Goldex)