UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

UNITÉ D'ENSEIGNEMENT EN SCIENCES DE LA TERRE

ANALYSE DES DONNÉES ET DES INCERTITUDES SUR LES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ARGILE SENSIBLE DANS LA RÉGION DU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN

par Amande Sanou

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences appliquées (M. Sc. A) en Maîtrise en géologie et génie géologique (profil géotechnique)

Québec, Canada

© Amande Sanou, 2020

RÉSUMÉ

La présence des argiles dites sensibles est l'une des causes majeures de certains phénomènes tels que les glissements de terrain, la réduction de la capacité portante d'un sol, les coulées de boues, etc. Le dimensionnement géotechnique pour assurer la stabilité d'un ouvrage requiert une évaluation adéquate des paramètres physiques et mécaniques des matériaux en place. Des données de paramètres physiques et mécaniques de l'argile marine, recueillies sur différentes localités de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ), ont été utilisées afin d'estimer de façon représentative ces paramètres géotechniques indispensables dans les calculs de dimensionnement. Les paramètres géotechniques étudiés concernent la masse volumique, la densité des grains, la teneur en eau, l'indice des vides et les limites d'Atterberg, la sensibilité au remaniement, la résistance de l'échantillon remanié et non remanié, la contrainte de préconsolidation, le coefficient de surconcolidation, le nombre de coups (essai de pénétration standard), la résistance de pointe et la résistance au frottement latéral du cône (essai de pénétration au cône). L'idée est de pouvoir quantifier chacun des paramètres géotechniques étudiés grâce à l'écart-type. L'estimation de cette incertitude des paramètres géotechniques requiert d'abord un traitement de valeurs aberrantes présentent parmi les données. Aussi, des tests d'adéquations ont permis d'attribuer à chaque paramètre physique et mécanique de l'argile, une loi de distribution convenable pour leur analyse descriptive. La présence des valeurs aberrantes ne joue pas uniquement sur la détermination des incertitudes mais aussi sur les corrélations.

Les données disponibles ont également permis d'observer des corrélations entre les paramètres géotechniques étudiés pour d'autres types de sol en plus de l'argile marine. Pour certaines localités il existe une concordance entre certaines corrélations observées dans cette étude et celles observées dans des études antérieures concernant l'argile marine de l'est Canada et de la Scandinavie. Cependant toutes les corrélations dans la littérature se rapportant à l'argile marine ne coïncident pas avec celles observée dans cette étude. Des relations sont donc proposées grâce aux corrélations, pour l'évaluation des paramètres géotechniques dans la région du SLSJ. Les méthodes appliquées pour le traitement de valeurs aberrantes ont joué un rôle important dans l'exploration des données de la région, elles ont également aidé à apprécier l'influence des valeurs aberrantes sur les différents types de régression étudiées.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉii

TABLE DES MATIÈRES iv

LISTE DES TABLEAUX vii

LISTE DES FIGURES viii

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES xvii

REMERCIEMENTS xix

1. CHAPITRE 1 : INTRODUCTION 1
1.1. Problématique 1
1.2. Objectifs 5
1.3. Caractérisation de la zone d'étude 6
1.4. Méthodologie 9
1.4.1. Détermination des incertitudes 11
1.4.1.1. Traitement de valeurs aberrantes 13
1.4.1.2. Réalisation de test d'adéquation : la méthode Kolmogorov-Smirnov 16
1.4.2. Détermination des corrélations 19

2. CHAPITRE 2 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE 21
2.1. Introduction 21
2.2. Valeurs aberrantes et incertitudes 21
2.3. Paramètres statistiques 25
2.4. Quelques corrélations entre les paramètres physiques et mécaniques des sols 25
2.5. Comparaison entre des argiles sensibles de régions différentes .. 29

3. CHAPITRE 3 : DÉTERMINATION DES INCERTITUDES SUR LES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DE LA RÉGION DU SLSJ 32
3.1. Introduction 32
3.2. Traitement des valeurs aberrantes 32
3.3. Détermination des incertitudes à l'issu du test d'adéquation 36
3.3.1. Résultats pour les paramètres physiques 36

3.3.1.1. Indice de liquidité pour l'argile, illustration de la méthode utilisée et résultats 36
3.3.1.2. La teneur en eau 40
3.3.1.3. La limite liquidité 42
3.3.1.4. La limite de plasticité 43
3.3.1.5. L'indice de plasticité 45
3.3.1.6. L'indice des vides et la porosité 47
3.3.1.7. La densité des grains 52
3.3.1.8. La masse volumique 54
3.3.2. Résultats pour les paramètres mécaniques 57
3.3.2.1. La résistance de pointe, Q_c, et la résistance au frottement latéral, f_s 58
3.3.2.2. Nombre de coups, N 61
3.3.2.3. La contrainte de pré consolidation 64
3.3.2.4. Le coefficient de sur consolidation 65
3.3.2.5. Résistances au cisaillement et sensibilité 68
3.3.2.6. Essai de compression uni axiale 74
3.3.3. Incertitudes de paramètres géotechniques dans la région Saguenay-Lac-Saint-Jean 76

4. CHAPITRE 4 : DÉTERMINATION DES CORRÉLATION 79
4.1. Introduction 79
4.2. Détermination des corrélations entre les paramètres géotechniques 80
4.2.1. Corrélations entre paramètres physiques 80
4.2.1.1. Corrélation entre la masse volumique sèche (ρ_d) et la teneur en eau (W) 81
4.2.1.2. Corrélations entre l'indice de plasticité (I_P) et la limite de liquidité (W_L) 82
4.2.1.3. Corrélations entre la teneur en eau (W) et la limite de liquidité (W_L) 86
4.2.2. Corrélations entre paramètres mécaniques 90
4.2.2.1. Relation entre la résistance au cisaillement (S_u) mesurée au scissomètre de chantier et la contrainte de préconsolidation (σ'p) 90

4.2.2.2. Corrélation entre la sensibilité (S_t) mesurée au scissomètre de chantier et la contrainte de préconsolidation (σ'p)..... 97

4.2.2.3. Corrélation entre la sensibilité (S_t) et la résistance au cisaillement (S_u) mesurées au scissomètre de chantier .. 100

4.2.2.4. Corrélation entre la sensibilité (S_t) et la résistance au cisaillement pour échantillon remanié (S_{urc}) mesurées au cône suédois 103

4.2.2.5. Corrélations entre la résistance au cisaillement pour échantillon intact (S_u) et la résistance au cisaillement pour échantillon remanié (S_{ur}) mesurées au cône suédois 104

4.2.3. Corrélations entre paramètres mécaniques et physiques..... 106

4.2.3.1. Corrélations entre la sensibilité (S_t) et l'indice de liquidité (I_L) 106

4.2.3.2. Corrélations entre la résistance de cisaillement pour échantillon intact (S_u) et la teneur en eau (W) 114

4.2.4. Sommaire des corrélations entre les paramètres géotechniques 116

4.3. Détermination des corrélations entre la profondeur et les paramètres géotechniques 119

4.3.1. Corrélations entre la profondeur et les paramètres physiques 119

4.3.1.1. Corrélations entre la profondeur et la teneur en eau naturelle (W) 119

4.3.1.2. Corrélations entre la profondeur, la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_p) et l'indice de plasticité (I_P)..... 121

4.3.1.3. Relation entre le poids volumique (γ) et la profondeur .. 127

4.3.2. Corrélations entre la profondeur et les paramètres mécaniques 128

4.3.2.1. Corrélation entre la profondeur, la contrainte de préconsolidation et la résistance au cisaillement..... 128

4.3.2.2. Corrélation entre la profondeur et le nombre de coups (N) 133

4.3.3. Sommaire des corrélations entre les paramètres géotechniques et la profondeur 134

4.4. Influence des valeurs aberrantes sur les corrélations 137

5. CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET CONCLUSION 145

5.1. Discussion 145
5.2. Conclusion 147

RÉFÉRENCES 149

ANNEXES 155
ANNEXES A 155
ANNEXE B 157
ANNEXE C 166

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Localités étudiées et nombre de points pour lesquels les données géotechniques recueillies en fonction des sources 7

Tableau 1-2: Calcul de la valeur critique pour un échantillon, n >80, test de Kolmogorov-Smirnov (Massey,1951) 17

Tableau 2-1: Utilité des paramètres estimés pour l'étude 25

Tableau 3-1 : Seuils et valeurs aberrantes détectées par la méthode de la boîte de moustaches et la méthode de Doerffel 35

Tableau 3-2: Incertitudes des paramètres physiques 78

Tableau 3-3: Incertitudes des paramètres mécaniques 78

Tableau 4-1 : Valeurs initiales de la teneur en eau, limite de liquidité, indice de liquidité en fonction des localités pour les échantillons d'argile (Données du PACES et d'essais laboratoires effectués à l'UQAC) 87

Tableau 4-2: Coefficients de corrélation et équations empiriques des régressions linéaires et non linéaires pour les paramètres géotechniques (Données du PACE et d'essais laboratoires effectués à l'UQAC) 117

Tableau 4-3 : Coefficients de corrélation et équations empiriques des régressions linéaires et non linéaires pour les paramètres géotechniques et la profondeur (Données du PACES et d'essais laboratoires effectués à l'UQAC) 135

Tableau 4-4 : Influence des valeurs aberrantes sur des équations et coefficients de quelques régressions 139

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Emplacement des localités étudiées dans les sédiments marins 7
Figure 1-2 : Sommaire des formations du quaternaire (tiré de Lasalle et Tremblay,1978; modifié par CERM-PACES, 2013a) 9
Figure 1-3 : Schéma de la méthodologie 10
Figure 1-4 : Diagramme de Doerffel (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997) 16
Figure 1-5: Procédure utilisée pour la détermination des incertitudes d'un paramètre géotechnique 19
Figure 2-1: Illustration de valeurs extrême (VE), supérieure (VS), contaminante (CTM) et aberrante (VA) à l'aide deux distributions quelconques F et G (Planchon, 2005) 23
Figure 2-2: Relation entre la teneur en eau naturelle et l'élévation (Bouchard et al., 1983) 26
Figure 2-3: Relation entre la contrainte de préconsolidation et l'élévation 28
Figure 2-4: Relation entre l'indice de liquidité (I_{LC})et la résistance remaniée (C_{ur}). 29
Figure 2-5: Relation entre l'indice de plasticité (I_P) et la limite de liquidité (W_L) pour des échantillons d'argiles de localités différentes (Windisch et Yong, 1990) 30
Figure 3-1:Schéma de la première partie de la méthodologie (Détermination des incertitudes) 32
Figure 3-2: Histogrammes des données de l'indice de liquidité 39
Figure 3-3: Histogrammes des données de l'indice de la teneur en eau naturelle. 41
Figure 3-4: Histogrammes des données de la limite de liquidité 43
Figure 3-5: Histogrammes des données de la limite de plasticité 45

Figure 3-6: Histogrammes des données de l'indice de plasticité 47
Figure 3-7: Histogrammes des données de l'indice des vides mesurées par essai de densité 49
Figure 3-8: Histogrammes des données de l'indice des vides mesurées par essai de consolidation œdométrique 50
Figure 3-9: Histogrammes des données de la porosité mesurées par essai de densité 51
Figure 3-10: Histogrammes des données de la porosité mesurées par essai de consolidation œdométrique 51
Figure 3-11: Histogrammes des données de la densité des grains mesurées par essai de densité 53
Figure 3-12: Histogrammes des données de la densité des grains mesurées par essai de consolidation œdométrique 54
Figure 3-13: Histogrammes des données de la masse volumique mesurées par essai de densité 56
Figure 3-14: Histogrammes des données de la masse volumique mesurées par essai de consolidation œdométrique 57
Figure 3-15: Histogrammes des données de la résistance de pointe mesurées par essai CPT 60
Figure 3-16: Histogrammes des données de la résistance aux frottements mesurées par essai CPT 61
Figure 3-17: Histogrammes des données du nombre de coups mesurées par essai SPT 63
Figure 3-18: Histogrammes de données de la contrainte de préconsolidation 65
Figure 3-19: Histogrammes des données du coefficient de surconsolidation 67
Figure 3-20: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon intact mesurées au scissomètre de chantier 69

Figure 3-21: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon intact mesurées au cône suédois 70
Figure 3-22: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon remanié mesurées au scissomètre de chantier 71
Figure 3-23: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon remanié mesurées au cône suédois 72
Figure 3-24: Histogrammes des données de la sensibilité mesurées au scissomètre de chantier 73
Figure 3-25: Histogrammes des données de la sensibilité mesurées au cône suédois 74
Figure 3-26: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement mesurées par essai de compression uniaxiale 76
Figure 4-1: Schéma de la deuxième partie de la méthodologie (détermination des corrélations) 80
Figure 4-2: Relation linéaire entre la masse volumique sèche et la teneur en eau pour des échantillons d'argile 81
Figure 4-3 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons d'argile 83
Figure 4-4 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons d'argile dans plusieurs localités 83
Figure 4-5 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt 84
Figure 4-6 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons de silt 84
Figure 4-7 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons de silt et de sable 85

Figure 4-8 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons de sable 85
Figure 4-9 : Relation linéaire la teneur en eau naturelle avec celles de la limite de liquidité pour des échantillons d'argile suédoises et finoises (D'Ignazio et al, 2016) 88
Figure 4-10: Comparaison des valeurs de la teneur en eau avec celles de la limite de liquidité pour des échantillons d'argile excluant La Baie et Canton-Tremblay .. 88
Figure 4-11: Comparaison des valeurs de la teneur en eau naturelle avec celles de la limite de liquidité pour des échantillons d'argile (localités inconnues seules) ... 89
Figure 4-12: Relation linéaire entre la teneur en eau et la limite de liquidité pour des échantillons de silt (plusieurs localités) 89
Figure 4-13: Relation linéaire entre la teneur en eau et la limite de liquidité pour des échantillons de silt..... 90
Figure 4-14 : Relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de consolidation (Windisch et Yong, 1990) 92
Figure 4-15 : Relation linéaire entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt..... 93
Figure 4-16 : Comparaison de la relation linéaire entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt avec celle issue d'échantillons d'argile marine de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990) 94
Figure 4-17 : Relation non linéaire quadratique entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités..... 94
Figure 4-18 : Relation non linéaire cubique entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités..... 95

Figure 4-19 : Comparaison de la relation linéaire entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt avec celle issue d'échantillons d'argile marine de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990) 95
Figure 4-20 : Comparaison de la relation linéaire entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt pour une localité avec celle issue d'échantillons d'argile marine de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990) 96
Figure 4-21 : Relation non linéaire cubique entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt 96
Figure 4-22 : Relation non linéaire cubique entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt pour plusieurs localités 97
Figure 4-23 : Relation linéaire entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt 99
Figure 4-24 : Relation non linéaire quadratique entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt..... 99
Figure 4-25 : Relation non linéaire cubique entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt..... 100
Figure 4-26 : Relation linéaire entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt (Chicoutimi) 101
Figure 4-27 : Relation non linéaire quadratique entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt (Chicoutimi)..... 102
Figure 4-28 : Relation non linéaire cubique entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt (Chicoutimi)..... 102

Figure 4-29:Relation non linéaire (fonction puissance) entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié (essai au cône suédois) 104
Figure 4-30 : Relations linéaire et non linéaire (fonction puissance) entre la résistance au cisaillement et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié pour des localités inconnues (essai au cône suédois) 105
Figure 4-31 : Relation non linéaire quadratique entre la résistance au cisaillement et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié pour des localités inconnues (essai au cône suédois) 105
Figure 4-32: Relation non linéaire cubique entre la résistance au cisaillement et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié pour des localités inconnues (essai au cône suédois) 106
Figure 4-33 : Régression linéaire - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités 109
Figure 4-34 : Régression non linéaire quadratique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités 110
Figure 4-35 : Régression non linéaire cubique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités 110
Figure 4-36 : Régression non linéaire cubique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt 111
Figure 4-37: Régression non linéaire quadratique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt 111
Figure 4-38 : Régression linéaire - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt 112
Figure 4-39 : Régression linéaire - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt dans plusieurs localités 112

Figure 4-40 : Régression non linéaire cubique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt dans plusieurs localités..... 113
Figure 4-41 : Régression non linéaire quadratique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt dans plusieurs localités..... 113
Figure 4-42 : Régressions (fonction puissance) – Comparaison de la sensibilité vs l'indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités avec relations de la revue de littérature 114
Figure 4-43: Relation linéaire entre la résistance au cisaillement et la teneur en eau naturelle pour la localité de Chicoutimi (échantillons d'argile et de silt) 115
Figure 4-44 : Relation non linéaire cubique entre la résistance au cisaillement et la teneur en eau naturelle pour la localité de Chicoutimi (échantillons d'argile et de silt) 116
Figure 4-45 : Relation entre la profondeur et la teneur en eau pour les données d'échantillons de sable 120
Figure 4-46:Relation entre la profondeur et la teneur en eau pour les données d'échantillons de sable dans plusieurs localités..... 120
Figure 4-47: Relation entre la profondeur et la limite de liquidité pour les données d'échantillons l'argile..... 122
Figure 4-48: Relation entre la profondeur et la limite de liquidité pour les données d'échantillons d'argile dans la localité de Canton-Tremblay..... 123
Figure 4-49:Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les données d'échantillons d'argile..... 123
Figure 4-50:Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les échantillons d'argile dans la localité de Canton-Tremblay..... 124
Figure 4-51:Relation linéaire entre la profondeur et l'indice de plasticité pour les échantillons d'argile..... 124

Figure 4-52: Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les échantillons de sable 125
Figure 4-53:Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les échantillons de sable dans plusieurs localités 125
Figure 4-54: Relation linéaire entre la profondeur et la limite de liquidité pour les échantillons de sable dans plusieurs localités 126
Figure 4-55: Relation non linéaire entre la profondeur et la limite de liquidité pour les échantillons de sable dans plusieurs localités..... 126
Figure 4-56: Relation linéaire entre la profondeur et l'indice de plasticité pour les échantillons de sable 127
Figure 4-57: Relation linéaire entre la profondeur et le poids volumique pour les échantillons de silt dans plusieurs localités..... 128
Figure 4-58 : Comparaison entre la profondeur et la contrainte de préconsolidation pour les échantillons d'argile et le silt dans plusieurs localités avec les résultats de Bouchard et al. (1983) à Jonquière 130
Figure 4-59 : Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour les échantillons d'argile intact dans la localité de Chambord..... 131
Figure 4-60: Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour les échantillons de sable intacts..... 131
Figure 4-61: Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour les échantillons de sable intacts dans la localité de La Baie 132
Figure 4-62 : Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour échantillons d'argile et de silt remaniés dans la localité de La Baie..... 133
Figure 4-63:Relation linéaire entre la profondeur et le nombre de coups pour des échantillons de sable 134
Figure 4-64: Influence des valeurs aberrantes sur la relation linéaire entre la profondeur et la teneur en eau des échantillons d'argile 141

Figure 4-65: Influence des valeurs aberrantes sur la relation non linéaire (fonction puissance) entre la profondeur et la teneur en eau (échantillons d'argile)..... 141
Figure 4-66: Influence des valeurs aberrantes sur la relation non linéaire (fonction quadratique) entre la profondeur et la teneur en eau (échantillons d'argile)..... 142
Figure 4-67:Influence des valeurs aberrantes sur la relation non linéaire (fonction cubique) entre la profondeur et la teneur en eau (échantillons d'argile) 142
Figure 4-68:Influence des valeurs aberrantes sur la corrélation non linéaire (fonction puissance) $S_{tc}(S_{urc})$ (échantillons d'argile) 143
Figure 4-69: Influence des valeurs aberrantes sur la corrélation non linéaire (quadratique) entre la profondeur et l'indice de liquidité (échantillons d'argile) 143
Figure 4-70: Influence des valeurs aberrantes sur la corrélation non linéaire (cubique), $S_{uc}(S_{urc})$ (échantillons d'argile) 144

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

ABRÉVIATIONS	***SIGNIFICATION***
VA	*Valeur aberrante*
BM	*Boîte de moustaches*
D	*Doerffel*
KS	*Kolmogorov-Smirnov*
Min	*Minimum*
Max	*Maximum*
Moy	*Moyenne*
σ	*Écart-type*
COV	*Coefficient de variation*
SPT	*Essai pressiométrique*
CPT	*Essai de pénétration au cône*
W (%)	Teneur en eau naturelle (%)
W_L *(%)*	Limite de liquidité (%)
W_P *(%)*	Limite de plasticité (%)
I_P *(%)*	Indice de plasticité (%)
I_L	Indice de liquidité
e_{0d}	Indice des vides pour essai de densité
e_{0c}	Indice des vides pour essai de consolidation œdométrique
n_d *(%)*	Porosité pour essai de densité (%)
n_c *(%)*	Porosité pour essai de consolidation œdométrique (%)
Dr densité	Densité des grains pour essai de densité
Dr consolid	Densité des grains pour essai de consolidation
ρ densité (g/cm3)	Masse volumique pour essai de densité (g/cm3)
ρconsolid (g/cm3)	Masse volumique pour essai de consolidation œdométrique (g/cm3)
ρ_d *(g/cm3)*	Masse volumique sèche (g/cm3)
ɣ (kN/m3)	Poids volumique (kN/m3)
Qc (kPa)	Résistance de pointe du cône (kPa)
fs (kPa)	Frottement latéral du cône (kPa)
N	Nombre de coups ou Pénétration standard
S_u *(kPa)*	Résistance au cisaillement pour essai de scissomètre sur échantillon intact (kPa)
S_{ur} *(kPa)*	Résistance au cisaillement pour essai de scissomètre sur échantillon remanié (kPa)
S_t	Sensibilité pour essai de scissomètre
S_{uc} *(kPa)*	Résistance au cisaillement pour essai au cône suédois sur échantillon intact
S_{urc} *(kPa)*	Résistance au cisaillement pour essai au cône suédois sur échantillon remanié
S_{tc}	Sensibilité pour essai au cône suédois
C_u *(kPa)*	Résistance au cisaillement pour essai de compression uniaxiale sur échantillon intact (kPa)
σ'p (kPa)	Contrainte de préconsolidation (kPa)
OCR	Coefficient de sur consolidation

À maman Joséphine chérie,

À Marie Clotilde Lucrece SANOU, ma sœur chérie,

Aux grandes familles KAFANDO et SANON,

À Wendtoe Yves William YOUGBARE, mon bien aimé.

REMERCIEMENTS

Ce document a été possible grâce aux nombreux soutiens et encouragements que j'ai reçus. J'aimerai en quelques lignes transmettre ma gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de mon travail de maîtrise :

À Dieu Tout-Puissant qui me fait toujours don de ses grâces. Tu es un immense soutien et une force infaillible pour moi. À chaque étape de ma vie j'ai vu ta puissante main agir et ta fidélité se manifester. Que toute la gloire te revienne au nom de Jésus Christ.
À la Très Sainte Vierge Marie ainsi qu'à tous les saints qui ne cessent d'intercéder pour moi.

À mes proches qui ne sont plus de ce monde, qui m'ont toujours encouragée. Particulièrement à vous tonton Benoît, qui aviez une grande estime envers moi.

À mes directeurs de mémoire, messieurs Ali Saeidi et Alain Rouleau qui ont eu confiance en moi, m'ont guidée et n'ont ménagé aucun effort pour que j'entame et achève ce projet. Je vous remercie infiniment de m'avoir encadrée et enseignée vos honorables compétences.

Aux professeurs chercheurs à l'UQAC et à toute leur équipe qui ont réalisé un projet du Programme d'Acquisition et de Connaissances en Eau Souterraine (PACES) sur quatre ans (2009-2013), grâce à qui j'ai obtenu les données d'échantillons du Saguenay-Lac-Saint-Jean pour cette étude.

À Shahriyar Heirdarzadeh, Hamza Es-Samti qui m'ont aidé au cours de l'élaboration de ce projet.

À madame Maryse Doucet, messieurs David Noel et Beauregard Réal, qui ont partagé avec moi leurs connaissances sur la cartographie des données ainsi que l'origine de certains échantillons.

Au groupe de recherche R2Eau qui a été un lieu d'acquisition d'idées.

À ma mère, Joséphine, et ma petite sœur, Lucrece, votre amour est le plus grand bien que je possède, toujours présentes à mes côtés. Spécialement à toi maman, battante, courageuse et bienveillante, Dieu sait la faveur que nous avons Lucrece et moi de t'avoir pour modèle. Aussi à mon père André dont les prières m'ont accompagnées.

À toute ma famille et à mon bien-aimé Yves William, vos prières, votre amour et votre attention à mon égard ont été un soutien inestimable. Spécialement, à maman Anasthasie et à mon papa Georges pour leur affection filiale. À mes secondes mères qui sont pour moi un soutien inconditionnel.

À mes amis et proches qui m'ont soutenue de près ou de loin. Merci pour votre amitié.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1. Problématique

La région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ) située au sud-est du Québec s'étend sur une superficie de 95 892,8 km^2. La géologie de la région comprend des dépôts argileux problématiques pour la stabilité des talus (glissements de terrain). Plusieurs glissements de terrain se sont produits dans la région : par exemples, la nuit du 4 au 5 mai 1971 à Saint-Jean-Vianney (Tavenas et al., 1971), le 21 juillet 2016 à la Baie (Larouche, 2016), à L'Anse-Saint-Jean le 3 mai 2018 (Larouche, 2018). Il arrive aussi que des mesures de préventions coûteuses soient prises lorsque le risque de glissement est élevé; ainsi, dans l'arrondissement de la Baie la démolition de deux logements a été nécessaire afin de placer un mur de soutènement au pied d'un talus à risque (Houle, 2017). Le glissement de terrain est un mouvement de sol gravitaire dans un talus. Il s'observe dans les sols meubles qui sont, pour la plupart des lieux d'habitations (Gouvernement du Québec, 2017). On observe cependant un type de glissement de terrain propre aux dépôts argileux, soit le glissement rétrogressif, qui est de plus grande envergure et se produit en ''quelques minutes'' (Gouvernement du Québec, 2017).

En géotechnique, les propriétés d'un sol sont des informations cruciales à prendre en compte dans les calculs, ils servent à déterminer la charge admissible que le sol porteur est capable de supporter, le tassement qui peut survenir si une charge est appliquée. Ils peuvent servir aussi à vérifier la stabilité d'un talus. Les paramètres physiques et

mécaniques permettent de classifier les sols et d'estimer le comportement des dépôts argileux. Ces paramètres géotechniques sont déterminés lors d'essais en laboratoire ou in situ parfois coûteux.

Dans le présent document, les paramètres physiques et mécaniques à étudier ont été choisis selon leur importance dans les calculs géotechniques de stabilité du talus et de fondations.

Compte tenu des éventuelles erreurs de mesure ou d'exécution qui pourraient intervenir pendant la réalisation des essais ou lors de la création de bases de données, il est possible que les valeurs de certaines données soient inexactes (Planchon, 2005). La plupart de ces valeurs se présentent sous forme de valeurs « extrêmes » d'une distribution qui sont appelées valeurs aberrantes et sont traitées selon leurs origines (Planchon, 2005). Les valeurs aberrantes sont susceptibles d'altérer la qualité des incertitudes sur une variable étudiée. Dans notre cas, les incertitudes désignent l'estimation de la variation d'un paramètre physique ou mécanique, il s'agit principalement de l'écart-type, la variance ou le coefficient de variation. La prise en compte des incertitudes permet d'obtenir une estimation adéquate des valeurs que peut prendre un paramètre (physique ou mécanique) pour un échantillon pris aléatoirement dans une population, comme les dépôts argileux d'une région. Il est conseillé dans les régions problématiques de mandater un expert pour réaliser une reconnaissance de sol avant d'entamer une construction. Cette expertise n'est pas toujours effectuée en raison de son coût élevé. Connaître les valeurs des paramètres

physiques et mécaniques, ainsi que leurs incertitudes permettra aux populations de la région d'assurer à moindre frais un niveau minimal de sécurité pour leurs infrastructures. D'autre part, ces résultats permettront de mener des études probabilistes de la stabilité des ouvrages en géotechnique.

Il existe parfois des liens intrinsèques entre les paramètres (physiques, mécaniques ou physiques et mécaniques); dans ces cas, la valeur de l'un peut servir à expliquer ou à déterminer celle de l'autre. Les liens existants entre les paramètres peuvent cependant varier d'une région à une autre. Par exemple, la relation entre le rapport de la résistance au cisaillement divisée par la contrainte effective au repos (S_u/σ'_{V0}) et la limite de liquidité (W_L) est forte pour des échantillons d'argile marine scandinave, alors que cette relation est presque inexistante pour ceux provenant de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990). Étant donné que les corrélations sont utilisées en géotechniques dans des équations d'estimation de paramètres géotechniques, il est important que ces corrélations fournissent des estimations correctes de l'existence de liens entre les paramètres géotechniques applicables sur le territoire du SLSJ.

Au cours des dernières décennies, de nombreux chercheurs ont étudié des dépôts argileux dans l'est du Canada, leur comportement et leur caractérisation, notamment Tavenas et Leroueil (1979), Bouchard et al. (1983), Locat et Loereuil (1987), Perret et al. (1995), Demers et Leroueil (2002), Leduc (2016). Certains de ces chercheurs ont observé

des similarités et des différences entre les dépôts argileux de cette région et ceux présents en Scandinavie, comme Leroueil et al. (1983); Windisch et Yong (1990).

Ces études sont importantes pour vérifier la fiabilité des formules d'équations utilisées en géotechniques, pour les dépôts argileux de la région, dans la mesure où la plupart des formules et équations de la revue de littérature géotechnique ont été obtenues par suite de travaux sur des échantillons d'argile scandinave (Windisch et Yong, 1990). D'autres ont étudié les phénomènes de glissements de terrain qui ont lieu dans les dépôts d'argile du Saguenay-Lac-Saint-Jean : La Rochelle et al. (1988); Lamontagne et Demers (2007); Quinn (2009).

En raison de la similitude de leur origine marine, les propriétés de l'argile sensible de la région SLSJ peuvent être mal homologuées à des argiles sensibles d'ailleurs, comme celles de la Scandinavie, généralement étudiées dans la littérature. En premier lieu dans cette étude, il est question de caractériser les paramètres géotechniques en tenant compte des valeurs aberrantes. Ces valeurs aberrantes résultent soient des erreurs opérées lors de la création de la base de données ou de la variabilité inhérente du paramètre géotechnique. Dans ce projet, l'étude des paramètres géotechniques passe par le traitement de valeurs aberrantes et le test d'adéquation. Le test d'adéquation permet de savoir si une distribution de données suit une loi de probabilité. Dans le cadre du dimensionnement géotechniques, certains logiciels utilisant des méthodes probabilités sollicitent les lois de probabilités convenables à l'analyse descriptive des paramètres géotechniques. Parmi les paramètres

géotechniques étudiés, il y a les paramètres physiques qui sont : la masse volumique, la densité des grains, la teneur en eau, l'indice des vides, la porosité et les limites d'Atterberg; et les paramètres mécaniques qui sont : la sensibilité au remaniement, la résistance de l'échantillon remanié et non remanié, la contrainte de préconsolidation, le coefficient de surconsolidation, le nombre de coups (essai de pénétration standard), la résistance de pointe et la résistance au frottement latéral du cône (essai de pénétration au cône). Deuxièmement il s'agit de faire ressortir les corrélations possibles entre les différents paramètres à partir des données disponibles sur l'étendue de la région. L'ensemble des résultats servira à comparer les propriétés des échantillons étudiés avec ceux de la littérature. Par la même occasion, il sera possible de vérifier la conformité des relations empiriques de la littérature avec celle l'argile marine de la région Saguenay-Lac-Saint-Jean.

1.2. Objectifs

L'objectif principal est de déterminer la distribution et les incertitudes affectant les paramètres physiques et mécaniques étudiés pour les dépôts de l'argile sensible au SLSJ, ainsi que leurs effets sur l'évaluation des propriétés géotechniques de ces dépôts. Les différents sous-objectifs visés par ce projet sont :

- Déterminer la distribution statistique des valeurs des paramètres physiques et mécaniques de l'argile sensible de la région du SLSJ (statistiques).
- Rechercher l'existence de corrélations entre les données de ces paramètres dans la région du SLSJ (méthode de régression).

- Comparer les corrélations obtenues dans notre étude avec les résultats d'autres études dans d'autres régions.

1.3. Caractérisation de la zone d'étude

Située au sud-est du Québec, la région du SLSJ compte environ 274 919 habitants et regroupe 49 municipalités en 4 municipalités régionales de comté (MRC) et 11 autres types de territoire (Gouvernement du Québec, 2015). La base de données est constituée d'un assemblage de données collectées sur différentes localités se situant dans les parties sud et sud-est des basses de cette région (Figure 1-1), il s'agit des municipalités de Chambord, Chicoutimi (dont les secteurs de Chicoutimi-Nord et Laterrière), Alma, Hébertville-Station, Jonquière (dont le secteur de Shipshaw), La Baie, Canton-Tremblay. Certaines localités n'ont pas pu être identifiées à cause d'étiquettes devenues illisibles suite au conditionnement des échantillons, toutefois ces échantillons ont été prélevés dans la région Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les données proviennent des données colligées lors du projet réalisé sur le territoire du SLSJ dans le cadre du Programme d'Acquisition de Connaissance sur les Eaux Souterraines (PACES; CERM-PACES 2013a et 2013b). Elles proviennent aussi des résultats d'essais en laboratoires effectués entre 2014 et 2017 par les étudiants de l'Université du Québec à Chicoutimi dans le cadre de travaux pratiques des cours Fondations et Mécanique des sols. L'ensemble des données recueillies représente un total de 6646 valeurs pour les paramètres physiques et mécaniques confondus (Tableau 1-1).

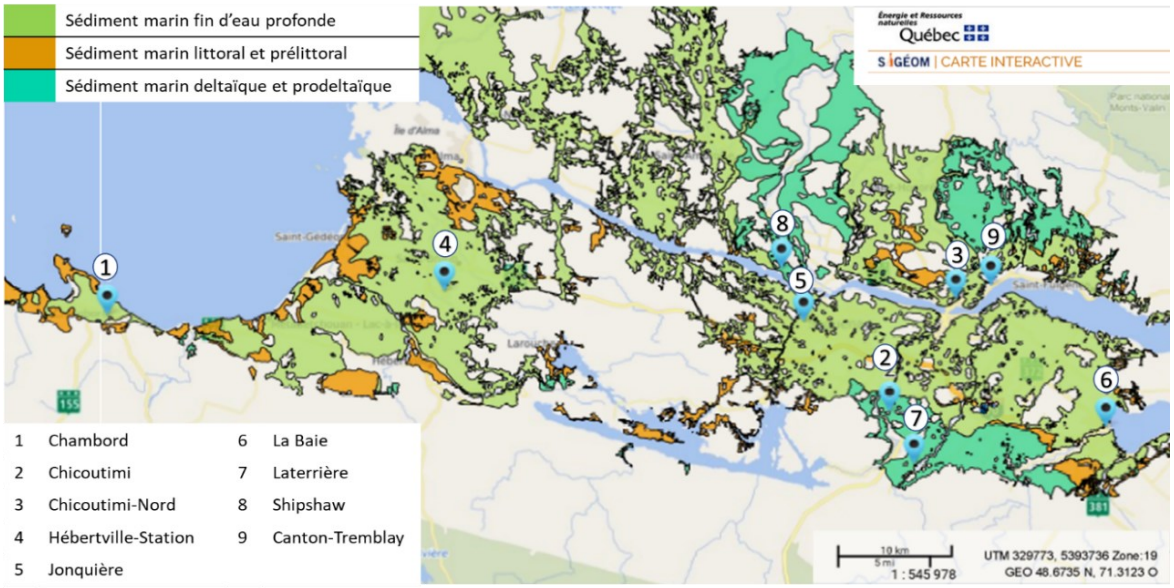


Figure 1-1: Sédiments marins observés dans les localités étudiées

Tableau 1-1: Localités étudiées et nombre de points pour lesquels les données géotechniques recueillies en fonction des sources

Localités	***Données de l'UQAC***	***Données du PACES***	***Total***
Chambord	-	11	11
Chicoutimi	25	1204	1229
Chicoutimi-Nord	17	-	17
Hébertville-Station	3	-	3
Jonquière	-	1242	1242
La Baie	-	3407	3407
La Terrière		294	294
Shipshaw	-	221	221
Canton-Tremblay	-	222	222
Total	45	6601	6646

En terme géologique, la région du SLSJ se trouve dans le Bouclier canadien, à l'intérieur de la grande province géologique du Grenville (Walter et al., 2018). Trois âges ont marqué l'histoire de la formation géologique de la région. Il s'agit, par ordre de mise

en place, de l'âge précambrien durant lequel se sont formées les roches magmatiques, l'âge paléozoïque qui a couvert la formation des roches sédimentaires et l'âge quaternaire qui correspond à la période de formation des derniers dépôts sédimentaires (CERM-PACES, 2013a). Parmi ces dépôts meubles on distingue de la moraine de fond ou till (dont certaines sont riches en silt et en argile), des argiles marines. En effet les argiles proviennent des dépôts de la mer Laflamme qui a recouvert les basses terres de la région, il y a 10.000 ans, après la fonte de la calotte glaciaire. On observe des dépôts purement argileux et d'autres dépôts avec des alternances d'argile et de sable (Tremblay, 1971a).

Deux unités physiographiques composent la région du SLSJ, les hautes terres et les basses terres (Daigneault et al., 2011). Au sein de ces basses terres, il y a deux élévations, le seuil de Kénogami (50 à 100m d'altitude) et le seuil d'Alma (200m d'altitude). Les basses terres se présentent sous forme de plaine argileuse et sablonneuse, avec une altitude inférieure à 200 m. Aux alentours du graben des basses terres, les hautes terres de la région sont présentes avec une altitude variant entre 200 et 1150 mètres (Daigneault et al., 2011). Soit une stratigraphie conceptuelle de la région représentée par le schéma ci-dessous (Figure 1-2).

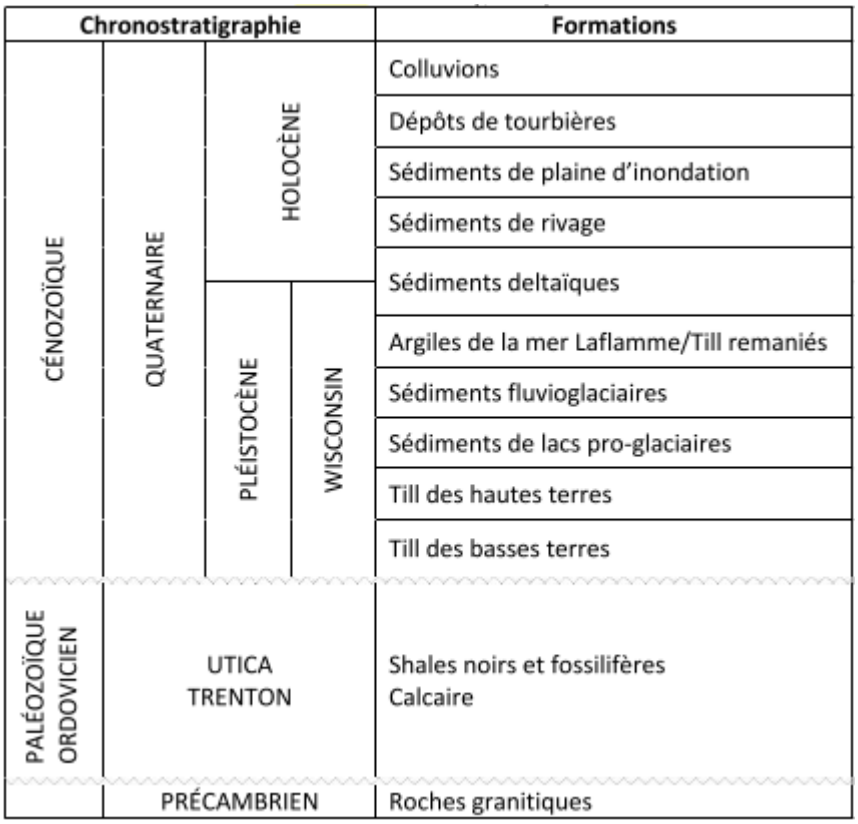


Figure 1-2 : Sommaire des formations du quaternaire (tiré de Lasalle et Tremblay (1978); modifié par CERM-PACES (2013a))

1.4. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour ce travail peut être regroupée en 3 grandes parties :

1- Le traitement des éventuelles valeurs aberrantes et la réalisation de tests d'adéquation pour identifier les incertitudes de chaque paramètre étudié en fonction d'une loi de distribution appropriée;

2- La détermination des corrélations linéaires et non linéaires possibles entre les différents paramètres disponibles sur l'étendue de la région et l'analyse de l'influence des valeurs aberrantes sur les corrélations.

3- La comparaison des résultats obtenus avec ceux de différentes publications concernant les argiles marines de l'Est Canada et d'ailleurs.

Tel qu'illustré dans le schéma de la méthodologie (Figure 1-3), les données géotechniques passeront par une série d'applications de méthodes statistiques pour la détermination des incertitudes (embranchement de gauche de la Figure 1-3) et aussi par une recherche de corrélations (embranchement de droite de la Figure 1-3). L'ensemble des résultats seront finalement soumis à la comparaison avec d'autres résultats obtenus pour des conditions de sédimentation similaires.

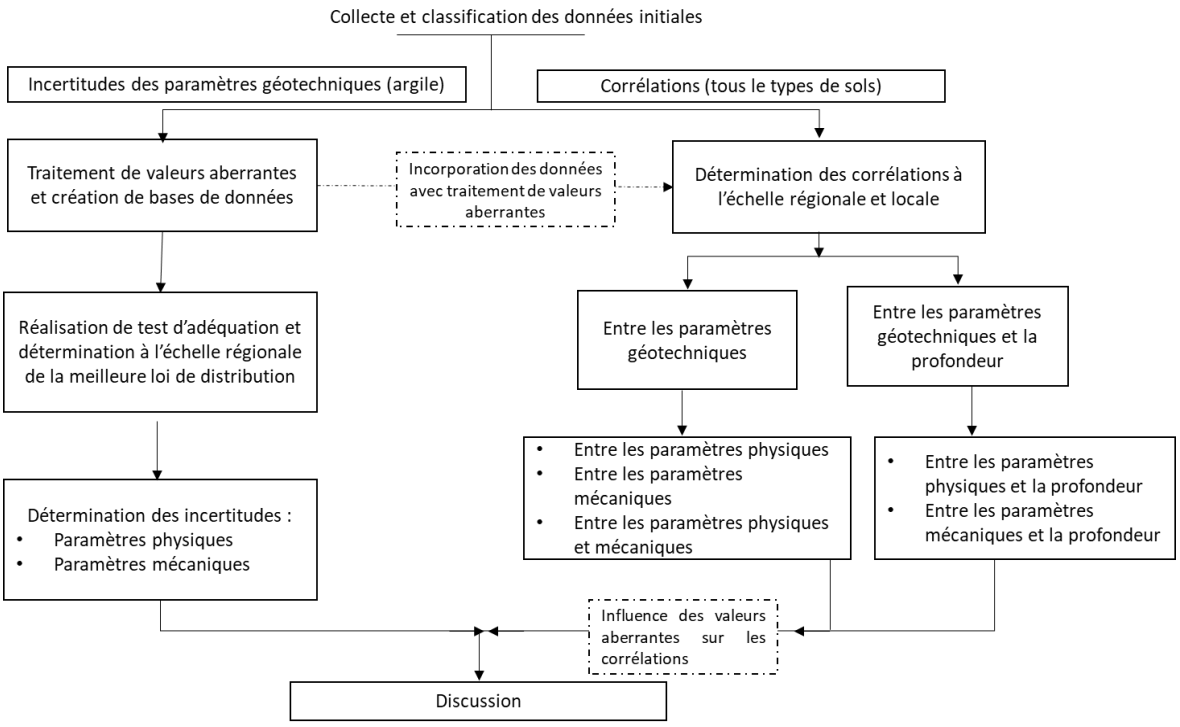


Figure 1-3 : Schéma de la méthodologie

Les données contenues dans les rapports d'essais ont été relevées sur des tableaux Excel en fonction du type d'essai, du type de sol, de la profondeur, des localités et coordonnées géographiques. Les rapports d'essais de laboratoire effectués par les étudiants de l'UQAC étaient complets, il a donc été possible de vérifier les calculs. Les données provenant du PACES étaient quant à eux regroupés sur des rapports géotechniques incluant des essais in situ et des essais de laboratoire. L'analyse des paramètres physiques et mécaniques se base sur des approches statistiques qui consistent à effectuer plusieurs tests sur les données déjà mesurées. Les différentes procédures statistiques sont définies dans les prochaines sous-sections.

1.4.1. Détermination des incertitudes

Le mot *incertitudes* est utilisé tout le long de l'étude pour désigner les paramètres statistiques de dispersion (écart-type, variance et coefficient de variation). La détermination des incertitudes concernera seulement les données de l'argile marine dans la région. Une représentation graphique de la distribution des valeurs, est obtenue par des histogrammes des données brutes tracés avec le logiciel SPSS (IBM. Corp, 2015). Ces graphiques donnent un premier aperçu de la distribution des valeurs et une idée approximative de la quantité de valeurs aberrantes (VA) contenues dans les échantillons. Des histogrammes seront également réalisés pour les données dont les valeurs aberrantes sont traitées. La précédente étape est facultative cependant elle permettra d'avoir une idée de l'influence du traitement des valeurs aberrantes sur la distribution des données, plus précisément de savoir si les valeurs aberrantes entraînent un espacement ou un

regroupement des données. Ensuite une série de tests d'adéquation sera effectuée sur les données initialement obtenues et les données dont les valeurs aberrantes sont traitées. Un test d'adéquation sert à démontrer si des données d'un échantillon suivent une loi de probabilité. Ainsi, il est possible lors de dimensionnement géotechniques sur des logiciels utilisant les méthodes probabilistes, de caractériser des paramètres géotechniques à travers des lois de probabilité qui ont été vérifiées par des tests d'adéquation.

Il faut préciser que le sort des VA dépend de leur origine qui, à son tour, dépend du jugement et de l'expérience de l'opérateur. D'où le risque d'obtenir des résultats précaires lors d'une analyse de variable. Nous avons donc investigué sur la meilleure manière d'opérer avec les données géotechniques disponibles. Pour ce faire l'argumentation de l'origine des valeurs aberrantes est établie principalement en fonction des résultats des tests d'adéquations dépendamment du traitement des valeurs aberrantes. Le but étant de pouvoir déterminer des valeurs d'incertitudes fiables au moyen de la distribution statistique, il est plus judicieux de connaître la meilleure loi de probabilité qui permet d'analyser statistiquement les données. Les étapes suivies sont définies dans les sections 1.4.1.1 et 1.4.1.2. D'abord, il est important de souligner que le fait de supprimer une seule fois des valeurs aberrantes contenues dans un groupe de données ne garantit pas l'élimination totale de valeurs aberrantes. En effet la suppression de valeurs aberrantes peut donner naissance à un nouvel échantillon avec une autre distribution de données, si dans ce nouvel échantillon des valeurs aberrantes sont détectées alors nous supposons leur

origine stochastique et dans le cas contraire les valeurs aberrantes seraient d'origine épistémique. L'ensemble des résultats obtenus pour l'indice de liquidité, et l'exemple détaillé en Annexe B qui permettent de mieux expliquer la procédure de détermination des incertitudes.

1.4.1.1. Traitement de valeurs aberrantes

Deux méthodes de traitement ont été appliquées séparément sur le logiciel Excel, il s'agit de la méthode de la boîte de moustaches (BM) (Wellmer, 1998; Le Guen, 2002) et de la méthode de Doerffel (D) (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997). Ces méthodes suivent des procédures d'exécution similaires. Le traitement des VA consiste après leur détection, de soit les supprimer, soit les corriger pour les réincorporer ou encore de les ignorer. Les valeurs aberrantes sont détectées parallèlement par les deux méthodes pour les données de chaque paramètre physique et mécanique, avant d'être supprimées dans un premier temps. Puis les mêmes valeurs aberrantes sont corrigées afin d'être réinsérées parmi la distribution de données d'où elles ont été extraites la première fois.

Le traitement des valeurs aberrantes a ainsi donné lieu à quatre ensembles ou bases de données en plus des données initiales pour chaque paramètre : les données dont les valeurs aberrantes sont supprimées par la méthode de BM (Wellmer, 1998; Le Guen, 2002), les données dont les valeurs aberrantes sont supprimées par la méthode D (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997), les données dont les valeurs aberrantes sont modifiées par la méthode BM (Wellmer, 1998; Le Guen, 2002)et les données dont les valeurs aberrantes sont

modifiées par la méthode D (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997). En plus des données initiales, un paramètre géotechnique peut donc avoir au maximum cinq différentes groupes de données d'après qu'il existe ou non des VA parmi les données initialement recueillies.

La méthode de la boîte à moustaches

La méthode de la boîte à moustaches (Wellmer, 1998; Le Guen, 2002) détecte les valeurs aberrantes maximales et les valeurs aberrantes minimales. Initialement la boîte à moustaches est un graphique permettant de représenter sous forme de diagramme l'ensemble des données. Elle sert aussi à apprécier la symétrie d'une distribution. Si elle est symétrique, il est possible de supposer que la distribution suit une loi normale, car une distribution normale est symétrique mais l'inverse est faux. La boîte à moustache s'avère utile pour détecter les VA, la démarche à suivre est décrite grâce à Wellmer (1998) et Le Guen (2002) :

- Classer les données suivant un ordre croissant (facultatif avec le logiciel Excel).
- Identifier les valeurs aberrantes; il s'agit tout d'abord de calculer le premier quartile (Q1), le troisième quartile (Q3) et la différence entre les deux quartiles (IQR). Soit, XB le seuil inférieur et XA la limite supérieure. Sont alors considérées comme aberrantes maximales et minimales respectivement:

  Les valeurs aberrantes qui sont supérieures à

  $XA = Q3 + 1{,}5(Q3 - Q1)$ *Équation 1-1*

  Les valeurs aberrantes qui sont inférieures à

  $XB = Q1 - 1{,}5(Q3 - Q1)$ *Équation 1-2*

Pour corriger les valeurs aberrantes, il faut toutes les remplacer de la façon qui suit : les valeurs aberrantes inférieures par une valeur supérieure proche de XB et les valeurs aberrantes supérieures par une valeur inférieure proche XA, d'où l'obtention d'un nouvel échantillon. La même opération sera répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de valeurs aberrantes. Les valeurs XA et XB seront recalculées et il faudra à nouveau vérifier l'existence de valeurs aberrantes.

Il n'y a pas de valeur aberrante, maximale ou minimale, lorsque le calcul de XA ou de XB donne un résultat négatif.

La méthode de Doerffel

Le principe de la méthode de Doerffel ressemble celle de la boîte à moustaches, à la différence qu'il n'y a que les valeurs aberrantes supérieures qui sont prises en considération. Seule la valeur X_A est calculée l'équation (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997):

$$X_A = \bar{X} + gS \quad \textit{Équation 1-3}$$

Avec : $\bar{X}$ la moyenne, *S* l'écart-type et *g* un paramètre de majoration lu sur le digramme de Doerffel (Figure 1-4), dépendant du niveau de confiance (courbes d'intervalle de confiance de 5% ou 1%) et de la taille de l'échantillon. Le paramètre g est un nombre d'accroissement déterminé sur échelle logarithmique.

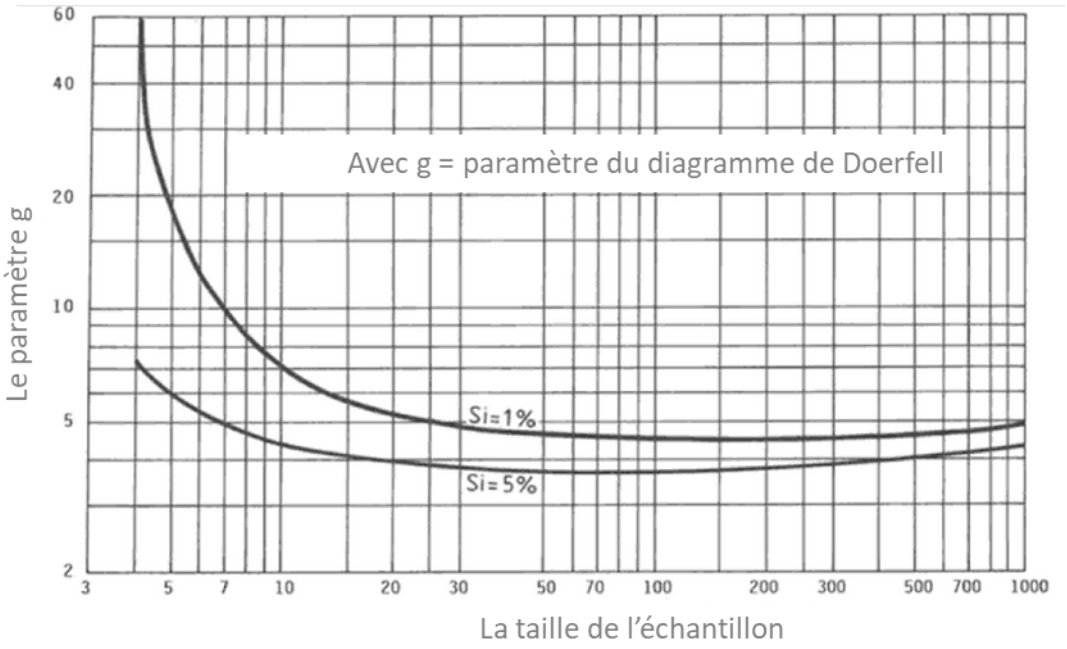


Figure 1-4 : Diagramme de Doerffel (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997)

1.4.1.2. Réalisation de test d'adéquation : la méthode Kolmogorov-Smirnov

Les tests d'adéquation sont des méthodes utilisées pour déterminer la(les) loi(s) de probabilité qui s'apparente le mieux à une distribution de données. Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) a été choisi parmi les autres tests d'adéquation, parce qu'il peut se faire avec n'importe quelle loi de distribution théorique contrairement aux autres méthodes existantes. Le test KS est exécuté grâce au logiciel Analytic Solver (Frontline Systems Inc., 2019). Il consiste en une comparaison de la différence maximale entre les fréquences cumulées des données observées et des données théoriques, D_n, avec une valeur critique, D_α, dépendante de l'intervalle de confiance et de la taille de l'échantillon observé.

La procédure à suivre pour effectuer le test de Kolmogorov-Smirnov est tirée de l'œuvre de Massey (1951) :

1. Faire une répartition en classes des données et les classifier en ordre croissant.
2. Calculer la moyenne de chaque classe.
3. Calculer la variable centrée réduite ($\frac{x-\mu}{\sigma}$) (x : variable, μ : moyenne et σ : écart-type).
4. Calculer la fréquence pour chaque classe. Par la suite, il est possible de déterminer les fréquences cumulées.
5. Calculer les fréquences cumulées théoriques en fonction de la loi de distribution avec laquelle il faut faire la comparaison.
6. Calculer la différence entre les fréquences cumulées observées ou réelles et celles théoriques; à ce point il faut repérer la différence maximale, D_n
7. Déterminer la valeur critique, le Tableau 1-2 présente les conditions de calcul de la valeur critique, D_α.

Tableau 1-2: Calcul de la valeur critique pour un échantillon, n >80, test de Kolmogorov-Smirnov (Massey,1951)

Risque	**Valeur critique pour $n > 80$**
5%	$1.36/\sqrt{n}$
1%	$1.63/\sqrt{n}$

Le test se termine par la comparaison entre la valeur critique et la différence maximale calculée au point 6 : si la différence, D_n, est inférieure ou égale à la valeur de D_α, alors la distribution testée est acceptée.

Le logiciel Analytic Solver (Frontline Systems Inc., 2019) permettant d'effectuer le test KS simultanément pour plusieurs lois de probabilité, à la fin du test les lois de probabilité sont présentées en ordre en commençant par celle qui s'apparente le mieux au données observées. À chaque loi de probabilité présentée correspondent des paramètres statistiques calculées aussi par le logiciel (Annexe C). Pour chacun des paramètres géotechniques, toutes les bases de données (initiale et celles issues du traitement des VA) sont soumises au test d'adéquation. Les résultats obtenus pour les différentes bases de données sont comparés entre eux afin de déterminer la base de données présentant le meilleur résultat à l'issu du test d'adéquation (Figure 1-5). Pour faire cette comparaison, nous avons proposé un coefficient C_k ($C_k = \frac{D_{max}}{D_\alpha}$) calculé pour chacune des cinq bases de données après le test d'adéquation. La base de données ayant le plus petit coefficient, C_k, ainsi que la meilleure loi de probabilité appropriée pour cette base de données sont choisies pour déterminer les incertitudes du paramètre géotechnique concerné.

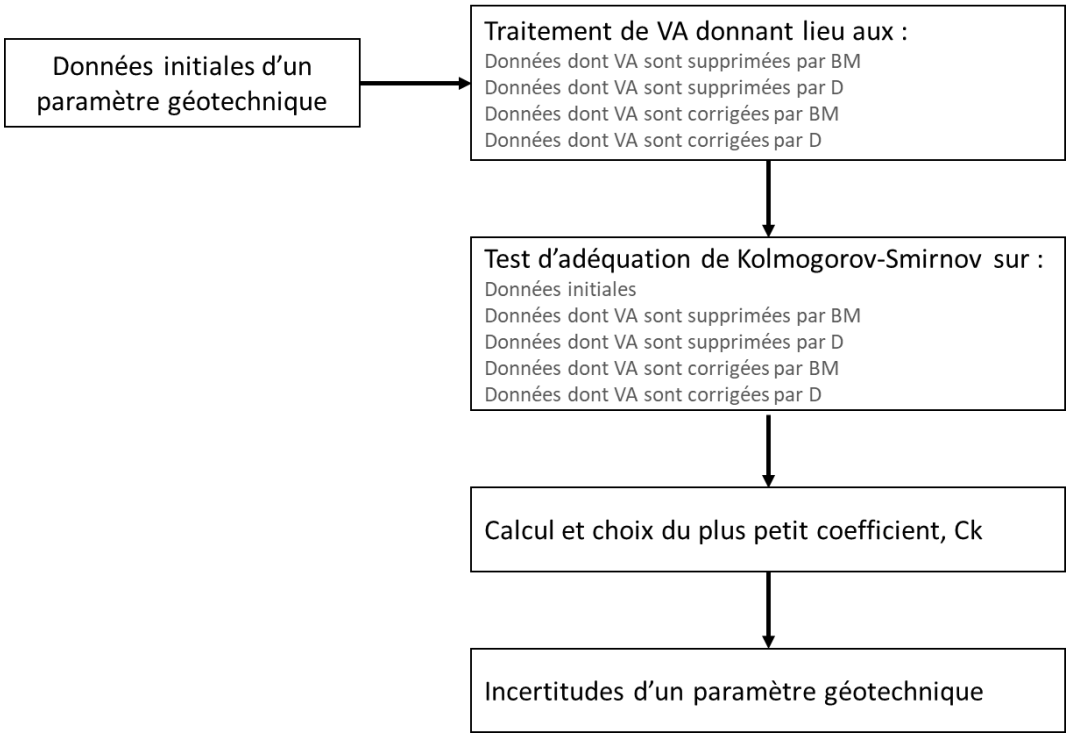


Figure 1-5: Procédure utilisée pour la détermination des incertitudes d'un paramètre géotechnique

1.4.2. Détermination des corrélations

Les paramètres géotechniques sont choisis en fonction des corrélations identifiées dans la revue de littérature. Le but de cette partie est de déterminer la force relationnelle entre deux variables, qui peuvent être des paramètres géotechniques ou la profondeur. Les éléments considérés sont le coefficient de corrélation, la forme et l'équation de la courbe de régression, ainsi que le nuage de points résultant de la projection des deux variables. L'outil utilisé à cet effet est le logiciel IBM V.25 (IBM, 2011), en raison de sa disponibilité et aussi de son habileté à rechercher des corrélations par catégories. Par exemple il permet

de rechercher une corrélation à la fois pour plusieurs localités et pour toutes les localités en même temps.

Toutes les corrélations sont analysées à la fois pour l'ensemble des localités (échelle régionale) et pour chacune des localités (échelle locale). Les recherches de corrélation sont menées pour les paramètres physiques entre eux, pour les paramètres mécaniques entre eux, et aussi entre des paramètres physiques et des paramètres mécaniques. Ensuite nous déterminons la force de la corrélation entre les paramètres physiques ou mécaniques et la profondeur. Afin de pouvoir observer l'influence que peut avoir les valeurs aberrantes quatre exemples de régression (linéaire et non linéaire) sont analysées selon que les VA sont traitée ou pas.

L'interprétation et la comparaison de nos résultats avec ceux concernant les argiles marines scandinaves est incluses dans la section résultats, respectivement pour chacun des paramètres géotechniques

CHAPITRE 2 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Introduction

La recherche bibliographique a été menée principalement dans le but d'avoir une idée sur les travaux déjà effectués et de connaître les différentes méthodes d'analyse statistique à utiliser pour atteindre les objectifs visés, en ce qui concerne les paramètres géotechniques des argiles de la Scandinavie et de l'est Canada particulièrement celles la mer Laflamme. Ces dépôts marins ont une histoire géologique similaire. Celle-ci a eu lieu durant le quaternaire (Leroueil et al., 1983), cependant les argiles de la mer Laflamme sont qualifiées de jeunes car elles ont été formées récemment, il y a 12000 à 8000 ans (Sobotka, 1974).

En premier lieu nous présenterons la place occupée par les valeurs aberrantes dans la littérature géotechnique. Ensuite les paramètres statistiques utilisés seront brièvement définis. Enfin il y aura une présentation de quelques incertitudes et corrélations trouvées dans l'est Canada pour les argiles marines.

2.2. Valeurs aberrantes et incertitudes

Dans la distribution de données d'un échantillon il faut faire la différence entre certaines données exceptionnelles (surprenantes) de l'échantillon, Barnett et Lewis (1994) en ont définies plusieurs :

- Les contaminants sont des données qui ne font pas partie d'un échantillon mais se retrouvent à l'intérieur de la distribution représentative de l'échantillon; ils sont donc difficiles à détecter et ont une faible incidence sur l'analyse de l'échantillon contaminé tant qu'ils ne sont pas situés aux extrémités de la distribution des données (Planchon, 2005).
- Les valeurs extrêmes comme leur nom l'indique sont des valeurs situées aux extrémités d'une distribution de données et qui en font parties.
- Une valeur supérieure est une valeur qui borne une distribution de données.
- Les valeurs aberrantes.

La figure 2-1 tirée de l'œuvre de Barnett et Lewis (1994), présente une illustration de ces valeurs particulières mentionnées plus haut pouvant se trouver dans une distribution de données; le cas « a » illustre les valeurs extrêmes, le cas « b » montre en plus des valeurs extrêmes, les valeurs supérieures et aberrantes, le cas « c » quant à lui illustre les valeurs

contaminantes et les valeurs extrêmes, enfin le cas « d » est similaire au cas « c » sauf qu'il présente aussi les valeurs aberrantes.

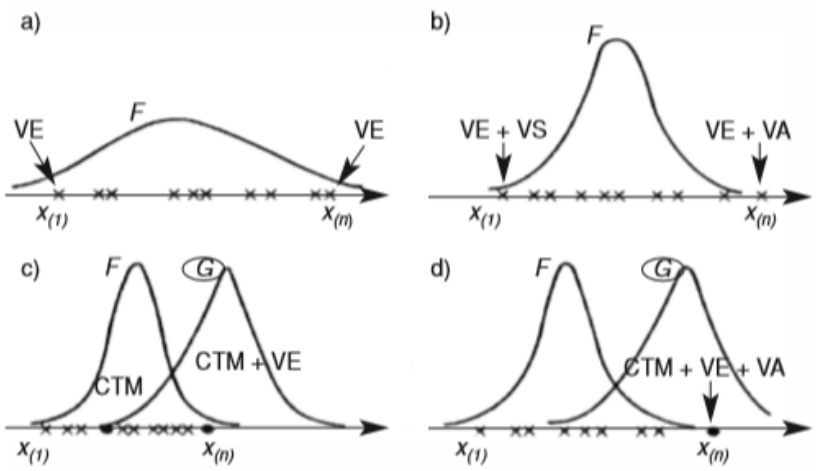


Figure 2-1: Illustration de valeurs extrême (VE), supérieure (VS), contaminante (CTM) et aberrante (VA) à l'aide deux distributions quelconques F et G (Planchon, 2005)

Les valeurs aberrantes, sont définies par Barnett et Lewis (1994) comme étant des « observations qui semblent dévier de manière importante des autres observations de la population de laquelle elles proviennent, ces observations semblent être inconsistantes avec le reste des données, en relation avec un modèle supposé connu». Selon Osborne et Overbay, (2004) elles sont capables de faire « *croître la variance et de réduire la puissance des tests statistiques* ». La nature de la valeur aberrante (VA) est déterminée par son origine. Les VA peuvent être aléatoires (stochastiques) lorsqu'elles proviennent de la variabilité inhérente du paramètre, ou déterminées (épistémiques) quand elles sont issues des erreurs d'exécutions (collecte ou assemblage de données). Pour les logiciels de calcul

de stabilité des ouvrages comme Geoslope (Geostudio, 1977) qui, à l'aide d'un modèle géométrique et d'incertitudes des paramètres géotechniques calcule le coefficient de sécurité, la qualité du rendement dépendra en partie de la précision des incertitudes. Au fil des années, différents auteurs ont étudié des méthodes de modélisation géotechnique en impliquant les incertitudes. Il y a parmi ces méthodes, les méthodes statistiques simples et les méthodes géostatiques qui estiment que la variabilité spatiale peut être définie par l'autocorrélation d'un paramètre dépendamment d'une certaine distance (Langlois, 1991). Cependant nous nous intéressons aux méthodes statistiques probabilistes. Comme méthode probabiliste, il y a la méthode des éléments finis stochastiques (MEFS) qui en combinaison de la méthode de Monte Carlo intervient le plus souvent dans les simulations géotechniques (Bolle, 1988; Langlois, 1991; Auvinet al, 1999). Ce sont des méthodes qui n'exigent pas le traitement de valeurs aberrantes avant leur application, ce choix dépend de l'ingénieur. Pour notre part, nous investiguons sur la nécessité d'impliquer le traitement de valeurs aberrantes dans les calculs géotechniques. Le test d'adéquation est également sollicité afin d'obtenir de meilleurs résultats pour la détermination des incertitudes et pour l'attribution à chaque paramètre géotechnique de loi(s) de probabilité convenante(s) (ce qui est avantageux lors de l'application de méthodes statistiques probabilistes comme les méthodes d'échantillonnage aléatoire simples).

2.3. Paramètres statistiques

La détermination des paramètres statistiques permet d'interpréter avec plus de précision la distribution de la variable étudiée. Le tableau 2-1 met en évidence le rôle joué par les paramètres statistiques estimés dans cette étude (Baillargeon, 2006).

Tableau 2-1: Utilité des paramètres estimés pour l'étude

Paramètres statistiques	Intérêt
Moyenne et écart-type	Indicatif de la variabilité de l'échantillon
Mode, coefficient de variation	Mesure de l'hétérogénéité des variables de l'échantillon
Coefficient d'aplatissement	Calcul de la différence de grandeurs entre les données étudiées
Coefficient d'asymétrie	Évaluation de la symétrie de la distribution

2.4. Quelques corrélations entre les paramètres physiques et mécaniques des sols

Les corrélations jouent un rôle important dans la détermination des paramètres et l'explication de certains phénomènes ou dans leurs vérifications. Bouchard et al (1983) ont démontré grâce aux corrélations entre la teneur en eau et la profondeur, que la consolidation des silts argileux de Saint-Jean-Vianney et de La Baie n'était pas due à la cimentation mais au processus de préchargement et d'érosion. Étant donné que la cimentation renforce les liens de cohésion des grains et réduit par la même occasion les vides contenus dans le matériau, les auteurs supposèrent que la teneur en eau ne devrait pas varier en fonction de la profondeur (figure 2-2). Or, pour les échantillons de Saint Jean-

Vianney, la teneur en eau diminue en fonction de la profondeur. Ils ont donc conclu que la cimentation n'était pas l'origine de la consolidation de ces dépôts de silts argileux.

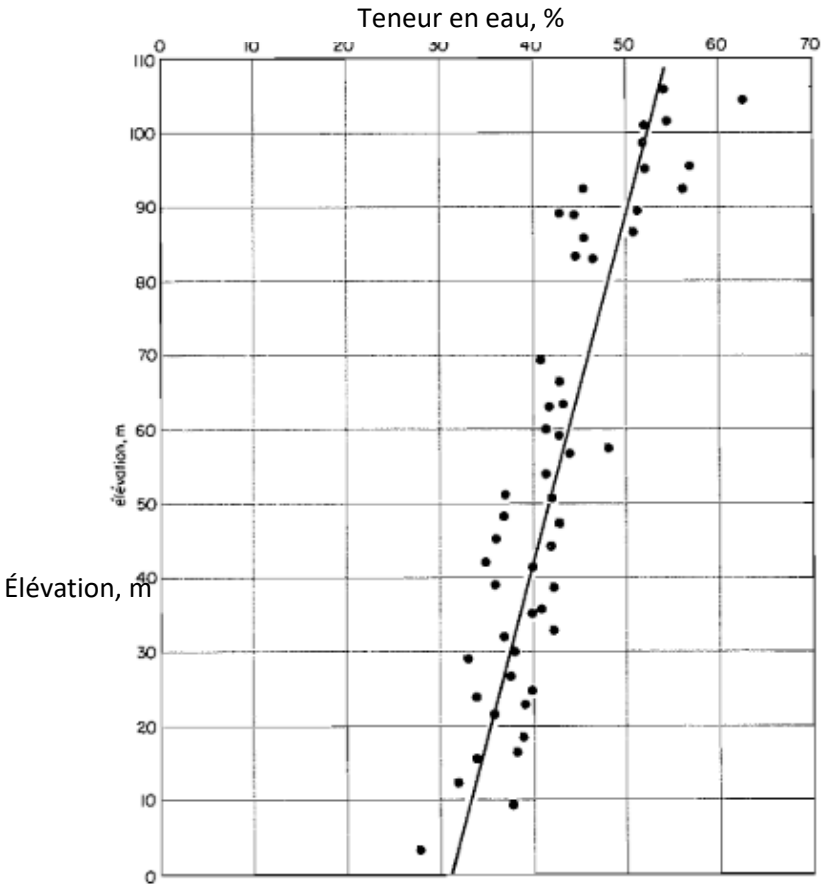


Figure 2-2: Relation entre la teneur en eau naturelle et l'élévation (Bouchard et al., 1983)

Bouchard et al (1983) ont aussi réussi à déterminer l'élévation des couches de silts argileux en fin de déposition grâce à la relation entre la contrainte de préconsolidation et la profondeur, en supposant nulle la contrainte de pré consolidation à la surface du dépôt (figure 2-3). En effet, la contrainte de pré consolidation correspond à la contrainte maximale qu'un échantillon de sol a pu connaître au cours de son histoire géologique, logiquement

cette contrainte de pré consolidation doit être égale zéro à la surface d'un dépôt. Les auteurs ont alors estimé par interpolation l'élévation des dépôts grâce aux données d'échantillons prélevés à des profondeurs différentes. Ils supposent que les dépôts de silt argileux avaient une élévation d'environ 120 m pour la localité de Saint-Jean-Vianney et 160 m pour celle de Jonquière.

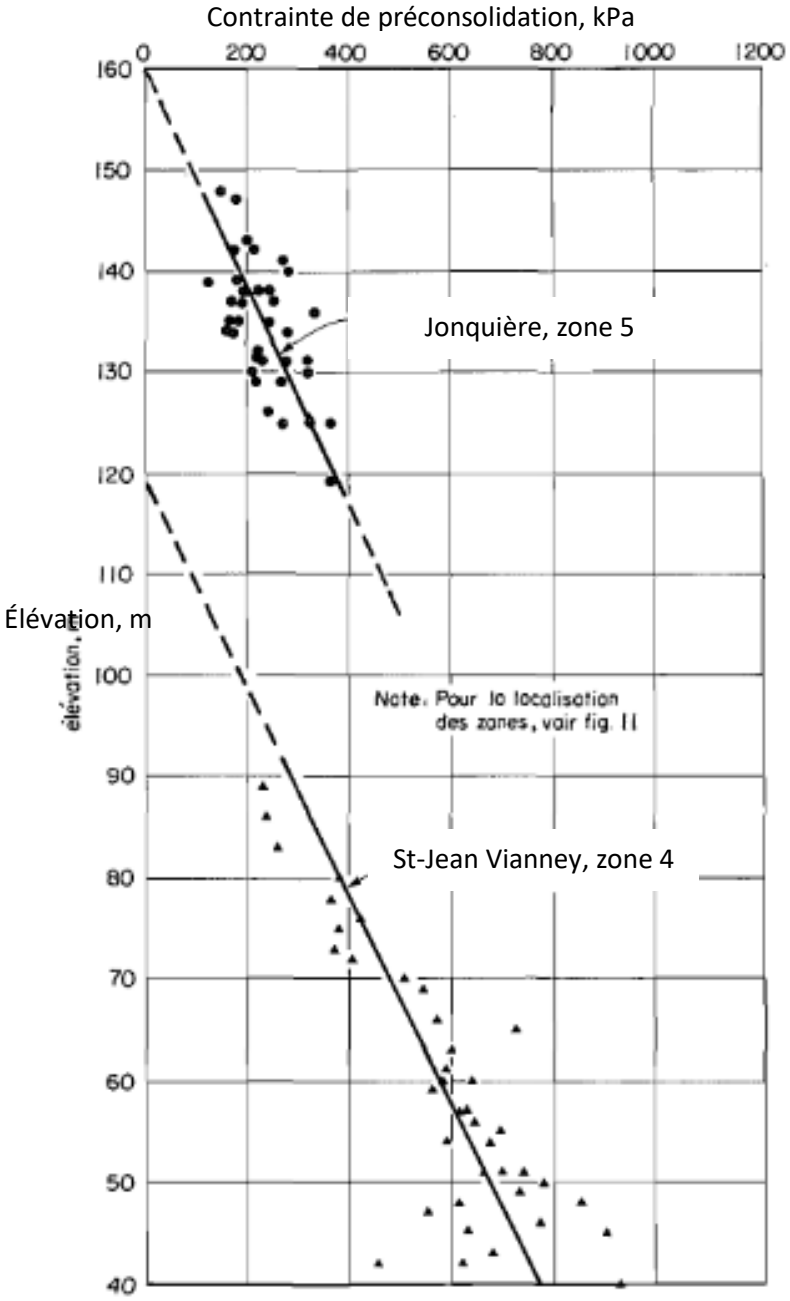


Figure 2-3: Relation entre la contrainte de préconsolidation et l'élévation (Bouchard et al., 1983)

2.5. Comparaison entre des argiles sensibles de régions différentes

Une similarité entre les argiles de l'est du Canada et celles provenant d'ailleurs (Golfe du Mexique, États-Unis, Norvège et Suède) a été démontrée par Leroueil et al. (1983) grâce à des liens de corrélation entre l'indice de liquidité et la résistance au cisaillement de l'échantillon remanié (figure 2-4). Cette relation a également permis d'obtenir une formule empirique.

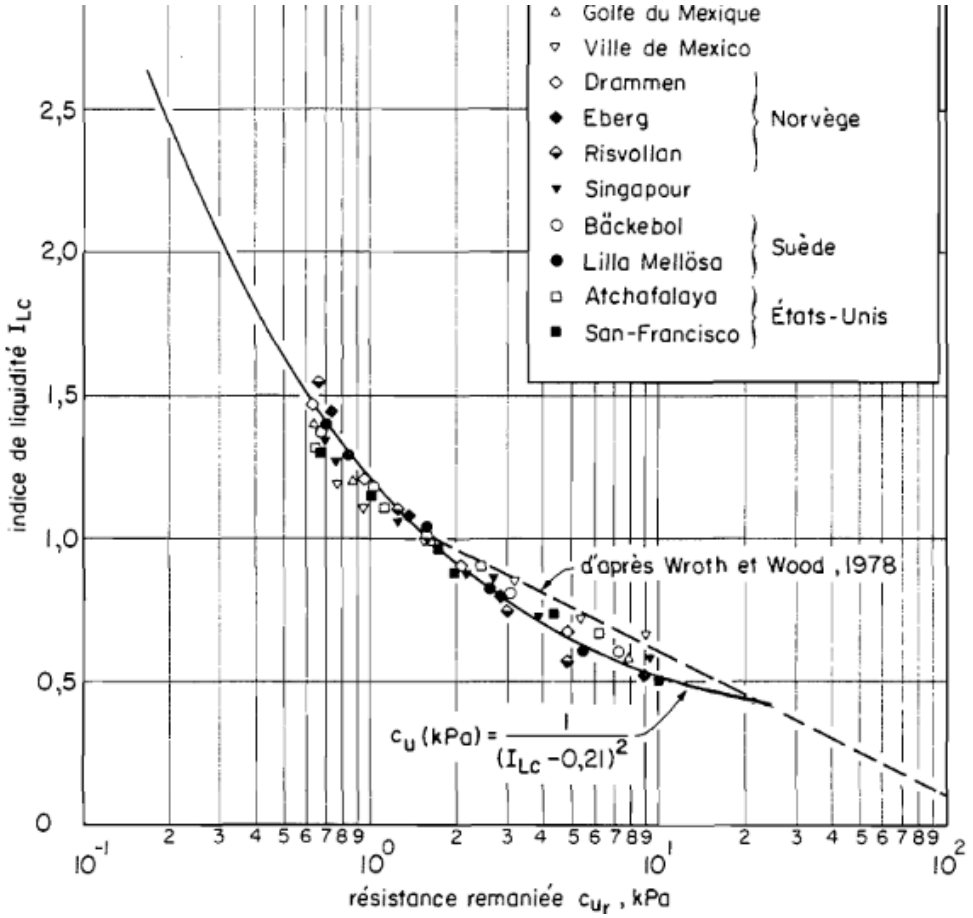


Figure 2-4: Relation entre l'indice de liquidité (I_{LC})et la résistance remaniée (C_{ur}) (Leroueil et al., 1983)

Au travers de la relation existante entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité Windisch et Yong (1990) ont conclu que les argiles scandinaves montraient une plus grande plasticité que celles de l'est Canada et que ces dernières avaient des propriétés physiques différentes (figure 2-5). Effectivement parmi les minéraux qui composent les argiles de l'est du Canada, il y en a peu qui sont des minéraux argileux. Des traces de phyllosilicates, inférieures à 10%, ont été retrouvées dans la minéralogie d'échantillons d'argile de Saint-Jean-Vianney (Bentley et al, 1978).

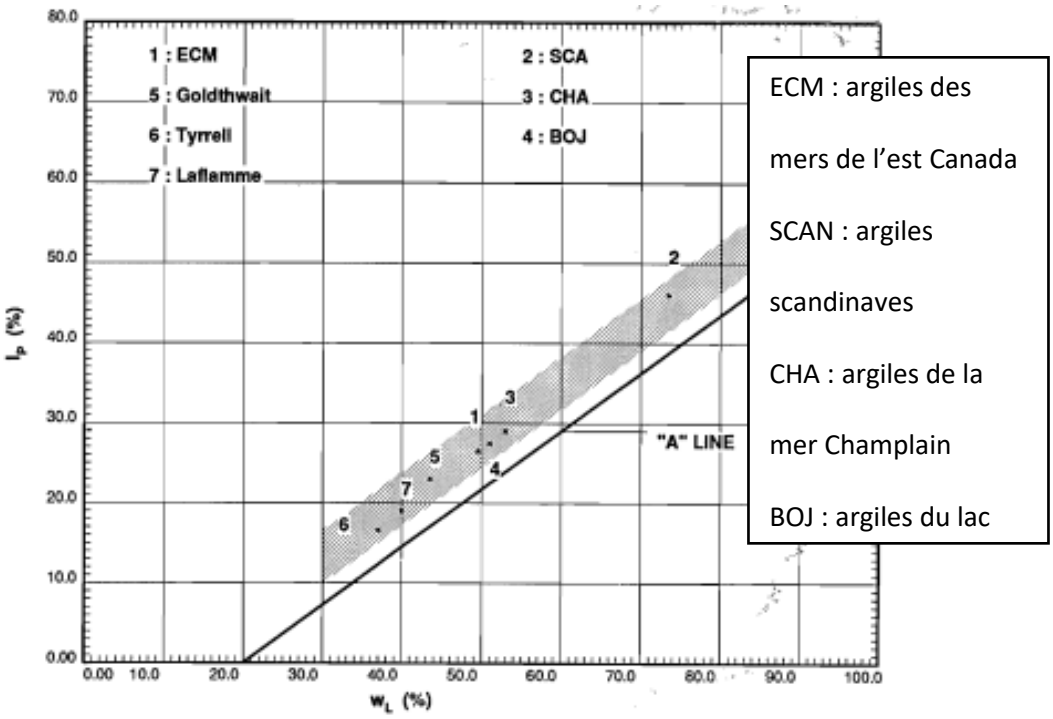


Figure 2-5: Relation entre l'indice de plasticité (I_P) et la limite de liquidité (W_L) pour des échantillons d'argiles de localités différentes (Windisch et Yong, 1990)

La recherche bibliographique a contribué au choix des paramètres physiques et mécaniques cités dans l'introduction. Elle a également permis d'identifier les corrélations plausibles entre les paramètres géotechniques de l'argile marine, lesquelles sont présentées dans la section résultats.

Le chapitre suivant présente l'ensemble des résultats obtenus pour les incertitudes géotechniques de l'argile marine dans la région Saguenay-Lac-Saint-Jean.

CHAPITRE 3 : DÉTERMINATION DES INCERTITUDES SUR LES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DE LA RÉGION DU SLSJ

3.1. Introduction

À l'instar de la démarche expliquée dans la méthodologie (figure 3-1), les données initialement recueillies sur chaque paramètre géotechnique sont soumises au traitement de valeurs aberrantes par la méthode de la boîte de moustaches et la méthode Doerffel avant de passer au test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov. Les résultats obtenus à la suite du traitement des valeurs aberrantes (VA) sont résumés dans le tableau 3-1.

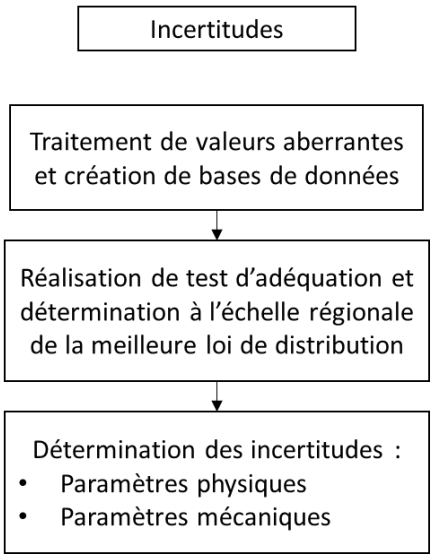


Figure 3-1:Schéma de la première partie de la méthodologie (Détermination des incertitudes)

3.2. Traitement des valeurs aberrantes

L'utilisation de différentes méthodes de traitement de VA a permis d'observer l'incidence des VA sur le test d'adéquation de Kolmogorov (Massey, 1951). Le traitement des valeurs aberrantes n'a pas eu le même effet sur les résultats du test de Kolmogorov.

Concernant les paramètres de la limite de plasticité (W_P), la résistance de pointe (Qc), et de la sensibilité (S_t), le traitement de VA n'a eu aucune influence, puisque ce sont les données initiales qui ont fourni les meilleures lois de probabilité d'adéquation. L'hypothèse émise selon la méthodologie élaborée pour la détermination de l'origine des valeurs aberrantes détectées dans ces cas, est qu'elles devraient provenir de la variabilité inhérente des paramètres géotechniques en question. La vraisemblance de cette hypothèse ne fait aucun doute pour la sensibilité (S_t) des argiles marines connue pour ses valeurs qui peuvent être très élevées. Afin de prouver la variabilité inhérente des autres paramètres une comparaison de leurs incertitudes avec celles trouvées dans la revue de littérature réalisée. Il en ressort qu'il existe une analogie de nos résultats avec les incertitudes de W_P,se trouvant dans la revue de littérature. L'ensemble des 3 paramètres géotechniques cités plus haut possèdent des coefficients de variation (COV) très élevés, supérieures à 55%, ce qui explique la grande variabilité de la distribution des données et appuie également l'hypothèse selon laquelle les VA proviendraient de la variabilité inhérente de ces paramètres géotechniques.

D'autre part nous avons constaté que la transformation en valeur inverse d'un paramètre géotechnique peut créer ou dissimuler des valeurs aberrantes. Les données de la porosité sont proportionnelles à celles de l'indice des vides, il aurait ainsi fallu, par analogie, que la distribution de e_{0d} ne présente pas de VA tout comme celle de n_d. Le meilleur résultat au test d'adéquation pour e_{0d} a été observé pour les données dont les valeurs aberrantes ont été supprimées. La création tout comme la dissimulation de VA

risque de fausser les résultats d'une analyse descriptive : la génération de VA pourrait, selon le jugement de l'opérateur, nécessiter un traitement de fausses VA (substitution ou suppression) et occasionner ainsi un biais dans les résultats attendus; quant à la présence non apparente de VA, elle *contaminerait* (figure 2-1) la distribution et laisserait croire à des résultats fiables qui le sont moins. Dans le cas où il sera nécessaire d'effectuer une transformation de variable lors de manipulation de données géotechniques, un très bon jugement de l'ingénieur sera alors sollicité afin d'identifier la véritable origine des éventuelles VA ainsi que le niveau de fiabilité de la transformation de la variable initiale.

Pour les paramètres géotechniques étudiées, le tableau 3-1 présente un résumé du traitement des VA déterminées à l'aide des deux méthodes, celle de la boîte de moustaches et celle de Doerffel.

Tableau 3-1 : Seuils et valeurs aberrantes détectées par la méthode de la boîte de moustaches et la méthode de Doerffel

Paramètres	***Nombre de données***	***Minimum-Maximum***	***Méthode BM Seuils Minimum-Maximum***	***Méthode BM (Nombre de VA)***	***Méthode D Seuils Maximum***	***Méthode D (Nombre de VA)***
W (%)	659	12,5-73,53	19,5-63,5	14	69.65	2
W_L (%)	159	16,5-67,11	Aucune		Aucune	
W_P (%)	160	11,93-28,24	14,25-28,25	3	Aucune	
I_P (%)	159	1,5-43,54	Aucune		Aucune	
I_L	155	-0,69-9,57	-2,04-5,85	9	6.62	4
e_{0d}	31	0,66-2,58	0,28-2,17	2	2.4	4
e_{0c}	25	0,38-2,8	0,55-1,44	6	2.304	1
n_d ***(%) densité***	31	39,79-72	Aucune			
n_c ***(%) consol***	25	27,53-73,91	38,64-61,16	5	Aucune	
Dr densité	29	2,174-2,851	2,52-2,96	3	2.3	1
Dr consol	22	2,12-2,88	2,53-2,96	2	Aucune	
ρ densité (g/cm3)	26	1,56-2,97	1,45-2,22	1	Aucune	
ρ consolid (g/cm3)	12	1,58-2,52	1,73-2,52	1	Aucune	
Q_C (kPa)	1128	60-8300	-750 –3250	14	Échantillon de grande taille (Impossible)	
f_s (kPa)	1130	8-633	-12,5—87,5	76	Échantillon de grande taille (Impossible)	
N	39	1-100	-6,75—19	6	80.005	4
S_u (kPa)	352	20-197	Aucune		Aucune	
S_{ur} (kPa)	61	3-131	Aucune		Aucune	
S_t	403	1-1902	-797,251368,75	7	1503.07	5
S_{uc} (kPa)	60	3-60	-61,72-197,6	2	Aucune	
S_{urc} (kPa)	49	0,12-72	-3,75—9,77	7	25.33	4
S_{tc}	49	1,273-87,707	-25,21—72,79	4	Aucune	
C_u (kPa)	38	2,8-129,515	-21,49—99,79	3	Aucune	
σ'p (kPa)	43	17-775	510,5	5	Aucune	
OCR	29	0,29-50	-7,147—14,86	1	19.45	1

3.3. Détermination des incertitudes à l'issu du test d'adéquation

Parmi les résultats obtenus pour chaque paramètre géotechnique il y a une figure présentant les histogrammes des données initiales ainsi que de celles issues du traitement des valeurs aberrantes. Chacune des figures comporte également le résultat au test d'adéquation qui a permis de calculer les incertitudes.

3.3.1. Résultats pour les paramètres physiques

Les paramètres physiques désignent les propriétés physiques du matériau (la composition, l'état). Les paramètres physiques étudiés sont : la masse volumique, la densité des grains, l'indice de vides, la porosité, la teneur en eau et les limites d'Atterberg (limite de plasticité, limite de liquidité, indice de plasticité et indice de liquidité).

3.3.1.1. Indice de liquidité pour l'argile, illustration de la méthode utilisée et résultats

Le cheminement par lequel est passé l'ensemble des données brutes (données initiales) de chaque paramètre géotechnique a été présenté dans la Figure 1-5. Dans cette section, l'indice de liquidité est le paramètre choisi comme exemple afin d'expliquer de façon concrète le cheminement suivi.

Les données de l'indice de liquidité sont obtenues pour Chicoutimi, Chicoutimi-Nord, Jonquière, La Baie, Laterrière, Shipshaw, Canton-Tremblay ainsi que des localités inconnues. Certaines localités n'ont pas pu être précisées à cause des étiquettes devenues

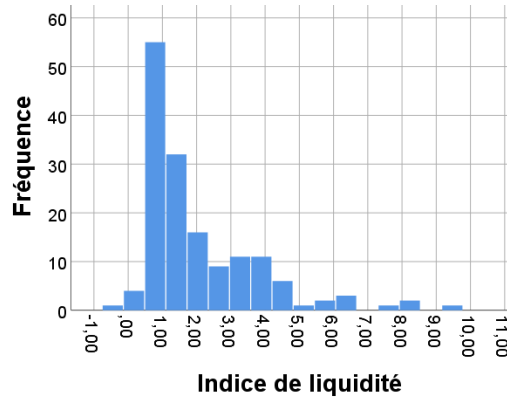
illisibles durant le conditionnement des échantillons pour la réalisation d'essais laboratoire à l'UQAC, un problème probablement lié à la durée d'entreposage; nous identifierons l'ensemble de ces localités par le terme « localités inconnues » ou « Inconnu ». Des valeurs aberrantes ont été détectées aussi bien par la méthode de la boîte à moustaches que par celle de Doerffel. La suppression des VA pour les deux méthodes aboutit à des ensembles de données où d'autres VA sont observables (sections (d) et (f) de la figure 3-2). Dans de tels cas nous supposons que l'apparition de nouvelles VA est due à la variabilité inhérente du paramètre et qu'il n'est pas judicieux d'utiliser les bases de données obtenues après la suppression des VA lors de la réalisation du test d'adéquation car cela risquerait de donner des résultats moins fiables. Les autres bases de données (parties (c) et (e) de la figure 3-2) ont donné un résultat concluant au test d'adéquation. Il reste alors à déterminer la BD qui présente la meilleure loi de probabilité adéquate pour l'estimation des incertitudes liées à l'indice de liquidité. Pour ce faire, nous avons proposé le calcul d'un coefficient C_k (équation 3-1) pour chacune des bases de données soumises au test d'adéquation, les incertitudes de la BD ayant le plus petit C_k seront représentatives de l'indice de liquidité (I_L). Le meilleur résultat du test d'adéquation a été obtenue pour la base de données dont les valeurs aberrantes ont été supprimées par la méthode de la boîte de moustaches.

Soit l'équation permettant de calculer C_k, avec la différence maximale entre les fréquences cumulées des données observées et des données théoriques et D_α la valeur critique:

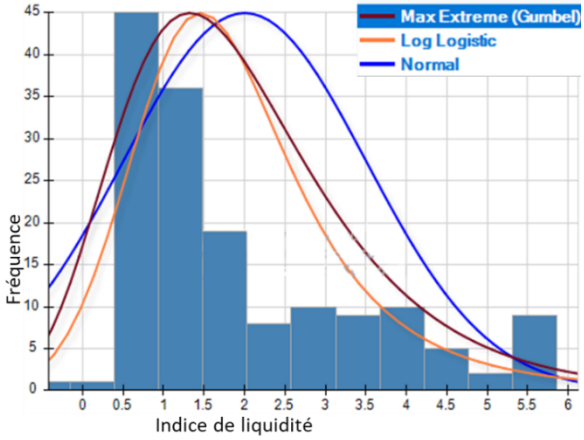
Équation 3-1 $$C_k = \frac{D_{max}}{D_\alpha}$$

Les échantillons dont l'indice de liquidité est supérieur à 1 sont dans un état liquide. En dépit du traitement de VA, des valeurs élevées comme 6,61 de l'indice de liquidité ont été préservées et le COV retenu est de 78% ce qui traduit une grande variabilité de l'indice de liquidité.

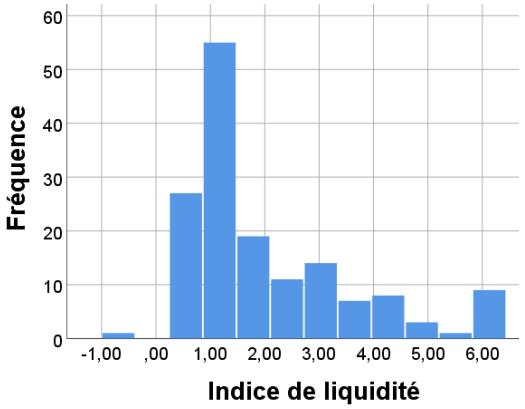
La meilleure loi de distribution obtenue à l'issu du test d'adéquation est la loi de Gumbel. Selon les données recueillies plus de 67% des échantillons étudiés se trouvent dans un état liquide et environ 32 % sont dans un état plastique, il n'y a qu'un seul échantillon qui se présente à l'état solide (avec une valeur de -0,69). Les valeurs de l'indice de liquidité sont plus élevées que celles trouvées dans la revue de littérature en ce qui concerne les argiles de l'est du Canada. Par exemple, des indices de liquidité compris entre 1,2 et 3,6 ont été retrouvés pour des échantillons d'argile du Fjord Saguenay (Leroueil et al, 1987), ou encore d'environ 1,2 pour des argiles scandinaves (Windisch et Yong, 1990). L'état de consistance des argiles de la région seraient donc plus liquide que les celles des argiles scandinaves.



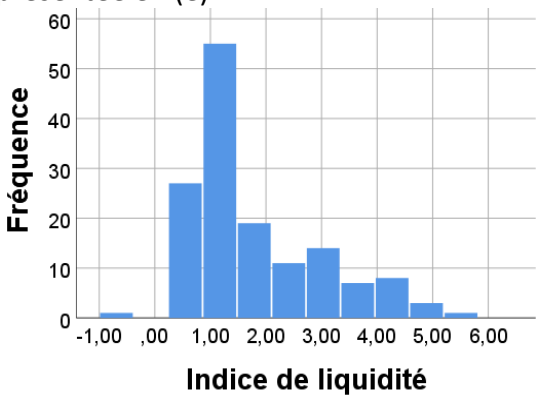
(a) Histogrammes des données initiales



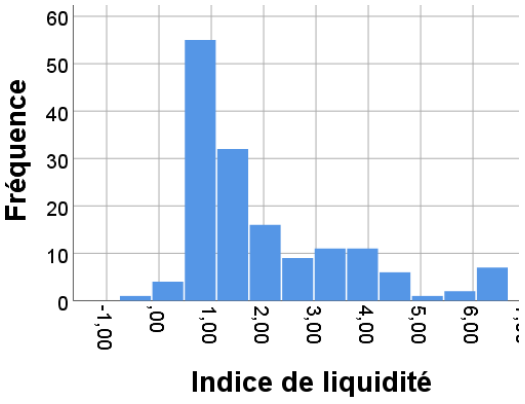
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (e)



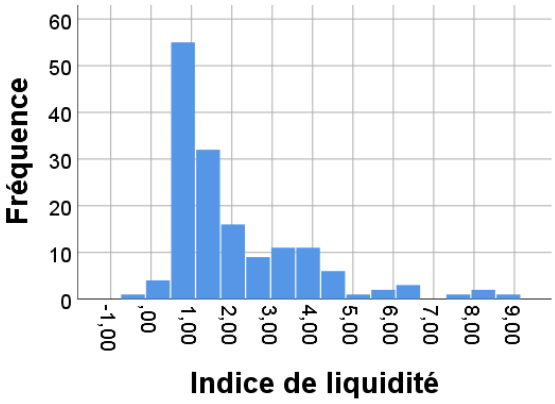
(c) Données avec VA corrigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM



(e) Données avec VA corrigées par D



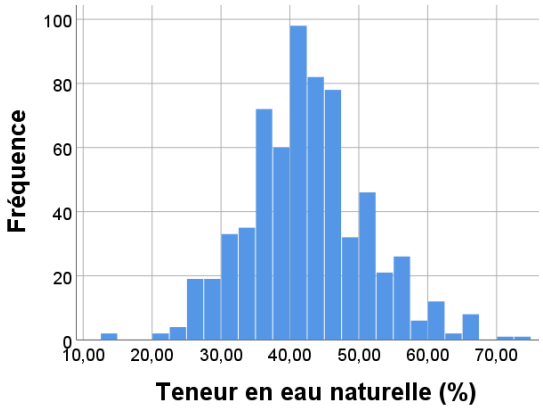
(f) Données avec VA supprimées par D

Figure 3-2: Histogrammes des données de l'indice de liquidité

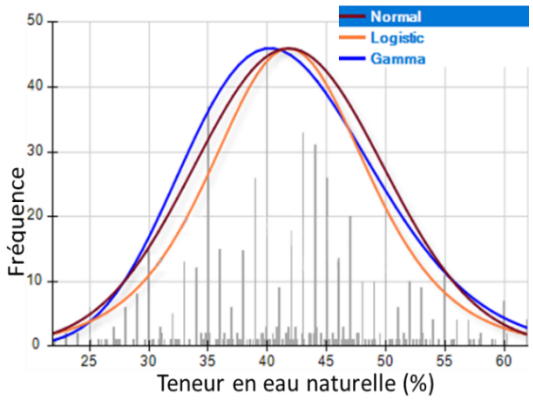
3.3.1.2. La teneur en eau

Les données de la teneur en eau sont au nombre de 659 elles proviennent d'essais laboratoires effectués pour des localités de Chicoutimi, Chicoutimi-Nord, Jonquière, La Baie, La Terrière, Shipshaw, Canton-Tremblay ainsi que de localités inconnues.

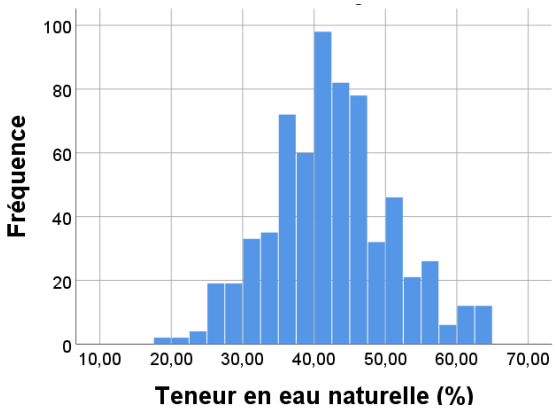
Les données suivent une loi normale avec une moyenne de 41,79%, un écart-type de 7,95% et un coefficient de variation (COV) de 19%. Ce sont les données où les VA ont été supprimées par la méthode BM qui ont donné les meilleurs résultats, la section (d) de la figure 3-3. Nous supposons donc que les VA sont d'origine épistémique. Les incertitudes obtenues donnent des valeurs nettement inférieures à celles attribuées à la teneur en eau, comprises entre 21,81% et 62%, par exemple une étude faite sur des échantillons du Fjord du Saguenay donne des valeurs comprises entre 50% et 154% (Locat et al, 1984). Selon Sobotka (1974), les valeurs élevées de la teneur en eau sont dues « à une structure floculée liée à un indice des vides important »; pourtant à l'issu d'essais de laboratoires effectués sur des échantillons dont l'indice des vides est compris entre 1 et 2,58, la teneur en eau n'excède pas 75%. L'observation de telles valeurs pour l'indice des vides peut être due à des erreurs de manipulation de données ou d'exécution d'essais.



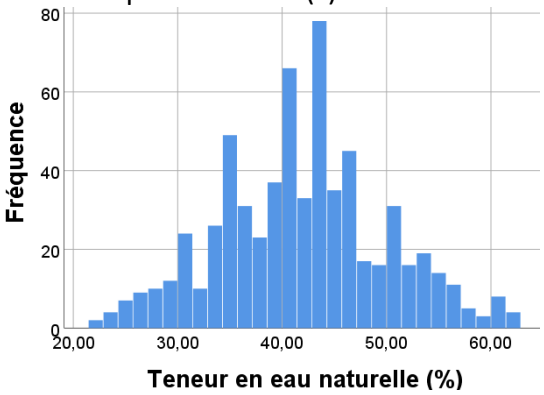
(a) Histogrammes des données initiales



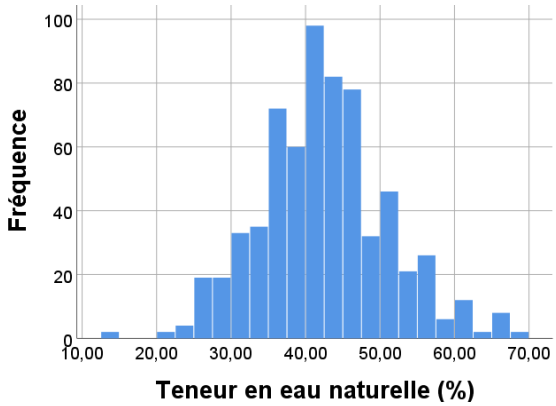
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



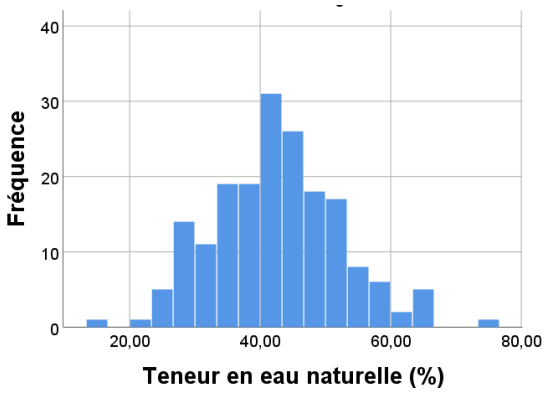
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM



(e) Données avec VA corrigées par D



(f) Données avec VA supprimées par D

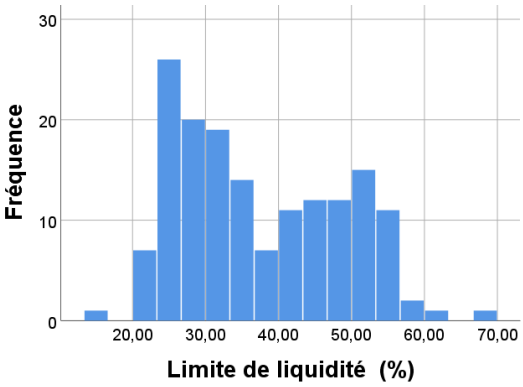
Figure 3-3: Histogrammes des données de l'indice de la teneur en eau naturelle

3.3.1.3. La limite liquidité

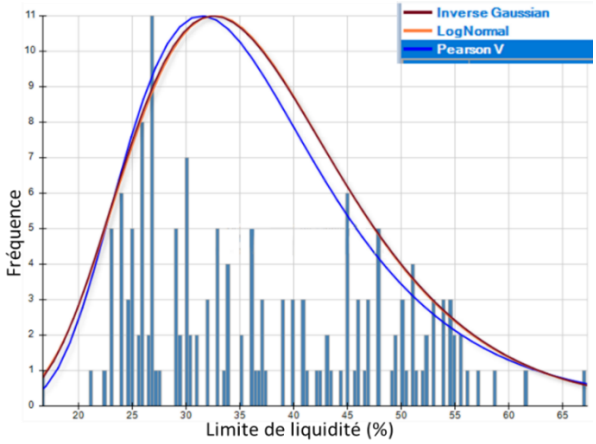
Les histogrammes de la figure 3-4 montrent dans la section (a) la distribution de 159 données initiales de la limite de liquidité et le résultat du test d'adéquation obtenu après simulation de ces mêmes données dans la section (b). En se référant à la définition de Barnett et Lewis (1994) à propos des valeurs aberrantes, il est possible de supposer l'existence de valeurs aberrantes; cependant ni la méthode de la boîte de moustaches ni celle de Doerffel, n'en a détectées. L'efficacité de ces deux méthodes de traitement pourrait être remise en cause mais ce n'est pas le cas, puisqu'il faut tenir compte de la variabilité inhérente du paramètre géotechnique, de l'hétérogénéité des échantillons étudiés et aussi de conditions climatiques lors des prélèvements d'échantillons. Voilà pourquoi nous nous fions aux deux méthodes de traitement d'autant plus qu'elles n'ont pas la même robustesse l'identification des valeurs aberrantes.

Les données sont concentrées à gauche, ce qui signifie que la teneur en eau limite pour passer d'un état de consistance liquide à plastique n'est pas très grande pour la plupart échantillons, plus précisément cette teneur serait en moyenne de 37,28%. Le COV étant de 3%, les données présentent une faible variabilité selon la loi inverse de Gauss et sont comprises entre 16,5% et 67,11%. Les valeurs de la limite de liquidité sont similaires à celles trouvées dans la revue de littérature : Leroueil et al (1983) pour les argiles de la mer Laflamme et Windisch et Yong (1990) pour les argiles de l'est Canada. En revanche des valeurs plus grandes ont été observées pour les argiles marines scandinaves (Windisch et

Yong, 1990), les argiles marines de la Finlande (D'Ignazio et al, 2016), de la suède (D'Ignazio et al, 2016), ces argiles ont respectivement des moyennes de 73%, 66,28%, 71,06% et des écart-types de 25,37%, 19,75%, 28,13%. Des valeurs avoisinant 200% ont même été identifiées pour les argiles de Suède (D'Ignazio et al, 2016).



(a) Histogrammes des données initiales



(g) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)

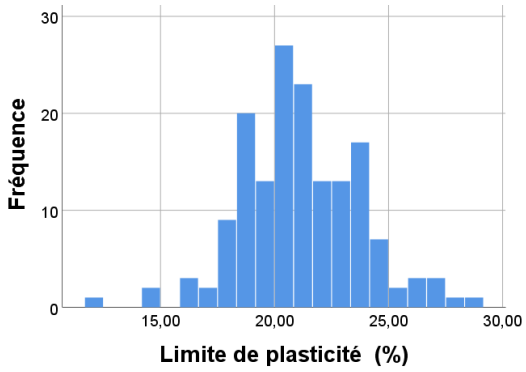
Les méthodes de traitement n'ont détecté aucune valeur aberrante

Figure 3-4: Histogrammes des données de la limite de liquidité

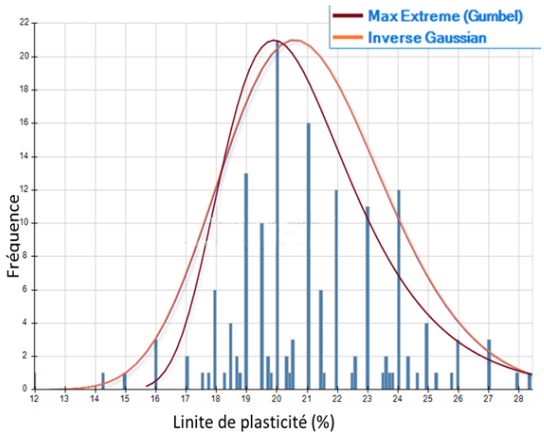
3.3.1.4. La limite de plasticité

La limite de plasticité compte pour 160 données prélevées dans les zones de Chicoutimi, Chicoutimi-Nord, Hébertville-Station, Jonquière, La Baie, La Terrière, Shipshaw, Canton-Tremblay ainsi qui de localités inconnues. Seule la méthode de la boîte de moustaches décèle des valeurs aberrantes (figure 3-5). Les résultats du test d'adéquation contribuent au choix d'une origine déterministe pour les valeurs aberrantes détectées par la méthode de la boîte de moustaches car en dépit du traitement de VA, le meilleur résultat

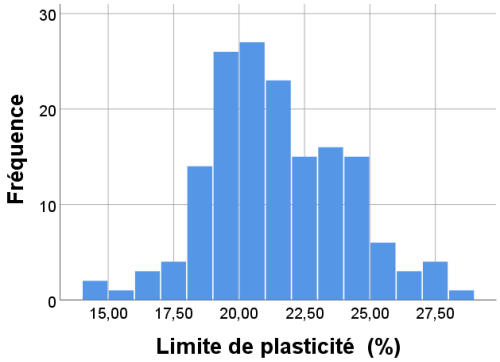
du test d'adéquation reste celui obtenu avec les données initiales et la loi adéquate est celle de Gumbel avec une COV de 14%. Les données, comprises entre 11% et 28,4%, sont plus concentrées vers la gauche comme celle de la limite de liquidité et sont à peu près similaires à celle de la revue de littérature des argiles marines de l'est Canada. Cependant dans certaines localités comme à Kinburn au Québec, il est possible d'observer des valeurs de la limite de plasticité supérieures à 30% (Blanchette, 2016). Les données des argiles scandinaves sont similaires à celles étudiées avec une moyenne de la limite de liquidité d'environ 26,35% (Windisch et Yong, 1990). Selon les données d'échantillons mis à notre disposition, au-delà d'une teneur en eau d'environ 21%, une consistance solide ne serait plus observable.



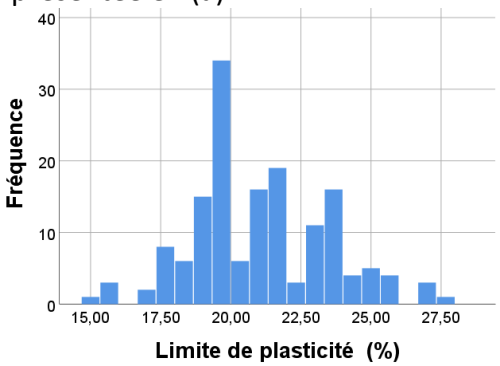
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)



(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

La méthode D n'a détecté aucune valeur aberrante

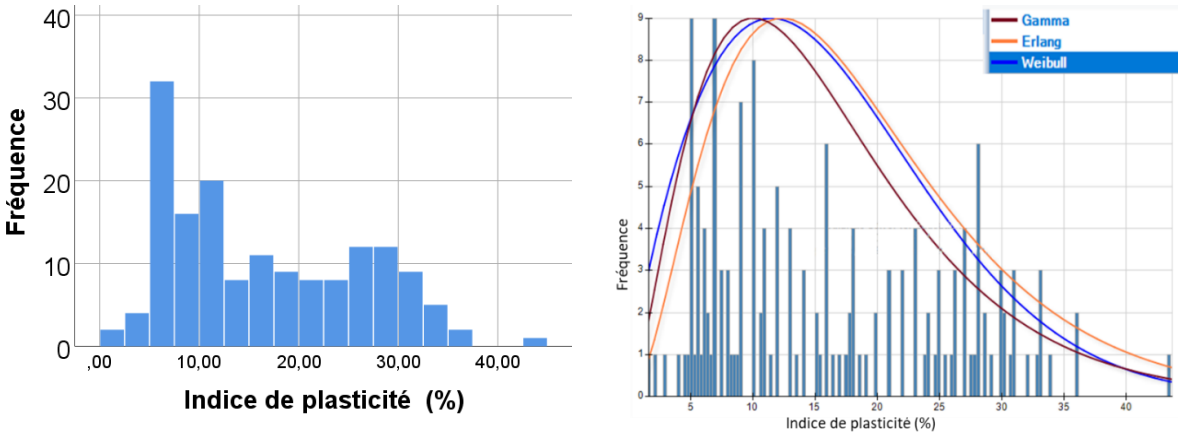
Figure 3-5: Histogrammes des données de la limite de plasticité

3.3.1.5. L'indice de plasticité

L'indice de plasticité compte en tout 159 données mesurées à Chicoutimi, Chicoutimi-Nord, Hébertville-Station, Jonquière, La Baie, La Terrière, Shipshaw, Canton-Tremblay ainsi qui de localités inconnues. Les méthodes de la boîte de moustaches et de Doerffel n'ont pas décelé de valeur aberrante malgré le détachement qui se situe à l'extrême droite de la distribution des données initiales (section (a) de la figure 3-6). Nous

supposons donc que ce détachement est dû à la variabilité inhérente de l'indice de plasticité.

La meilleure loi de distribution obtenue pour les données est la loi Gamma. Il existe une grande variabilité des données qui se traduit par un COV de 61%. La moyenne représentative est de 16,9% avec un écart-type de 9,9%; la quantité de minéraux argileux contenus dans les échantillons étudiés est donc variable avec des valeurs d'indice de plasticité ne dépassant pas 44%. Les incertitudes obtenues pour l'IP donnent des valeurs inférieures par rapport à celles trouvées pour les argiles scandinaves (Windisch et Yong, 1990; D'Ignazio et al, 2016). Des indices de plasticité de 240% par exemple, ont été observées pour des échantillons d'argiles danoises (Sorensen, 2013). Cela pourrait signifier que l'agile de la région SLSJ et moins plastique par rapport aux régions mises en comparaison.



(a) Histogrammes des données initiales

(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)

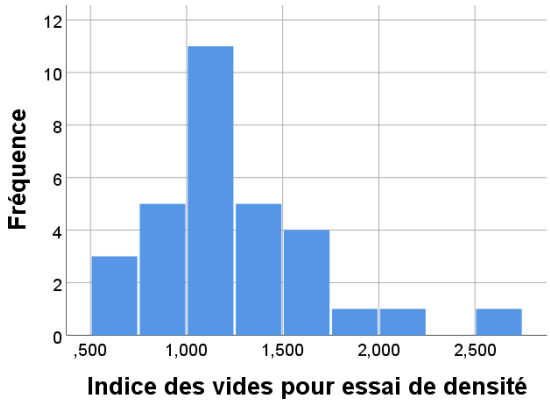
Les méthodes de traitement n'ont détetcté aucune valeur aberrante

Figure 3-6: Histogrammes des données de l'indice de plasticité

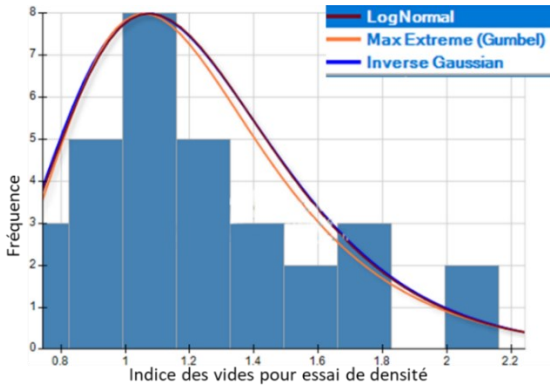
3.3.1.6. L'indice des vides et la porosité

L'indice des vides a été déterminée au moyen de deux essais différents : l'essai de densité relative (31 données) et l'essai de consolidation œdométrique (25 données). Il faut préciser que les essais n'ont pas été réalisés simultanément sur les mêmes échantillons. L'indice des vides a été mesurée pour les zones de Chicoutimi, Chicoutimi-Nord et des localités inconnues. La porosité quant à elle est calculée par la relation : $n = \frac{e_0}{1+e_0}$, où n désigne la porosité et e_0 les données de l'indice des vides. Les figures 3-7 et 3-8 montrent respectivement les histogrammes des différentes données de l'indice des vides issues de l'essai de densité et de l'essai de consolidation œdométrique. Les figures 3-9 et figure 3-10 montrent les histogrammes des données de la porosité respectivement de l'essai de densité et de l'essai de consolidation œdométrique.

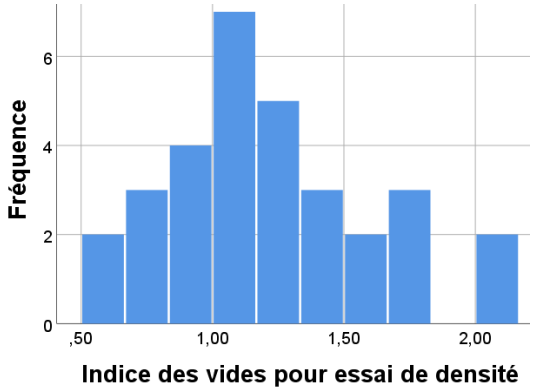
Indépendamment des essais effectués, la loi d'Erlang a été retenue pour les données de l'indice des vides dont les VA ont été corrigées ou supprimées par la méthode BM. Cette distribution indique une très forte concentration des données vers la gauche, avec une moyenne oscillant autour de 1,1. C'est une valeur qui varie légèrement selon le COV (26%), cependant elle indique que la quantité des vides est souvent supérieure à celle des grains, d'où l'éventualité d'une faible cohésion entre les grains constituant le matériau. La méthode D n'a détecté aucune valeur aberrante pour les données de la porosité mesurée à l'aide de l'essai de consolidation œdométrique.



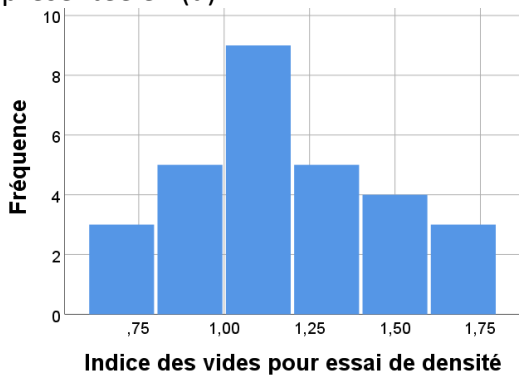
(a) Histogrammes des données initiales



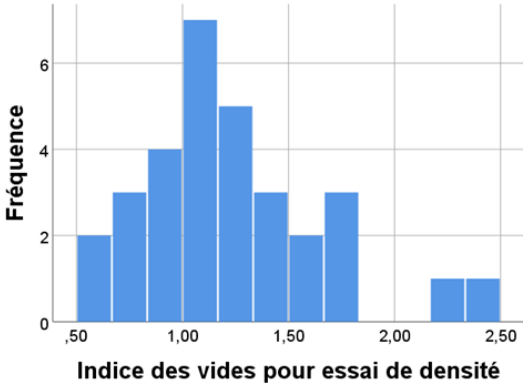
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (d)



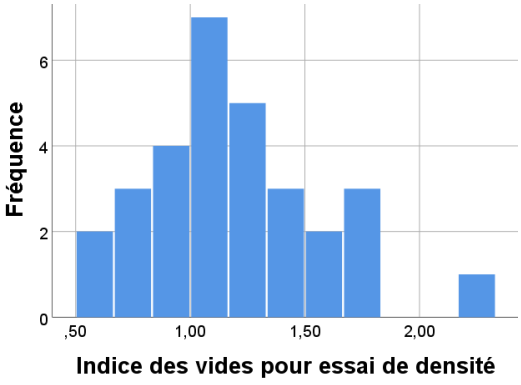
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

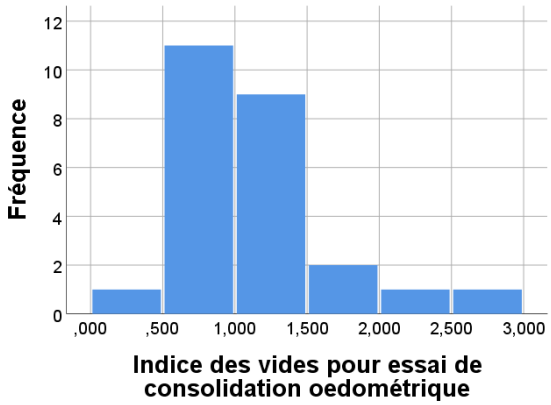


(e) Données avec VA corrigées par D

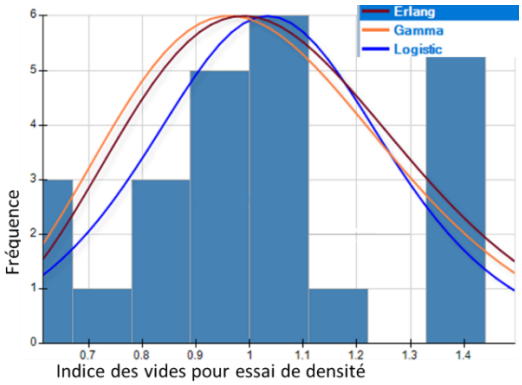


(f) Données avec VA supprimées par D

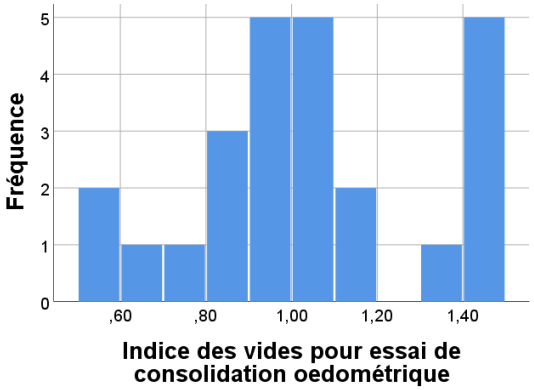
Figure 3-7: Histogrammes des données de l'indice des vides mesurées par essai de densité



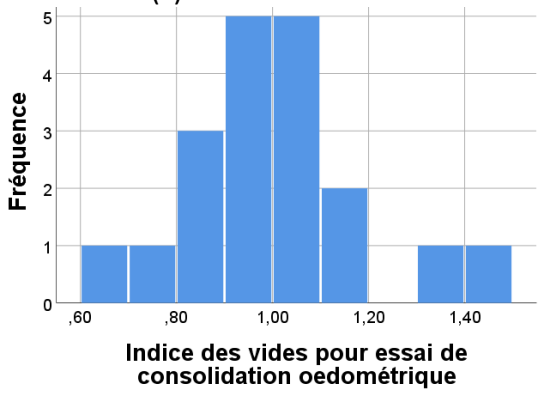
(a) Histogrammes des données initiales



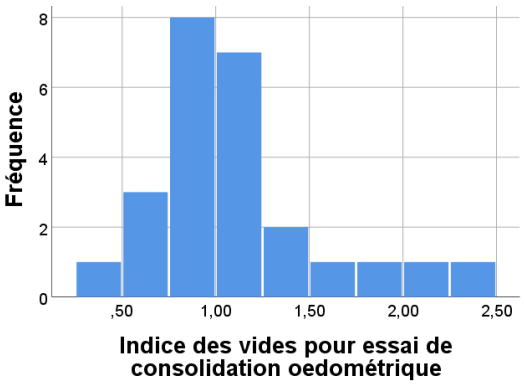
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



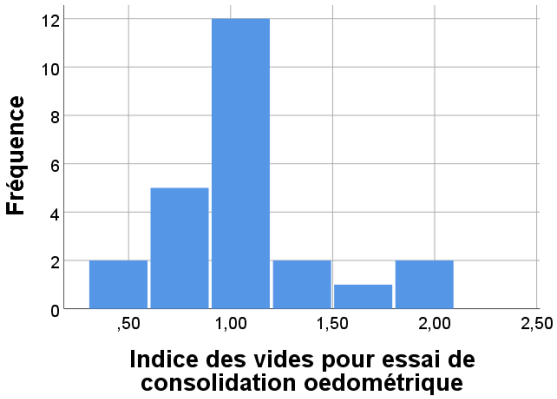
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

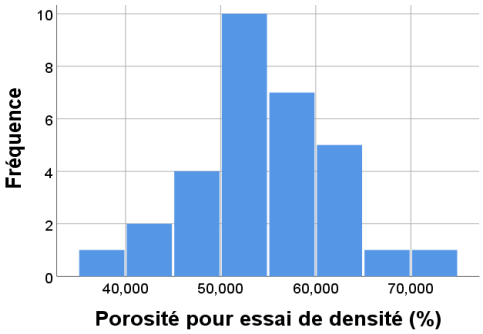


(e) Données avec VA corrigées par D

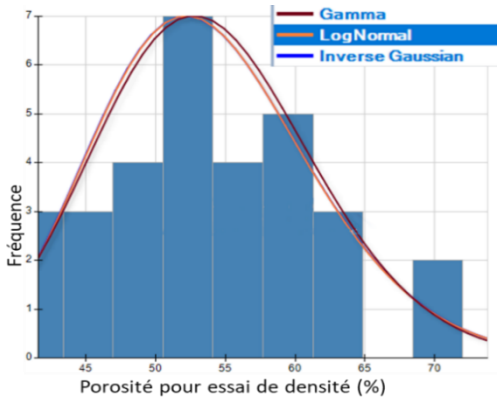


(f) Données avec VA supprimées par D

Figure 3-8: Histogrammes des données de l'indice des vides mesurées par essai de consolidation œdométrique

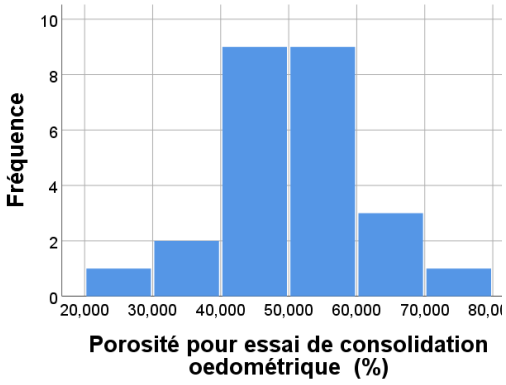


(a) Histogrammes des données initiales

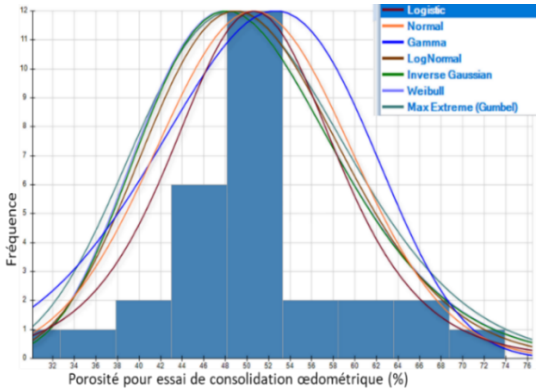


(b)Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)

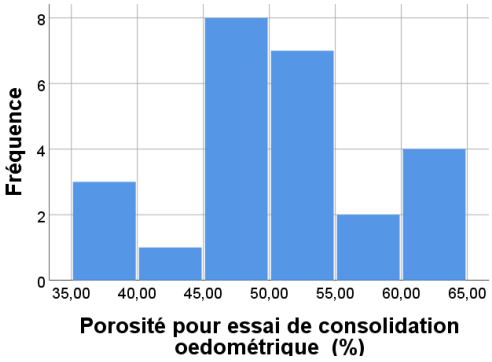
Figure 3-9: Histogrammes des données de la porosité mesurées par essai de densité



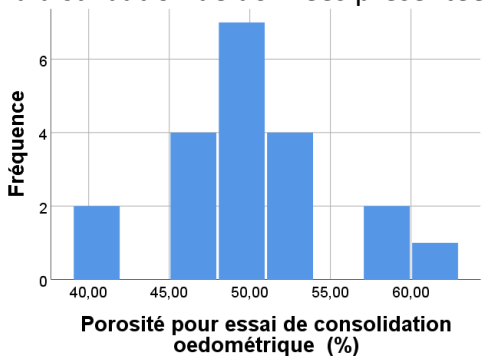
(a)Histogrammes des données initiales



(b)Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



(c)Données avec VA coorigées par BM



(d)Données avec VA supprimées par BM

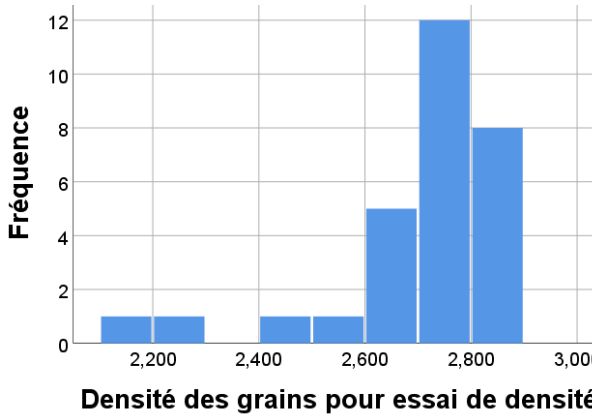
La méthode D n'a détecteé aucune valeur aberrante

Figure 3-10: Histogrammes des données de la porosité mesurées par essai de consolidation œdométrique

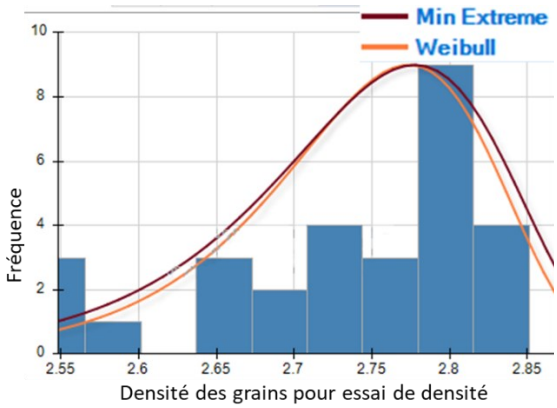
3.3.1.7. La densité des grains

La densité des grains a été déterminée au moyen de l'essai de densité relative (29 données) et l'essai de consolidation œdométrique (22 données). La densité des grains est mesurée pour les zones de Chicoutimi, Chicoutimi-Nord et des localités inconnues. La méthode de la boîte de moustaches a identifié des valeurs aberrantes parmi les données provenant des deux essais. La méthode de la boîte de moustaches a identifié des valeurs aberrantes. Les figure 3-11 et figure 3-12 montrent les histogrammes issus des données respectivement de l'essai de densité relative et de l'essai de consolidation œdométrique.

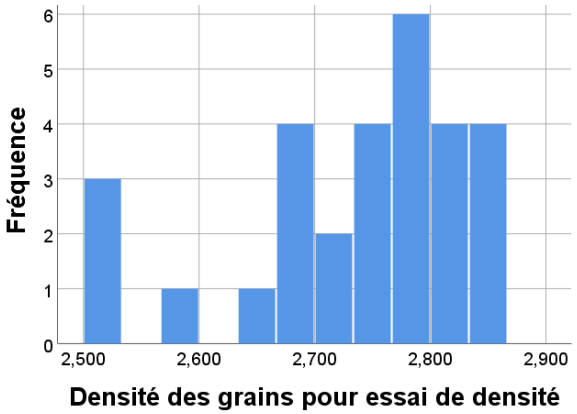
La loi de distribution adéquate ne fait pas l'unanimité pour les données de la densité des grains mesurés par les étudiants de l'UQAC. Selon les essais de densité des grains et de consolidation œdométrique les meilleures lois de probabilités obtenues sont respectivement la loi du minimum généralisé (*Min Extreme*) et la loi de Weibull. Suivant la loi de Weibull les données sont fortement concentrées avec un COV inférieur à 3% et une moyenne de 2,75, valeur caractéristique de la densité relative d'un échantillon d'argile. Une moyenne représentative de 2,75 a également été déterminée par Leroueil et al (1983) concernant les argiles de l'est du Canada.



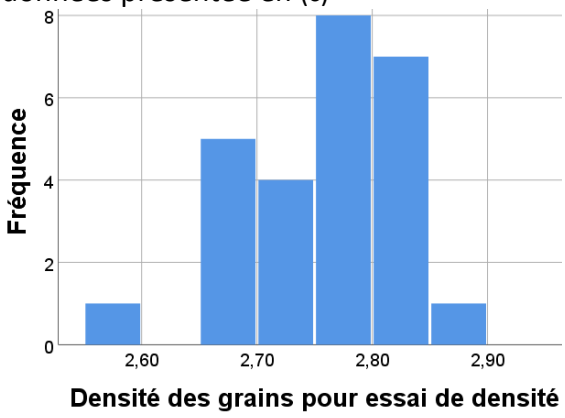
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



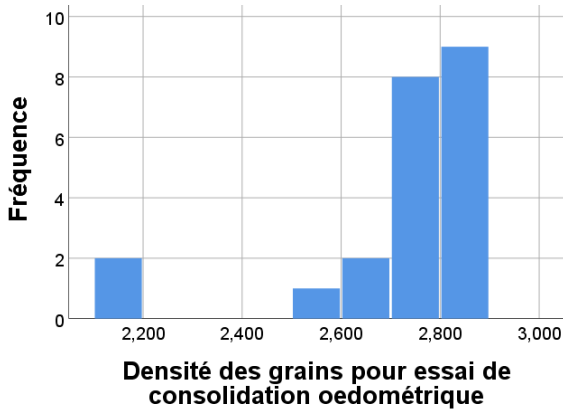
(c) Données avec VA coorigées par BM



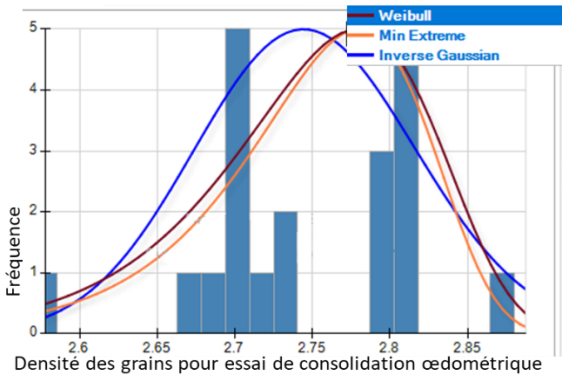
(d) Données avec VA supprimées par BM

La méthode D n'a détecteé aucune valeur aberrante

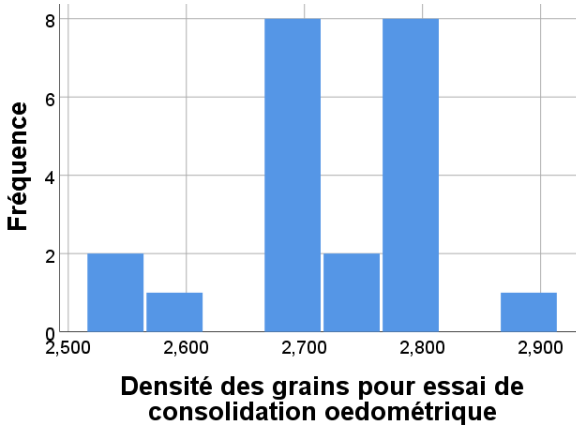
Figure 3-11: Histogrammes des données de la densité des grains mesurées par essai de densité



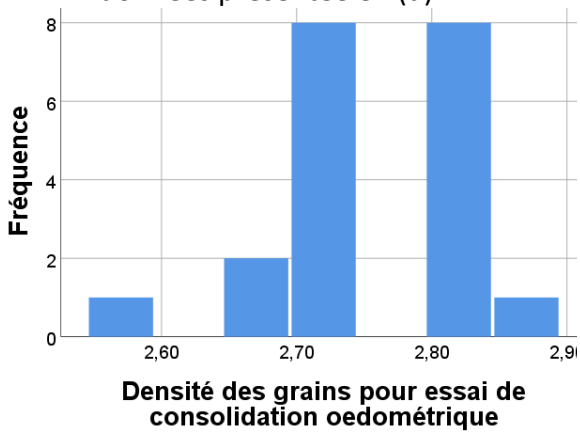
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (d)



(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

La méthode D n'a détecté aucune valeur aberrante

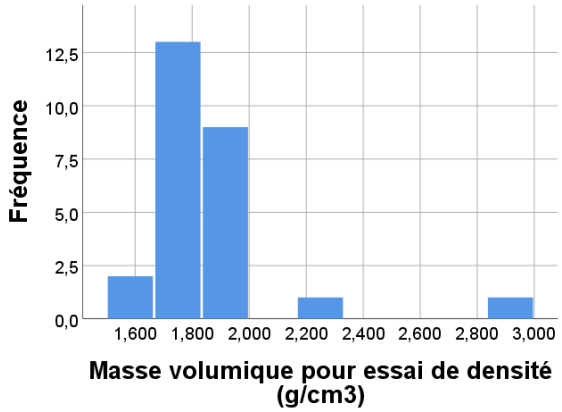
Figure 3-12: Histogrammes des données de la densité des grains mesurées par essai de consolidation œdométrique

3.3.1.8. La masse volumique

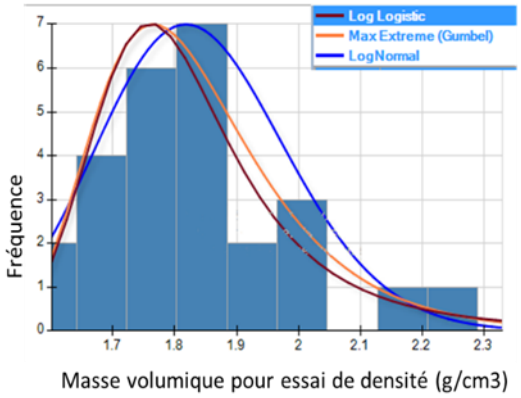
La masse volumique a été déterminée au moyen de deux essais différents : l'essai de densité relative (26 données) et l'essai de consolidation œdométrique (2 données). Les données sont recueillies pour les zones de Chicoutimi, et des localités inconnues. La

méthode de la boîte de moustaches a identifié des valeurs aberrantes parmi les données provenant des deux essais (figure 3-13 et figure 3-14).

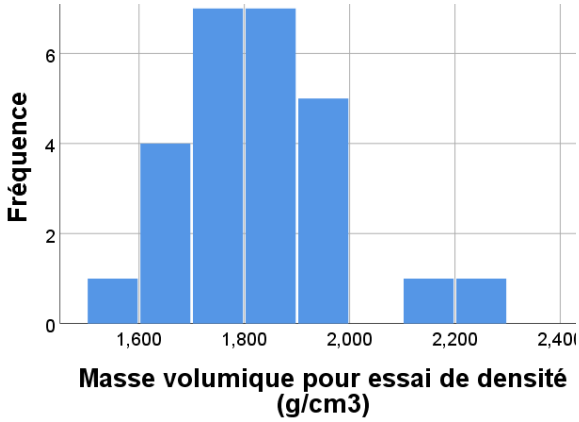
La loi log logistique est unanimement la meilleure loi observée pour les données de la masse volumique. Les moyennes sont comprises entre 1,84 g/cm^3 et 2,07 g/cm^3 et la distribution est très peu variante pour les données mesurées par les deux types d'essais.



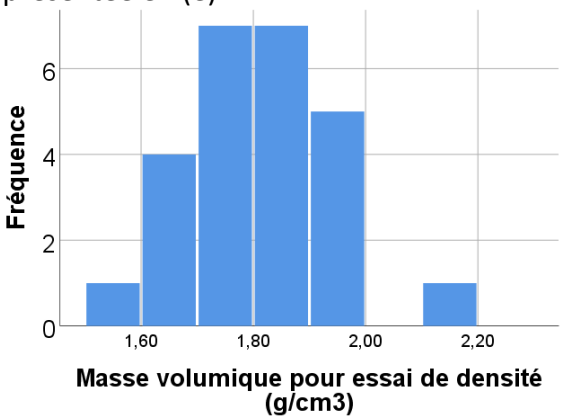
(a) Histogrammes des données initiales



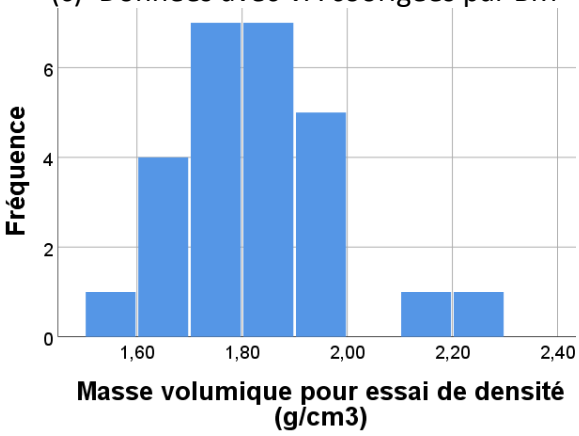
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (e)



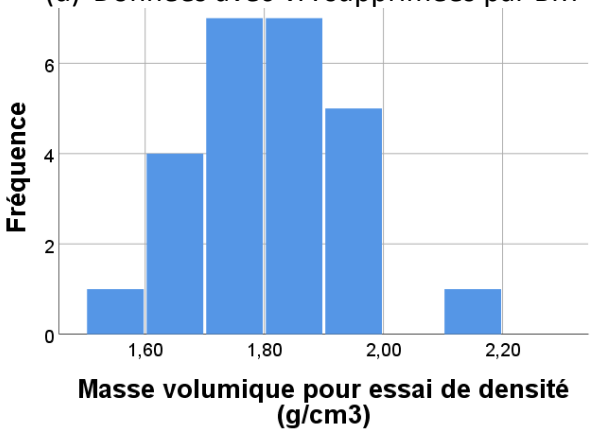
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

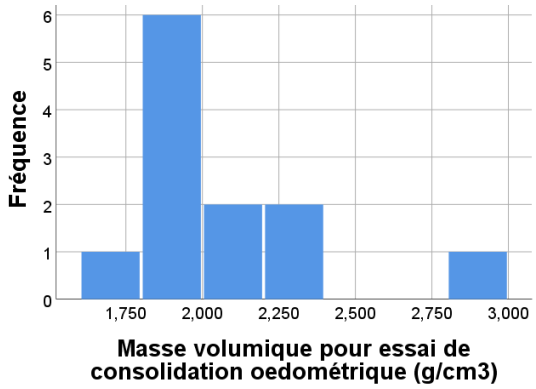


(e) Données avec VA corrigées par D

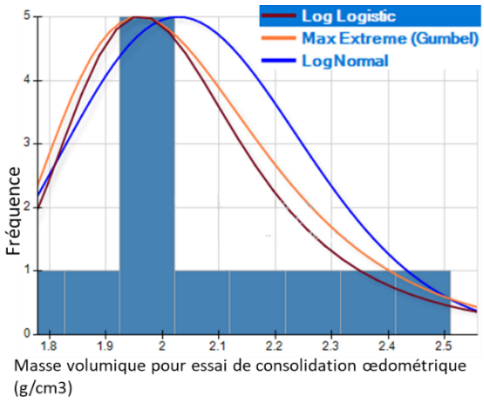


(f) Données avec VA supprimées par D

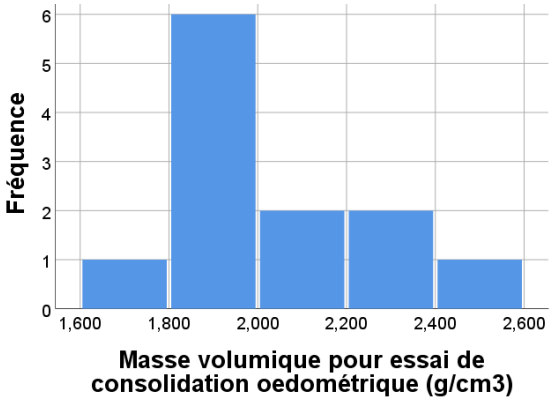
Figure 3-13: Histogrammes des données de la masse volumique mesurées par essai de densité



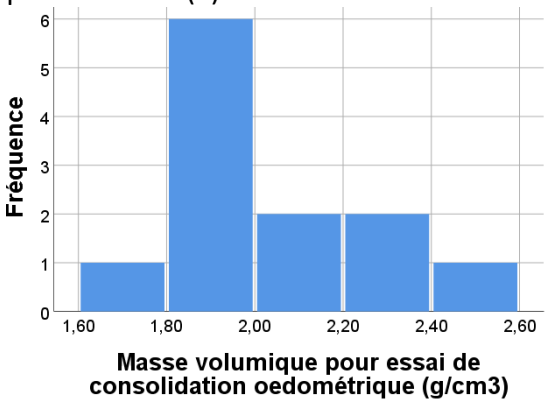
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)



(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

La méthode D n'a détecteé aucune valeur aberrante

Figure 3-14: Histogrammes des données de la masse volumique mesurées par essai de consolidation œdométrique

3.3.2. Résultats pour les paramètres mécaniques

Les paramètres mécaniques désignent les propriétés mécaniques de l'échantillon étudié : le comportement, la réaction, que peut avoir ce matériau sous l'effet d'une contrainte. Plusieurs paramètres mécaniques de l'argile sont considérés afin de déterminer leurs incertitudes, il s'agit de la sensibilité au remaniement, la résistance de l'échantillon remanié

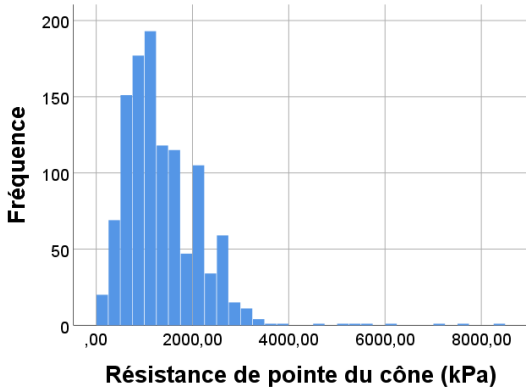
et non remanié, la contrainte de préconsolidation, le coefficient de surconcolidation, le nombre de coups (essai de pénétration standard), la résistance de pointe et la résistance au frottement latéral du cône (essai de pénétration au cône).

3.3.2.1. La résistance de pointe, Q_c, et la résistance au frottement latéral, f_s

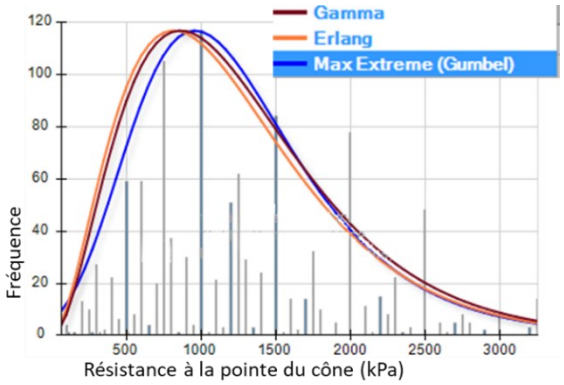
Dans les localités de Chicoutimi, La Baie, Jonquière, Laterrière, Shipshaw et Canton-Tremblay 1128 données de la résistance de pointe et 1130 données de la résistance au frottement latéral du cône sont recueillies à l'issu d'un essai de pénétration au cône. À cause de la taille des échantillons supérieure à 1000 la méthode de Doerffel (Wellmer, 1998; Lacaze et al., 1997) n'a pas pu être appliquée lors du traitement de VA. La suppression des valeurs aberrantes détectées à l'aide la méthode de la boîte à moustaches ne suffisait pas pour éliminer toutes les valeurs aberrantes contenues dans les données des deux paramètres géotechniques, nous avons donc supposé que ces valeurs aberrantes étaient stochastiques. Pour la résistance de pointe, les meilleurs résultats sont observés pour les données initiales (section (a) de la figure 3-15). En ce qui concerne à la résistance aux frottements, ce sont les données dont les VA ont été corrigées par la méthode BM qui ont fourni la meilleure loi de distribution apparente (figure 3-16).

La résistance de pointe et la résistance au frottement sont des paramètres mécaniques qui servent à estimer la capacité portante d'un sol et aussi sa capacité à résister au glissement. Ces paramètres augmentent avec la profondeur. Plus les valeurs de Q_c et f_s sont élevées plus grande est la capacité portante du sol étudié. Les rapports d'essais CPT

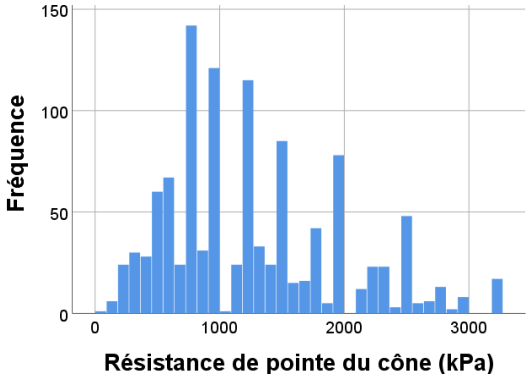
obtenus à travers le PACES, n'a pas fourni la granulométrie des échantillons étudiés, la possibilité que ces échantillons soient des composés hétérogènes de sol, n'est pas exclue. Des valeurs entre 60 kPa et 8300 kPa, entre 8 kPa et 633 kPa ont été observées respectivement pour Q_c et pour f_s. Concernant les argiles de Leda (Nader, 2004) des valeurs comprises entre 100 kPa et 8000 kPa ont été trouvées pour Q_c puis entre 100 kPa et 650 kPa pour f_s. Il existe aussi une grande variabilité qui se traduit par un COV de 56% et une moyenne de 1271,96 kPa pour Q_c selon la loi Gamma, par un COV 66% de et une moyenne de 37,93 kPa pour f_s selon la loi log normale.



(a) Histogrammes des données initiales



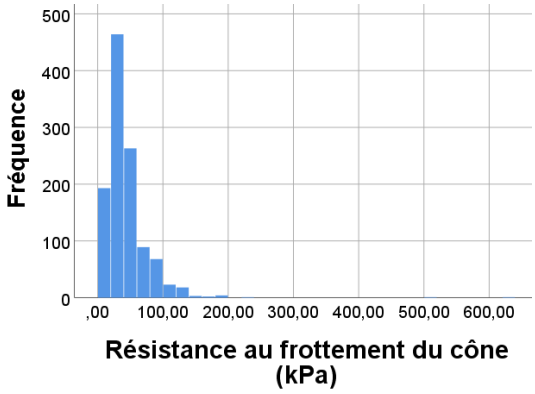
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)



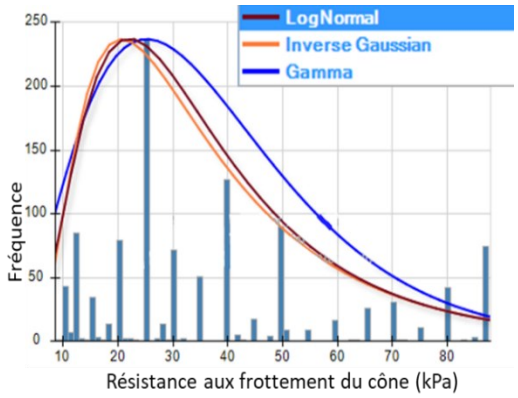
(c) Données avec VA coorigées par BM

La méthode D impossible à appliquer à cause du grand nombre de l'échantillon

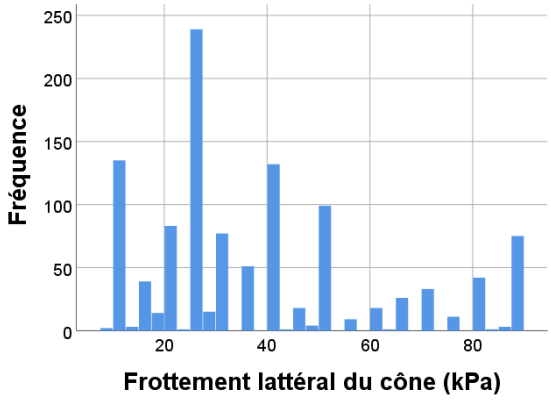
Figure 3-15: Histogrammes des données de la résistance de pointe mesurées par essai CPT



(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)



(c) Données avec VA coorigées par BM

La méthode D impossible à appliquer à cause du grand nombre de l'échantillon

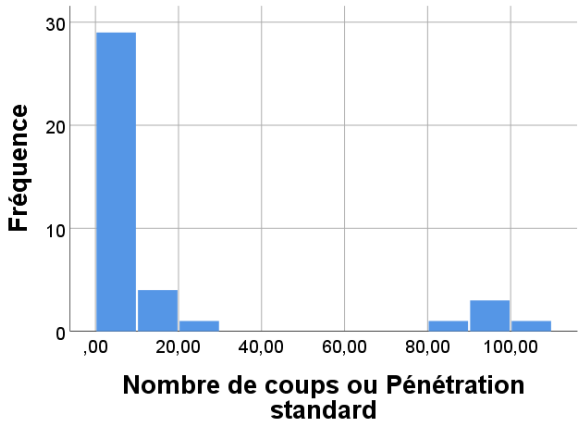
Figure 3-16: Histogrammes des données de la résistance aux frottements mesurées par essai CPT

3.3.2.2. Nombre de coups, N

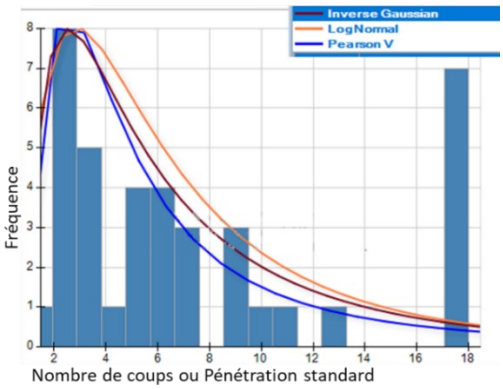
Au cours de la réalisation de l'essai de pénétration standard, ce sont 39 données qui ont été mesurées à La Baie et à Jonquière en ce qui concerne le nombre de coups. La figure 3-17 montre les différents histogrammes obtenus après le traitement de valeurs aberrantes

et le test d'adéquation. Les données dont les VA ont été supprimées par la méthode BM ont fourmi le meilleur résultat (section (d) de la figure 3-17).

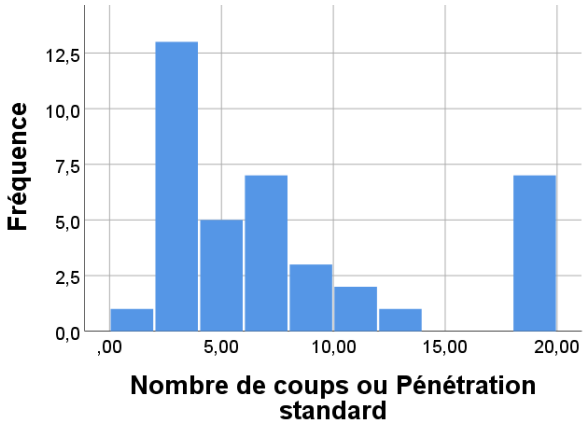
L'essai SPT, principalement à l'aide du nombre de coups, *N*, permet lui aussi de calculer la capacité portante d'un sol. Habituellement de grandes valeurs de *N* sont observées pour les sols compacts d'autant plus que l'essai SPT n'est pas recommandé pour évaluer la portance d'un sol cohérent. Dans le présent cas des valeurs au-delà de 80 ont été obtenues pour certains échantillons d'argile avec plus de la moitié qui possède un nombre de coups supérieur à 5. Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat : soit les échantillons sont hétérogènes ou il s'agirait d'échantillons d'argile ayant une consistance très solide ce qui serait peu probable vues les valeurs d'indice de liquidité. Une moyenne de 7 avec un écart-type de 7 représentent les meilleures valeurs des incertitudes déterminées par la loi inverse de Gauss, néanmoins la grande variabilité de *N*, se traduit par un COV égal à 1. Compte tenu de la grande variabilité et des valeurs sur élevées de *N* pour les échantillons étudiés il est possible de conclure à la présence d'une importante hétérogénéité dans les sols des localités concernées. Nadar (2004) suppose que les valeurs élevées de *N* sont dues à une interstratification des couches d'argiles avec d'autres couches.



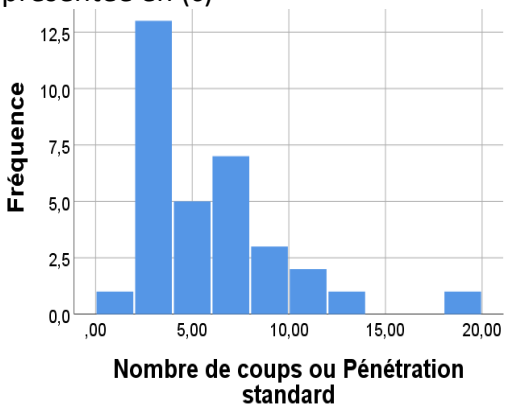
(a) Histogrammes des données initiales



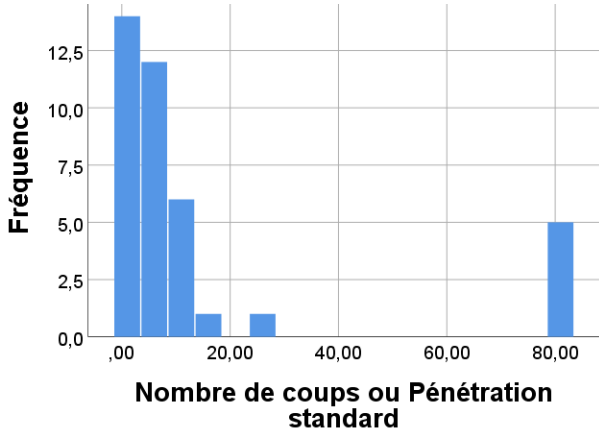
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



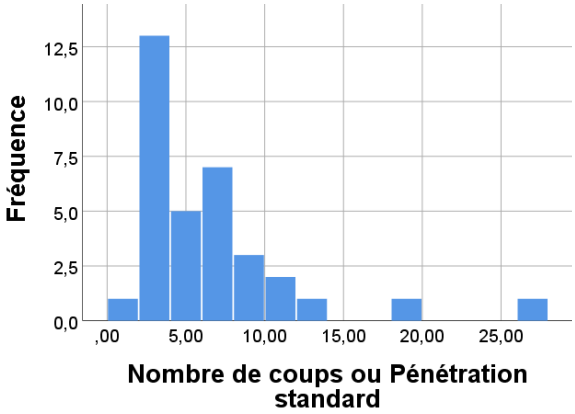
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM



(e) Données avec VA corrigées par D



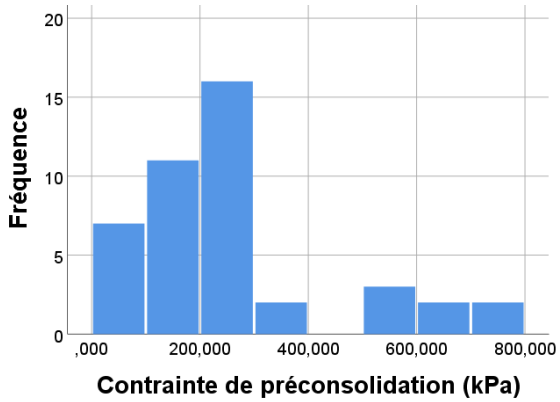
(f) Données avec VA supprimées par D

Figure 3-17: Histogrammes des données du nombre de coups mesurées par essai SPT

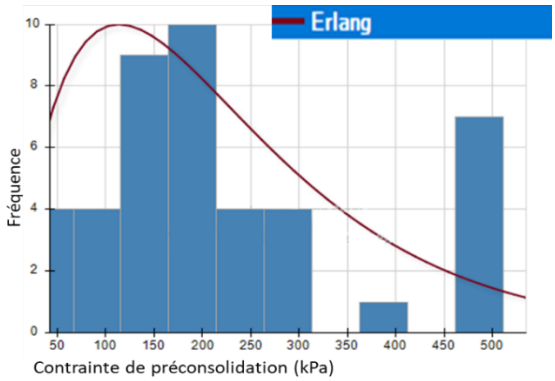
3.3.2.3. La contrainte de pré consolidation

Il y a 43 données de la contrainte de pré consolidation obtenues pour les localités de Chicoutimi, Chicoutimi-nord, La Baie, Jonquière et des localités inconnues de la région SLSJ. La méthode de Doerffel n'a pas identifié de valeur aberrante parmi les données qui ont été recueillies. Selon la représentation graphique de Barnett et Lewis (1994) (figure 2-1), tous les histogrammes de la figure 3-18 montrent l'existence de valeurs extrêmes et cela malgré la correction de ces valeurs aberrantes. Cependant ce sont les données dont les valeurs aberrantes ont été corrigées qui fournissent le meilleur résultat du test d'adéquation section (c) de la figure 3-18. Il est donc possible de supposer que ces valeurs aberrantes sont d'origine épistémique.

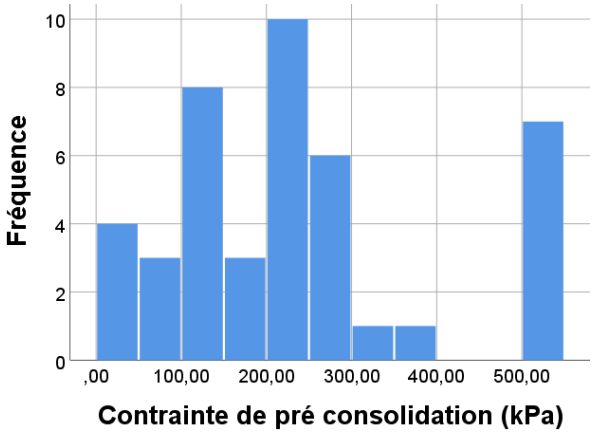
La contrainte de pré consolidation correspond à la plus grande charge qu'un échantillon ait pu supporter au cours de son histoire géologique. Avec la loi de Erlang, les données de la contrainte de pré consolidation présentent une faible variabilité, pour une moyenne de 224 kPa et un COV de 10%. Ces incertitudes sont environnantes des valeurs trouvées dans les œuvres de plusieurs auteurs (Windisch et Yong, 1990; Bouchard et al, 1983), des valeurs comprises entre 200 et 1000 kPa pour des échantillons de Saint-Jean-Vianney (Bouchard et al, 1983). Néanmoins les valeurs recueillies dans cette étude montrent des incertitudes nettement supérieures à celles des argiles finlandaises (D'Ignazio et al, 2016) pour une moyenne de 96,03 kPa et un COV de 51%, des argiles suédoises (D'Ignazio et al, 2016) ayant 79,62 kPa de moyenne et 72,6% de COV.



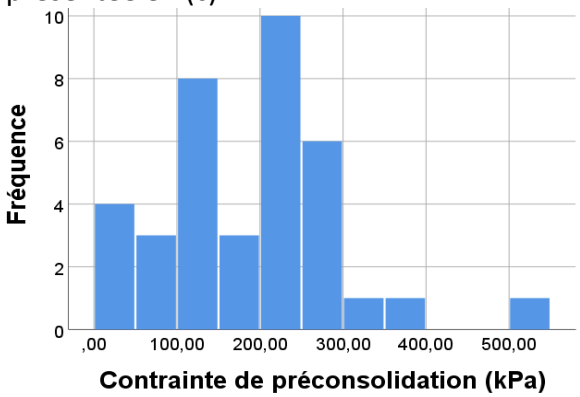
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

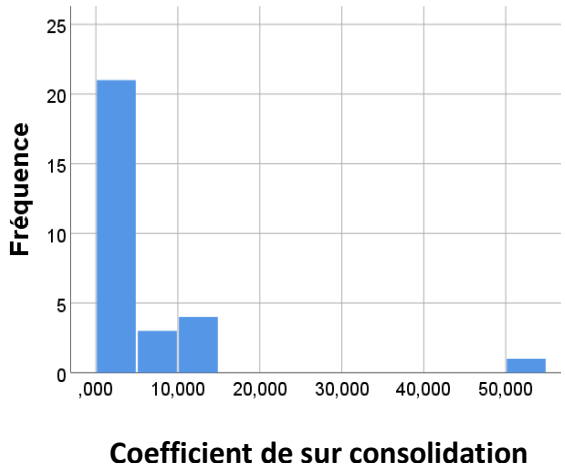
La méthode D n'a détecteé aucune valeur aberrante

Figure 3-18: Histogrammes de données de la contrainte de préconsolidation

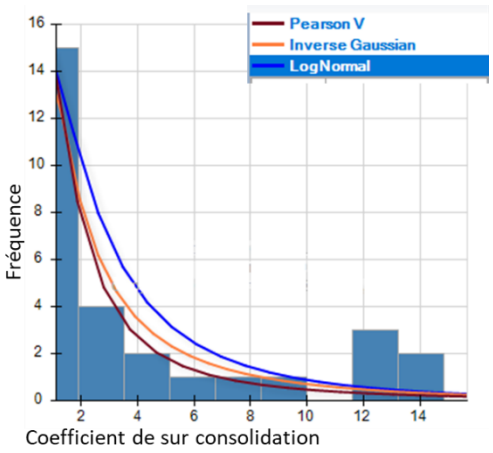
3.3.2.4. Le coefficient de sur consolidation

Les 29 données du coefficient de sur consolidation ont été recueillies à Chicoutimi, Chicoutimi-nord et des localités non indiquées de la région SLSJ. La valeur aberrante détectée aussi bien par la méthode de la boîte de moustaches que par celle de Doerffel était extrême, plus précisément d'une valeur de 50. La correction de cette valeur aberrante a donné un meilleur résultat que sa suppression (figure 3-19).

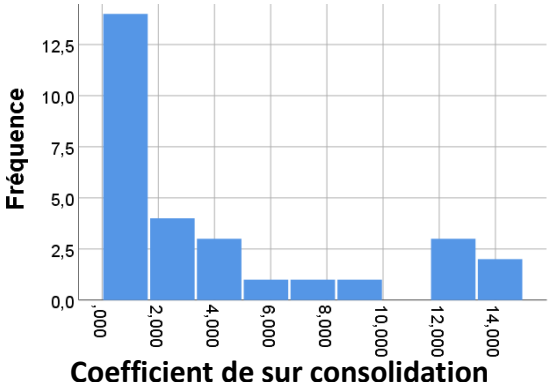
Les données du coefficient de sur consolidation *OCR*, ne présentent pas une grande variabilité. Le meilleur résultat du test K a été observé pour les données ont été dont la valeur aberrante a été corrigée BM, il s'agissait d'une seule valeur de *OCR* équivalente à 50. Environ 79% des échantillons étudiés sont sur consolidés cette observation rejoint celle qu'évoque Bouchard et al (1983) comme quoi les argiles de la mer Laflamme sont fortement sur consolidées. Les argiles de Leda étudiées par Nadar (2004) sont sur consolidées, pour un coefficient de consolidation de 3,5 en moyenne; tout comme celles de la Finlande et de la Suède (D'Ignazio et al, 2016).



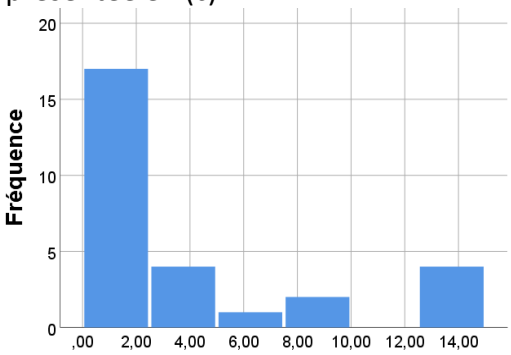
(a) Histogrammes des données initiales



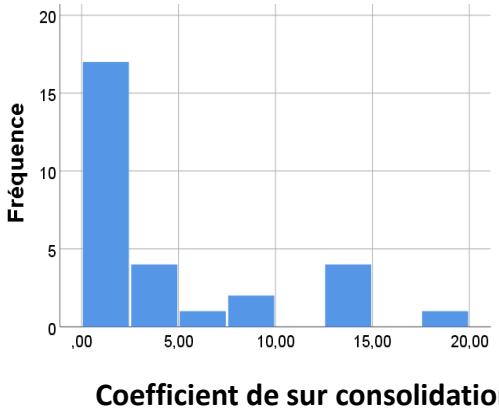
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



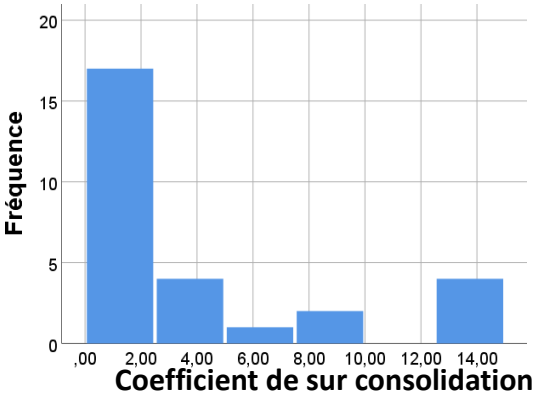
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM



(e) Données avec VA corrigées par D



(f) Données avec VA supprimées par D

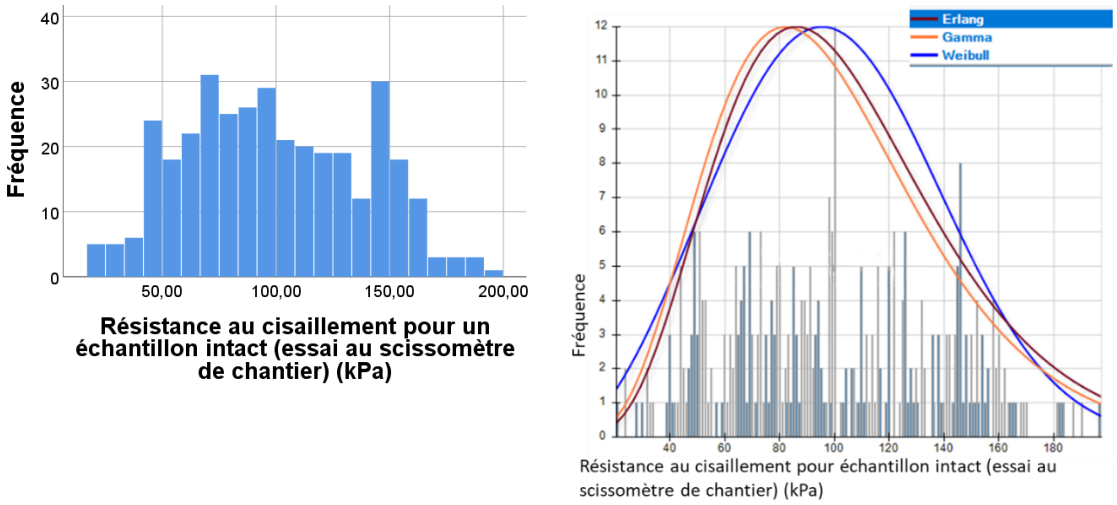
Figure 3-19: Histogrammes des données du coefficient de surconsolidation

3.3.2.5. Résistances au cisaillement et sensibilité

Les résistances au cisaillement ainsi que la sensibilité ont été évaluées grâce à deux essais différents sur les localités de Chambord, Chicoutimi, Jonquière, La Baie, Shipshaw, Canton-Tremblay et des zones inconnues de la région SLSJ : l'essai au scissomètre de chantier (S_u, S_{ur}, S_t) et l'essai de pénétration au cône suédois (S_{uc}, S_{urc}, St_c). Il y a environ 49 échantillons qui ont fait l'objet de l'essai de pénétration au cône suédois. Pour l'essai de scissomètre au chantier, 352 données ont été recueillies pour la résistance au cisaillement d'échantillon intact, 61 données pour la résistance au cisaillement d'échantillon remanié et 403 données pour la sensibilité. Les figures 3-20, 3-21, 3-22, 3-23, 3-24 et 3-25 montrent, pour chaque paramètre mécanique mesuré, les différents ensembles de données soumises au test d'adéquation ainsi qu'une simulation des données qui ont présenté le meilleur résultat.

Indépendamment du type d'essai réalisé, les données de la résistance au cisaillement pour échantillons remaniés ainsi que celles de la sensibilité présentent des COV supérieures à 100%, voire égale à 500% pour le paramètre S_t par exemple. Les valeurs de sensibilité mesurées au scissomètre de chantier et au cône suédois indiquent que la plupart des échantillons étudiés sont très sensibles et 46% des échantillons sont extrêmement sensibles. Les valeurs de S_u varient moyennement (COV=42%) tandis que celles de S_{uc} varient (COV=74%) beaucoup avec des moyennes respectives de 99,27 kPa et 72,16 kPa. Selon les incertitudes de la résistance au cisaillement d'échantillons intacts, environ 45%

ont une consistance raide. Les incertitudes provenant des mêmes paramètres pour les argiles scandinaves ne sont pas aussi élevées que celles de l'est Canada qui sont quant à elles plus ou moins similaires aux incertitudes de la présente étude. En effet les argiles scandinaves doivent leur résistance à la cimentation. Toutefois des valeurs extrêmement élevées de la sensibilité sont observables pour toutes ces régions.

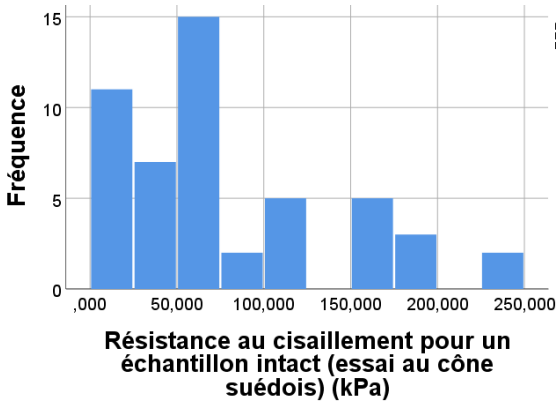


(a) Histogrammes des données initiales

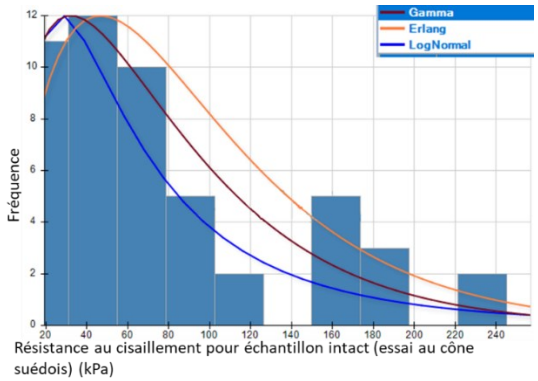
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)

Les méthodes de traitement n'ont détecté aucune valeur aberrante

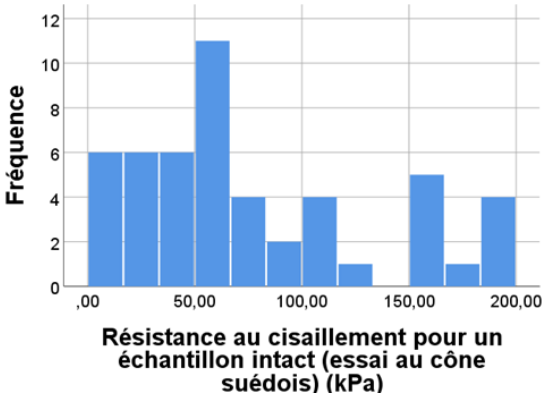
Figure 3-20: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon intact mesurées au scissomètre de chantier



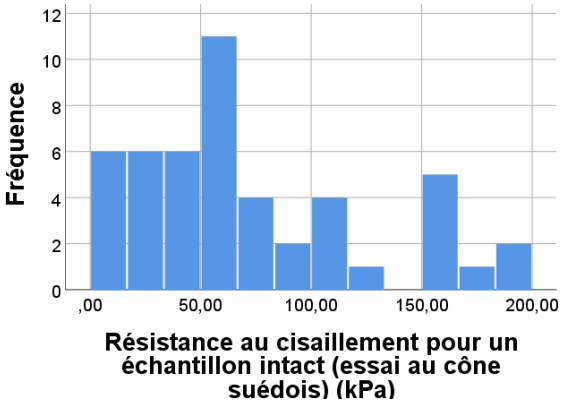
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (d)



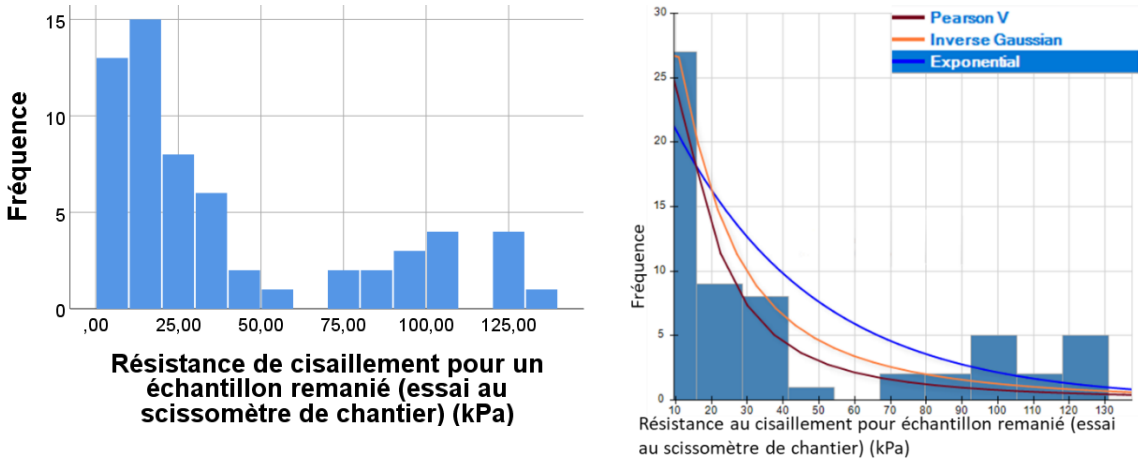
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

La méthode D n'a détecté aucune valeur aberrante

Figure 3-21: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon intact mesurées au cône suédois

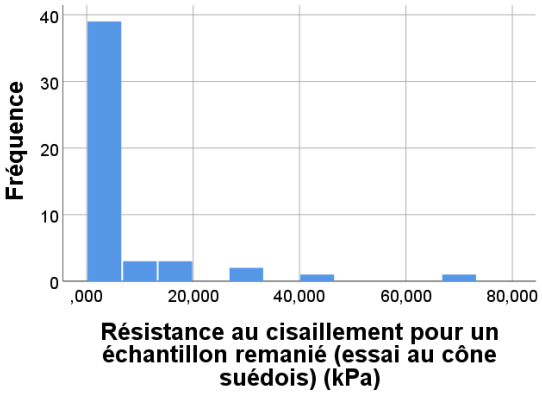


(a) Histogrammes des données initiales

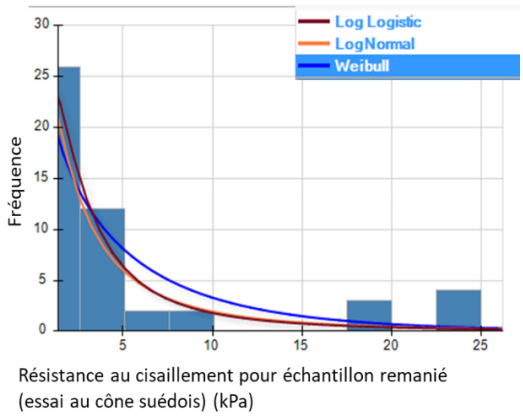
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)

Les méthodes de traitement n'ont détecté aucune valeur aberrante

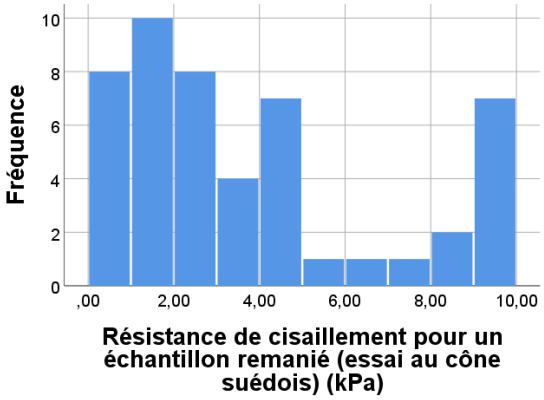
Figure 3-22: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon remanié mesurées au scissomètre de chantier



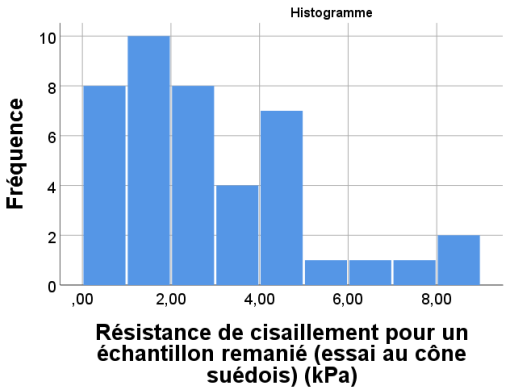
(a) Histogrammes des données initiales



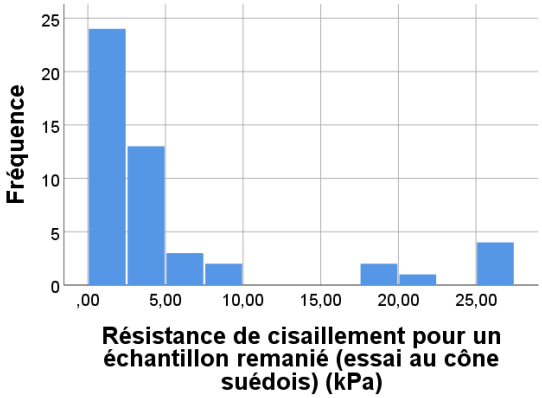
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



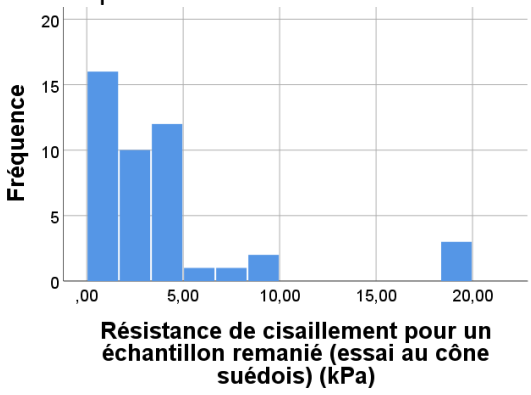
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

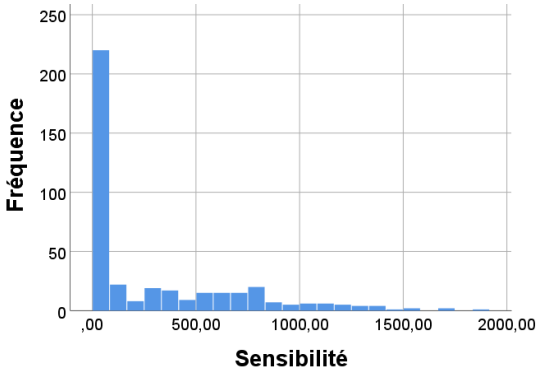


(e) Données avec VA corrigées par D

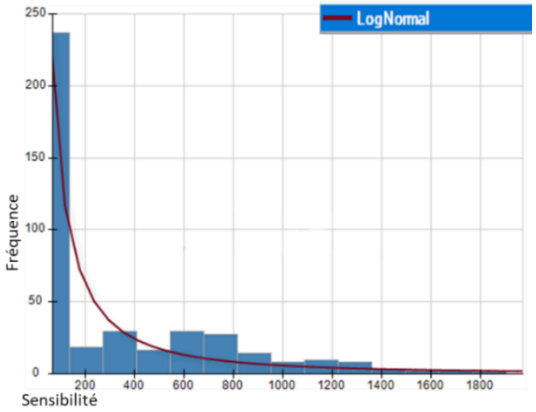


(f) Données avec VA supprimées par D

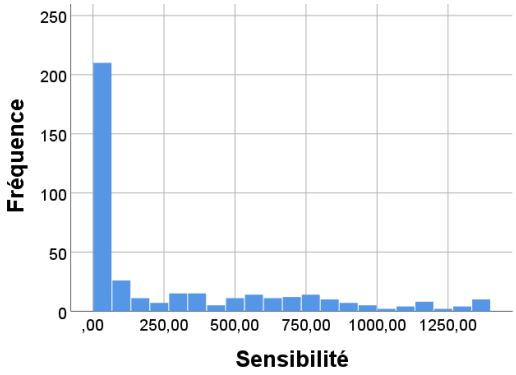
Figure 3-23: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement pour échantillon remanié mesurées au cône suédois



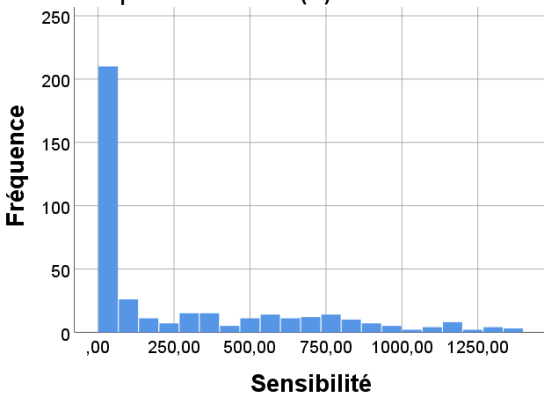
(a) Histogrammes des données initiales



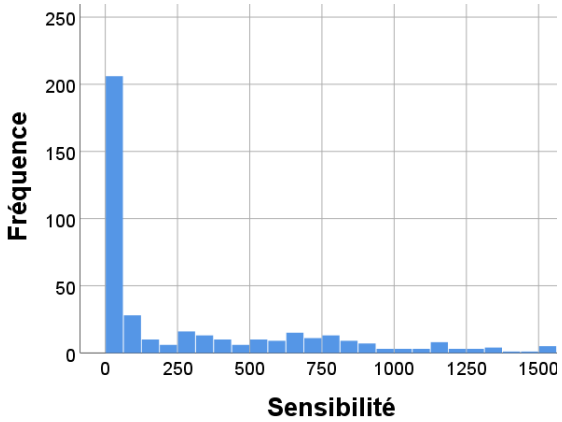
(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (a)



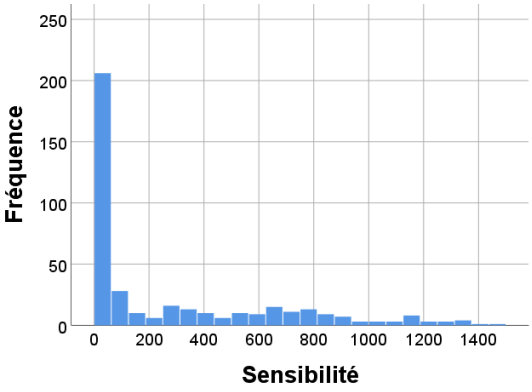
(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM

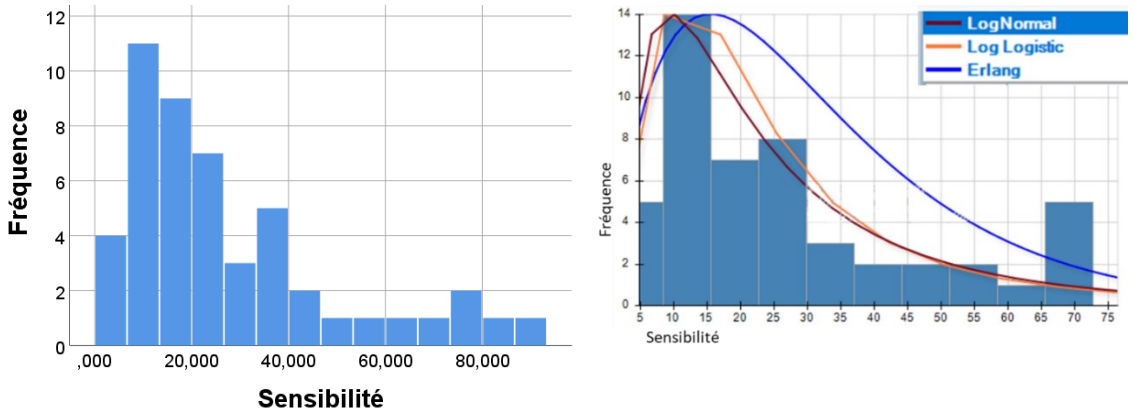


(e) Données avec VA corrigées par D



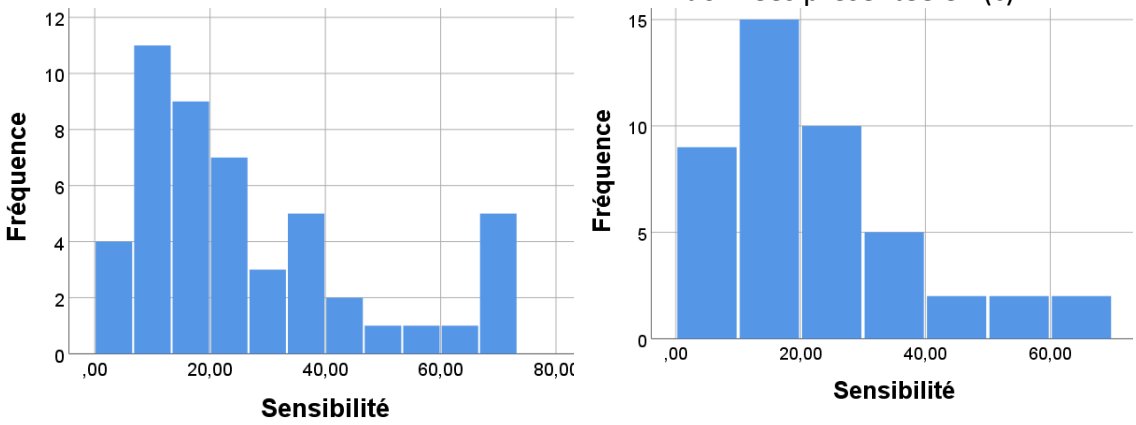
(f) Données avec VA supprimées par D

Figure 3-24: Histogrammes des données de la sensibilité mesurées au scissomètre de chantier



(a) Histogrammes des données initiales

(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



(c) Données avec VA coorigées par BM

(d) Données avec VA supprimées par BM

La méthode D n'a détecteé aucune valeur aberrante

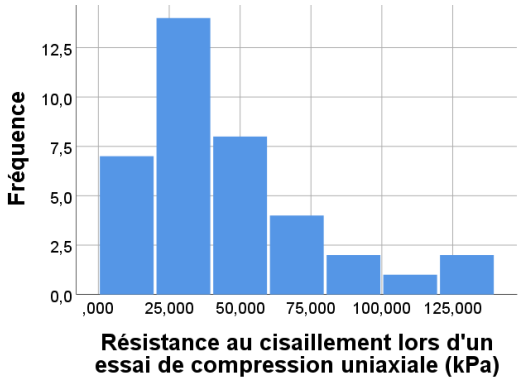
Figure 3-25: Histogrammes des données de la sensibilité mesurées au cône suédois

3.3.2.6. Essai de compression uni axiale

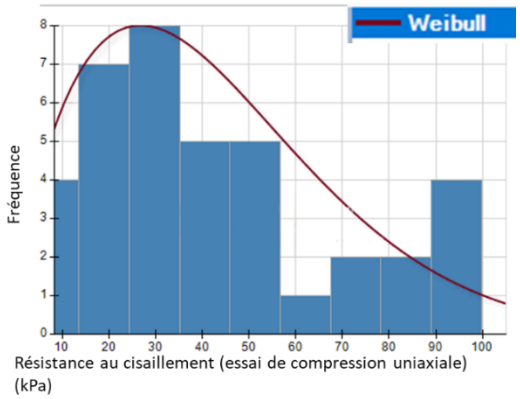
Les données au nombre de 38 sont regroupées pour des échantillons prélevés à Chicoutimi et dans des zones non déterminées de la région SLSJ. La méthode de Doerffel ne détecte pas de valeur aberrante. Dans la figure 3-26 les histogrammes ne montrent apparemment pas de valeurs aberrantes mais la méthode de la boîte de moustaches en retrouve parmi les données. Cette observation semble contredire, une fois de plus, la

définition graphique (figure 2-1) de Barnett et Lewis (1994) selon laquelle les valeurs aberrantes sont des données qui se détachent distinctivement des autres données de la distribution. La justification de ceci peut être soit le choix l'amplitude pour la discrétisation des différentes valeurs du paramètres qui aurait influencé la répartition en classes des données (favorisant l'incorporation d'éventuelles valeurs aberrantes), soit que les valeurs aberrantes déterminées par la méthode de la boîte de moustaches sont aussi des ''contaminants'' (figure 2-1). La deuxième hypothèse semble être la plus probables parce que selon la procédure de détermination d'origine des VA établie dans la section 1.4.1, les VA sont d'origine déterministe, de plus l'amplitude utilisé pour tracer les histogrammes (Figure 3-26) ne sont pas grandes (≤ 25 kPa).

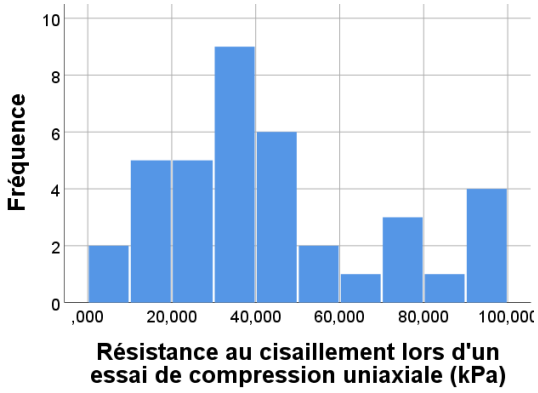
La meilleure loi obtenue pour les données de la contrainte au cisaillement de compression uniaxiale est la loi Gamma avec une moyenne de 88,41 kPa et un COV de 69%. Plus de 68% des échantillons se trouvent dans un étant de consistance raide.



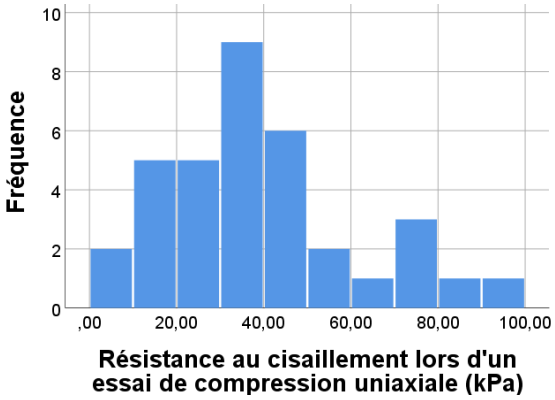
(a) Histogrammes des données initiales



(b) Test KS : Fonctions théoriques adéquates pour la distribution de données présentée en (c)



(c) Données avec VA coorigées par BM



(d) Données avec VA supprimées par BM
La méthode D n'a détecté aucune valeur aberrante

Figure 3-26: Histogrammes des données de la résistance au cisaillement mesurées par essai de compression uniaxiale

3.3.3. Incertitudes de paramètres géotechniques dans la région Saguenay-Lac-Saint-Jean

Il s'agit d'un résumé sous forme de tableaux des incertitudes obtenues après le traitement de valeurs aberrantes et le test d'adéquation. Les tableaux 3-2 et 3-3 sont dressés afin de représenter de manière globale et concise les paramètres statistiques obtenus et les lois de probabilité appropriées pour l'étude des paramètres physiques et

mécaniques. Le tableau 3-2 contient les informations liées aux paramètres physiques et le tableau 3-3 celles liées aux paramètres mécaniques.

Tableau 3-2: Incertitudes des paramètres physiques

Paramètres géotechniques	***Données***	***Minimum***	***Maximum***	***Lois de probabilité***	***Dα***	***Dn***	***Moyenne***	***Écart-type***	***Variance***
W (%)	645	21,81	62	Normale	0,0535	0,0402	41,79	7,95	62,24
WL (%)	159	16,5	67,11	Inverse de Gauss	0,1079	0,1073	37,28	11,306	127,83
WP (%)	160	11,93	28,4	Gumbel	0,1075	0,0798	21,1	2,666	7,11
IP (%)	159	1,5	43,54	Gamma	0,1079	0,0979	16,19	9,99	99,742
IL	155	-0,69	6,61	Minimum extreme	0,1092	0,1306	2,03	1,59	2,52
e_{0d}	29	0,66	1,77	Erlang	0,2525	0,1004	2,03	1,59	2,52
e_{0c}	25	0,38	2,83	Erlang	0,2720	0,1304	1,03	0,27	0,073
n_d *(%)*	31	39,79	724	Gamma	0,2443	0,0971	53,86	7,78	60,52
n_c *(%)*	25	27,53	73,91	Logistique	0,2720	0,115	50,49	6,76	45,64
Dr densité	29	2,174	2,851	Minimum Extreme	0,2525	0,1181	2,73	0,094	0,0089
Dr consol	20	2,57	2,88	Weibull	0,3041	0,1951	2,75	0,078	0,0061
ρ densité (g/cm3)	26	1,56	2,29	Log logistique	0,2667	0,0882	1,84	0,204	0,0414
ρconsolid (g/cm3)	12	1,73	2,85	Gumbel	0,3926	0,2139	2,088	0,297	0,0883

Tableau 3-3: Incertitudes des paramètres mécaniques

Paramètres géotechniques	***Données***	***Minimum***	***Maximum***	***Lois de probabilité***	***Dα***	***Dn***	***Moyenne***	***Écart-type***	***Variance***
Qc (kPa)	*1128*	*60*	*3250*	*Gamma*	*0,0405*	*0,0632*	*1271,96*	*697,37*	*486324*
fs (kPa)	1130	8	87,5	Log normale	0,0405	0,107	37,68	22,32	498,29
N	39	1	100	Inverse de Gauss	0,2178	0,1228	7,385	6,83	46,68
S_u *(kPa)*	352	20	197	Erlang	0,0725	0,0606	99,27	41,33	1708,12
S_{ur} *(kPa)*	61	3	131	Inverse de Gauss	0,1741	0,1458	39,53	51,72	2675,34
S_t	403	1	1902	Test non accepté	0,0677	0,1205	297,92	399,29	159435,6
S_{uc} *(kPa)*	48	7,5	191	Erlang	0,1963	0,0901	72,16	53,29	2840,04
S_{urc} *(kPa)*	49	0,12	25	Log normale	0,1943	0,0894	5,86	10,97	120,33
S_{tc}	48	1,273	87,707	Log normale	0,1943	0,0671	28,72	30,16	909,51
C_u *(kPa)*	38	2,8	129,515	Weibull	0,2206	0,0747	43,2	27,29	744,84
σ'p (kPa)	43	17	775	Erlang	0,2074	0,106	227,41	160,62	25798,49
OCR	29	0,29	50	Inverse de Gauss	0,2525	0,1272	4,37	6,06	36,72

CHAPITRE 4 : DÉTERMINATION DES CORRÉLATION

4.1. Introduction

Les corrélations sont recherchées individuellement pour chaque localité et globalement pour les localités dont les données sont disponibles. Comme énoncé dans la méthodologie (figure 4-1), les corrélations sont effectuées dans un premier temps entre les paramètres géotechniques et deuxièmement entre la profondeur et les paramètres géotechniques. Les résultats sont présentés dans le même ordre. La comparaison avec les résultats d'autres argiles marines est incluse dans la présentation des données. Les valeurs aberrantes sont prises en compte seulement dans la dernière partie de la section parce qu'il s'agit d'observer l'influences des valeurs aberrantes sur les corrélations.

L'ensemble des résultats est présenté sous forme de tableaux, avec les informations liées à la corrélation la plus forte (linéaire ou non linéaire), observée entre les paramètres géotechniques (tableau 4-2) et entre les paramètres géotechniques et la profondeur (tableau 4-3).

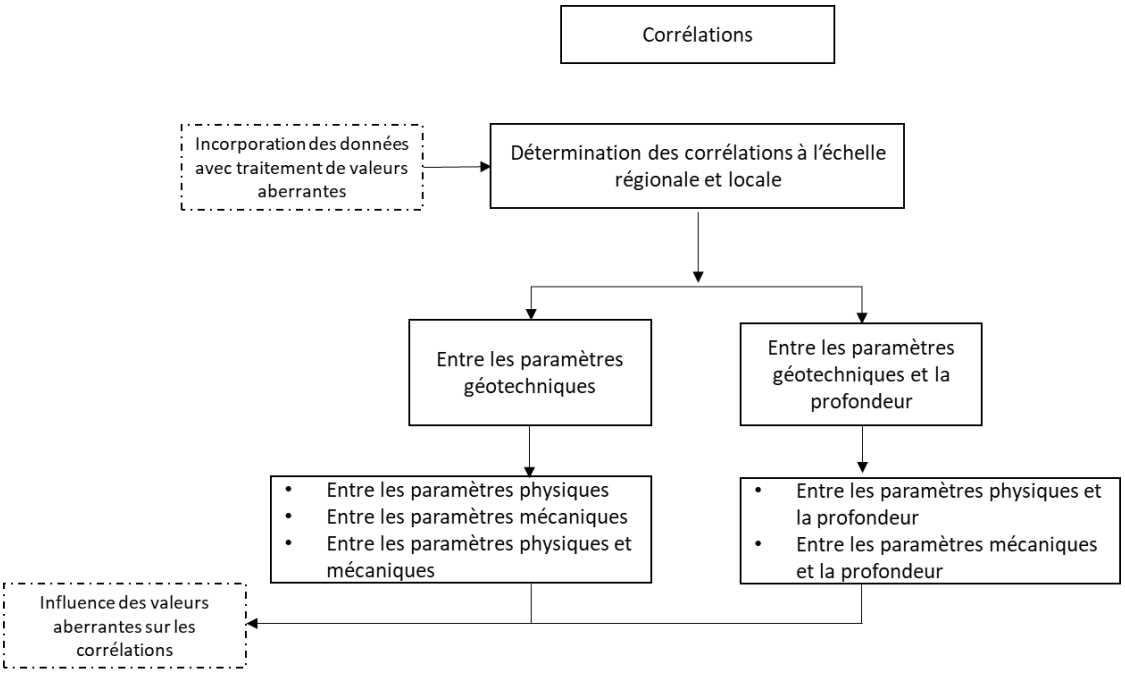


Figure 4-1: Schéma de la deuxième partie de la méthodologie (détermination des corrélations)

4.2. Détermination des corrélations entre les paramètres géotechniques

Les corrélations sont réunies en trois groupes entre paramètres physiques, mécaniques, mécaniques et physiques.

4.2.1. Corrélations entre paramètres physiques

Trois corrélations sont obtenues avec les données des paramètres physiques. Ce sont des corrélations plus ou moins similaires à celles déjà présentes dans la revue de littérature.

4.2.1.1. Corrélation entre la masse volumique sèche (ρ_d) et la teneur en eau (W)

Une force de corrélation élevée entre la masse volume sèche et la teneur en esu (ρ_d (W)) a été trouvée pour des données de localités non identifiées (figure 4-2). Elle n'est pas significative à cause de l'insuffisance de données (seulement trois); cependant c'est une relation dont la formule d'équation est généralement utilisée dans les calculs géotechniques ou de la mécanique des sols, d'où l'intérêt de la mentionner.

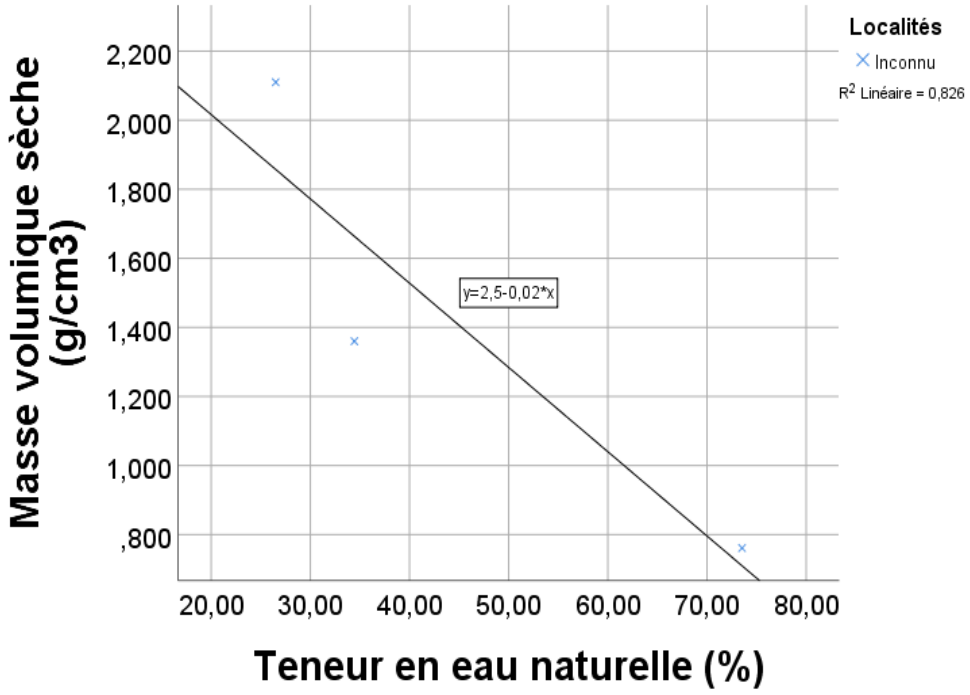


Figure 4-2: Relation linéaire entre la masse volumique sèche et la teneur en eau pour des échantillons d'argile

4.2.1.2. Corrélations entre l'indice de plasticité (I_P) et la limite de liquidité (W_L)

En plus des corrélations non linéaires (cubique et quadratique) la relation linéaire entre l'indice de plasticité (I_P) et la limite de liquidité (W_L) est observée pour toutes les localités et tous les types de sol étudiés dans ce projet. Ce sont les corrélations non linéaires qui donnent un coefficient de régression plus élevé. Cependant nous nous sommes intéressés à la corrélation linéaire pour des fins d'interprétation selon la charte de Casagrande et aussi pour la comparaison avec d'autres résultats car les corrélations non linéaires de IP en fonction de W_L n'ont pas été prises en compte dans la revue de littérature.

En tout 159 données d'argile marine sont considérées pour les localités de Chicoutimi, Chicoutimi-Nord, Hébertville-Station, Jonquière, La Baie, Canton-Tremblay, Shipshaw et d'autres localités non identifiées (Figure 4-3). Pour les échantillons d'argile la régression linéaire montre des propriétés physiques moyennement variables en fonction des localités (figure 4-4) ainsi que la présence d'échantillons d'argile organiques (c'est à dire provenant essentiellement de matière organique). Le même constat a été fait pour les argiles de Leda (Nader, 2004) contrairement aux argiles de la Finlande et de la Suède, qualifiées de très plastiques (D'Ignazio et al, 2016). Pour tous les autres types de sol étudiés, les liens de corrélation entre les deux paramètres physiques varient peu d'une localité à l'autre mais restent forts malgré le nombre de données (figures 4-5, 4-6, 4-7 et 4-8). Les échantillons d'argile et de silt, de silt et de sable, de silt et enfin de sable étaient respectivement au nombre de : 177, 10, 83 et 39.

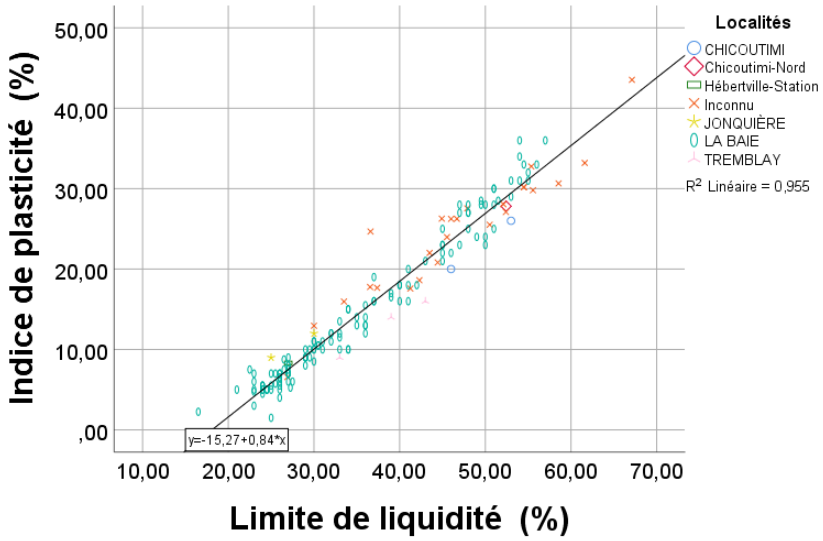


Figure 4-3 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons d'argile

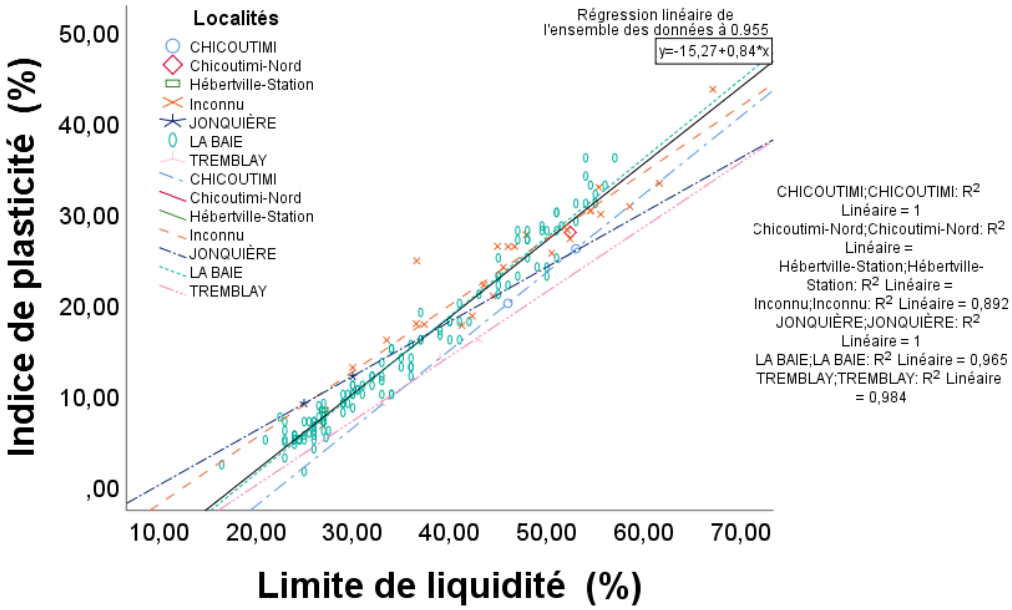


Figure 4-4 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons d'argile dans plusieurs localités

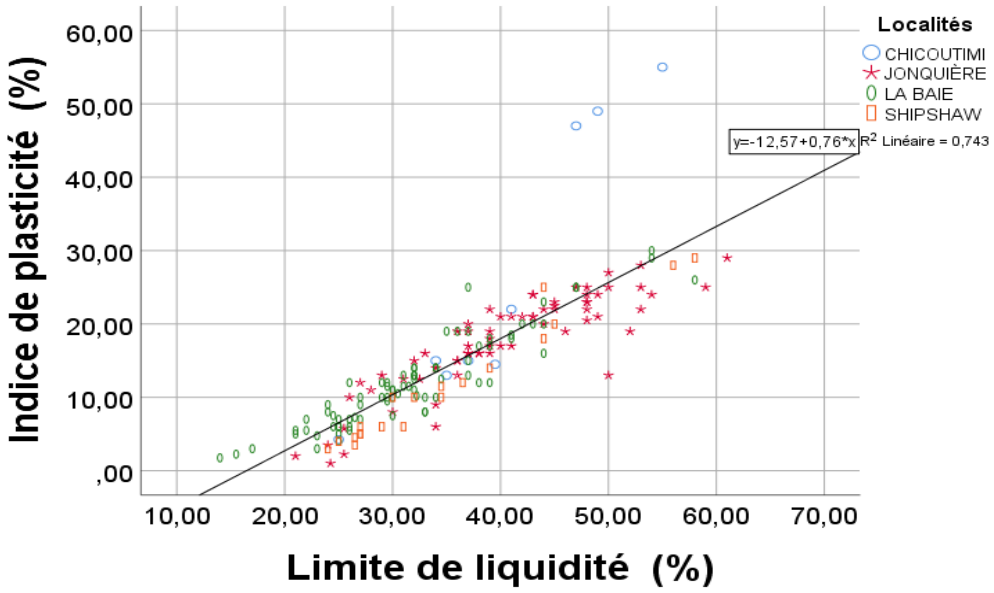


Figure 4-5 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt

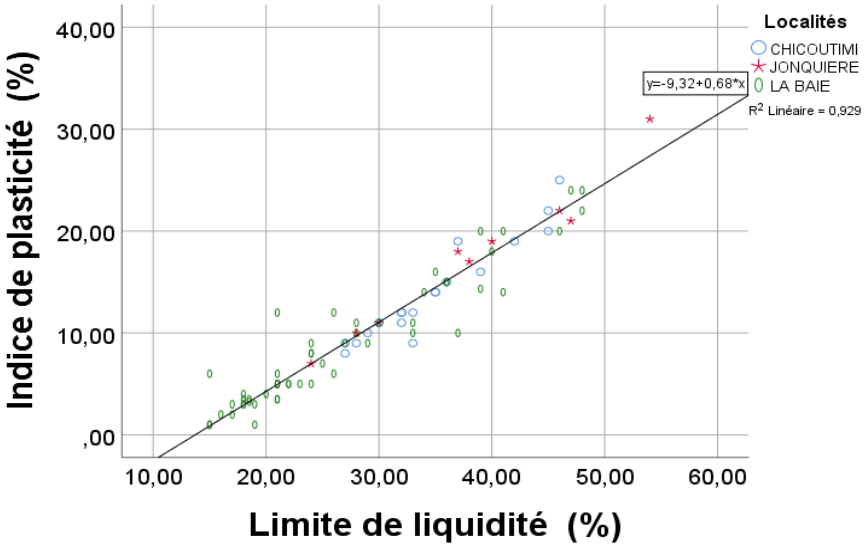


Figure 4-6 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons de silt

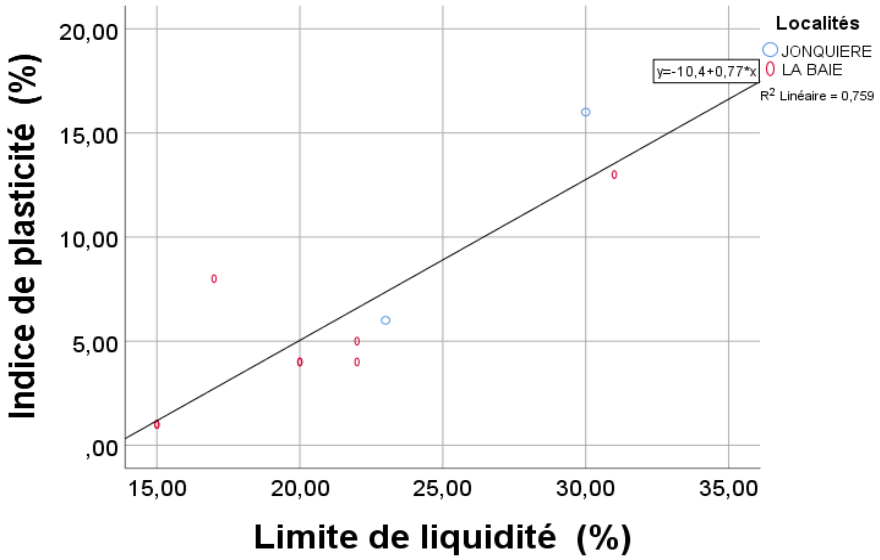


Figure 4-7 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons de silt et de sable

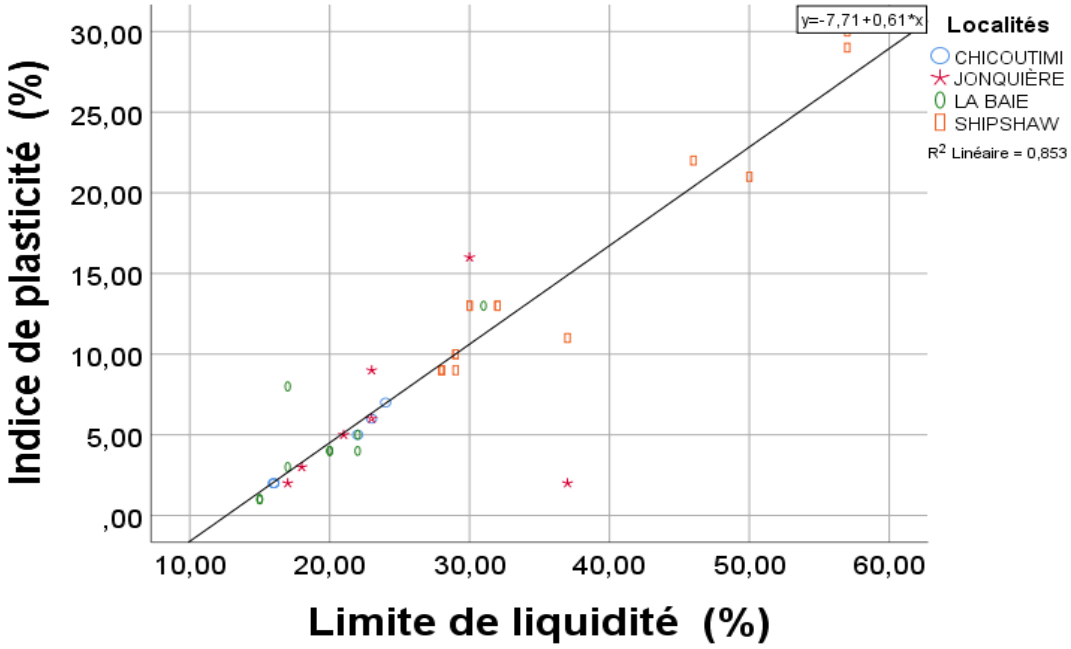


Figure 4-8 : Relation linéaire entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité pour des échantillons de sable

4.2.1.3. Corrélations entre la teneur en eau (W) et la limite de liquidité (W_L)

Ignazio et al (2016) ont effectué la représentation graphique de cette relation afin d'avoir un aperçu sur le nombre d'échantillons pour lesquels la teneur en eau était supérieure à la limite de liquidité et en déduire leur état de consistance. Ils ont donc observé la dispersion des données autour de la droite d'équation y = x. Cette initiative a permis ici de conclure que l'argile marine se trouve, la plupart du temps dans un état liquide puisque *W* reste majoritairement supérieure à W_L. Le même constat a été observé pour la majorité des argiles suédoises et finoises (Ignazio et al, 2016) à la différence que ces dernières ont des teneurs en eau et limites de liquidité doublement supérieures à l'argile de la mer Laflamme (figure 4-9).

La relation linéaire $W(W_L)$ des échantillons d'argile existe à l'échelle régionale pour les localités de Chicoutimi, Chicoutimi-Nord, Jonquière (figure 4-10) et les localités inconnues et localement pour les territoires non identifiés (figure 4-11). Cette corrélation observée pour les échantillons de silt à Jonquière et La Baie (figure 4-12), existe aussi pour les données regroupées de Jonquière, La Baie et Chicoutimi (figure 4-13). Les pentes des droites de régression linéaire obtenues pour les échantillons d'argile sont plus raides que celles des échantillons de silt. Le fait que la teneur en eau naturelle des échantillons soit plus élevée que la limite de liquidité suppose également qu'un remaniement de sol n'aura pas d'influence majeure sur la structure des grains encore moins la perte de résistance. Or,

les mêmes échantillons utilisés pour cette relation ont des valeurs élevées de l'indice de liquidité (tableau 4-1).

Tableau 4-1 : Valeurs initiales de la teneur en eau, limite de liquidité, indice de liquidité en fonction des localités pour les échantillons d'argile (Données du PACES et d'essais laboratoires effectués à l'UQAC)

Paramètre géotechnique	*Chicoutimi*	*Chicoutimi-Nord*	*Jonquière*	*Localités non identifiées*	*La Baie*	*Ensemble des localités*
	Min-Max Moy	Min-Max Moy	Min-Max Moy	Min-Max Moy	Min-Max Moy	Min-Max Moy
Échantillons d'argile	(2)	(1)	(2)	(25)	__	(30)
W (%)	24-70 40,67	59,2	25-30 27,5	25,1-57,1 42,12	__	24-70 43,31
WL (%)	46-53 49,5	42,42	25-30 27,5	26,9-67,1 46,6	__	25-67,11 40,73
IL	0,9-1,27 1,09	1,24	1,02-1,02 1,02	0,45-1,61 0,91	__	0,9-1,61 0,94
Échantillons de silt	(8)	__	(7)	__	(28)	(43)
W (%)	23-45 36,12	__	33-53 43,86	__	27-48,25 33,97	23-53 35,98
WL (%)	27-45 35.25	__	24-54 40,86	__	16-59,5 30,87	16-59,5 33,31
IL	-0,1-2,5 1,18	__	0,8-2,29 1,3	__	0,22-8,65 2,21	-0,1-8,65 1,87

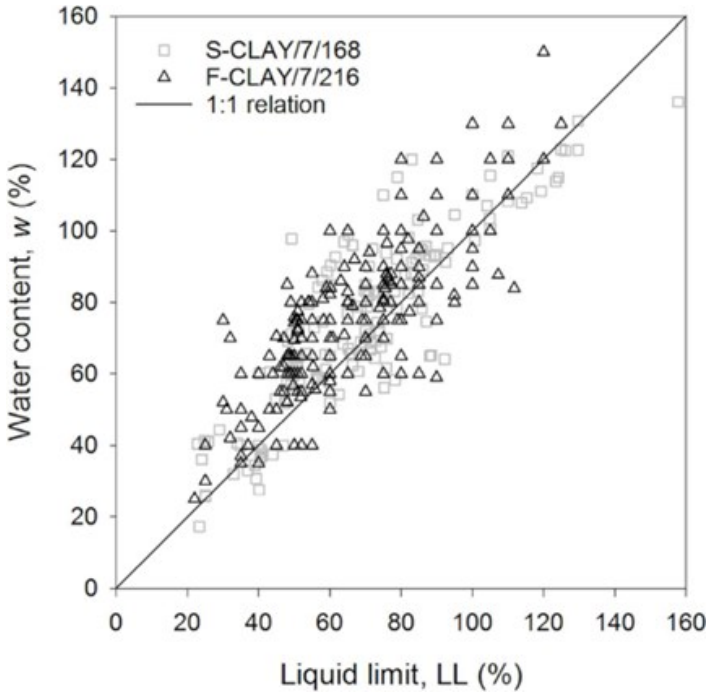


Figure 4-9 : Relation linéaire la teneur en eau naturelle avec celles de la limite de liquidité pour des échantillons d'argile suédoises et finoises (D'Ignazio et al, 2016)

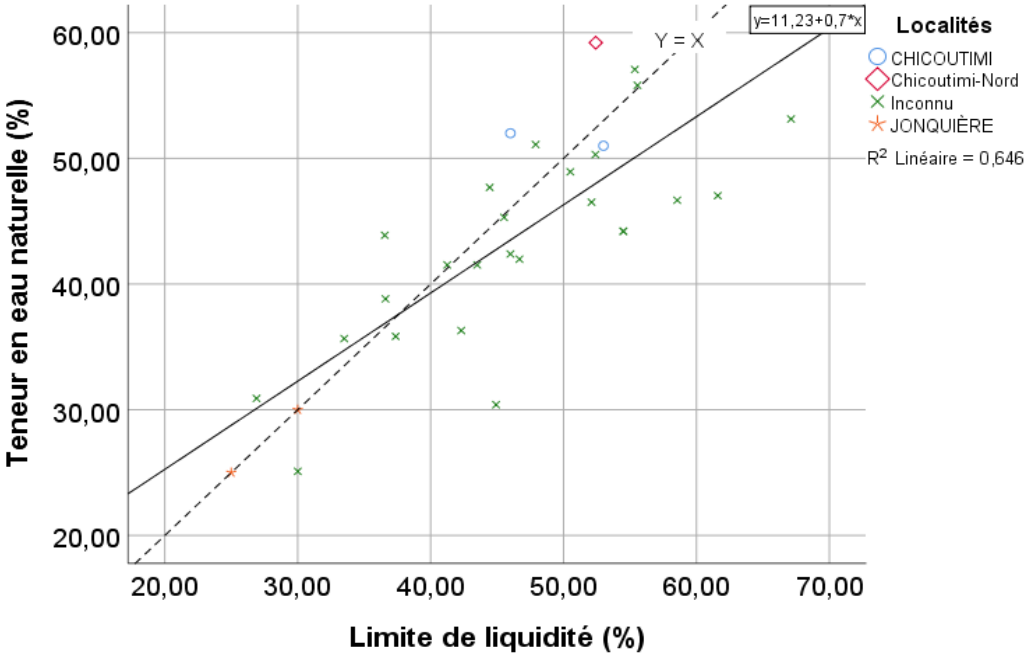


Figure 4-10: Comparaison des valeurs de la teneur en eau avec celles de la limite de liquidité pour des échantillons d'argile excluant La Baie et Canton-Tremblay

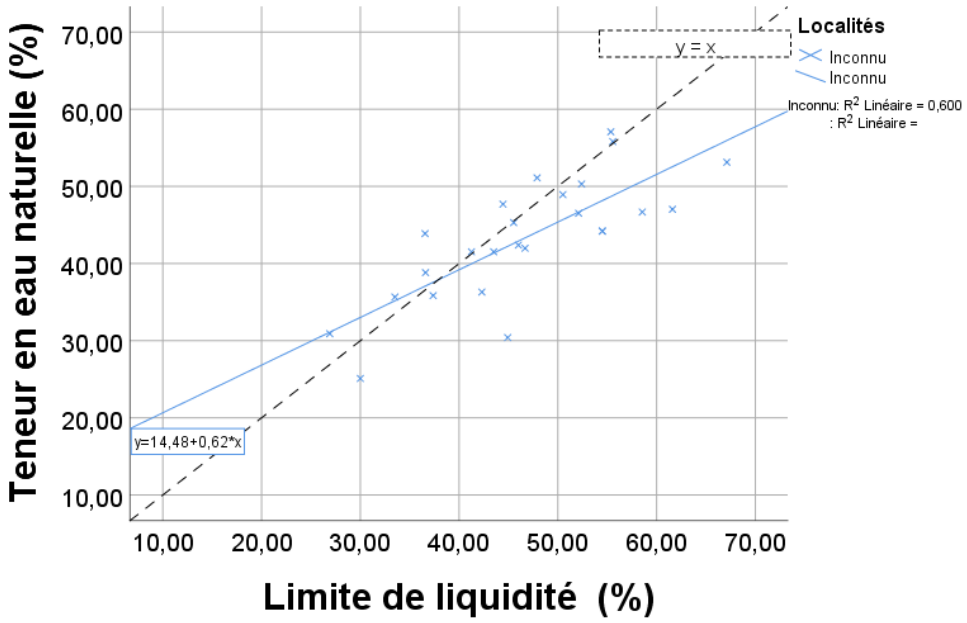


Figure 4-11: Comparaison des valeurs de la teneur en eau naturelle avec celles de la limite de liquidité pour des échantillons d'argile (localités inconnues seules)

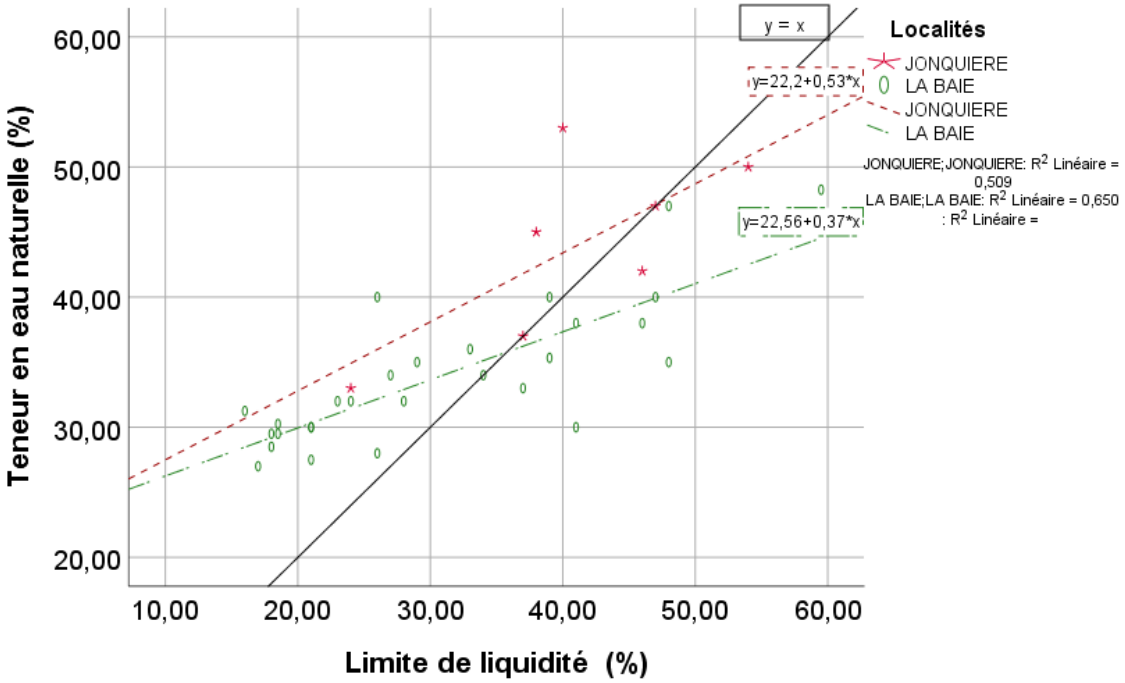


Figure 4-12: Relation linéaire entre la teneur en eau et la limite de liquidité pour des échantillons de silt (plusieurs localités)

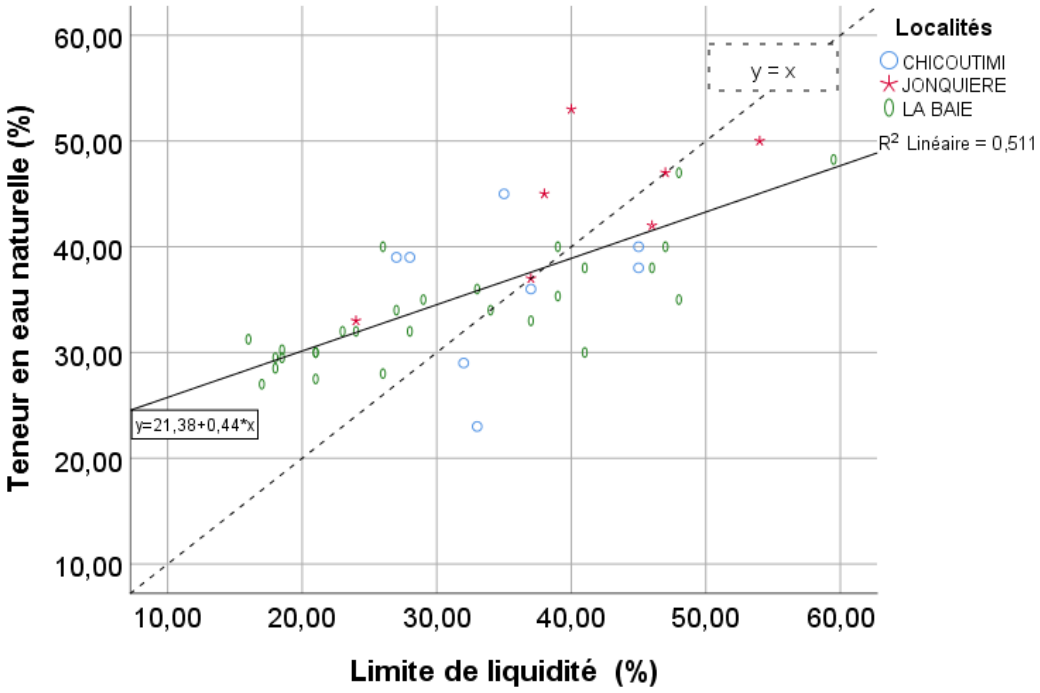


Figure 4-13: Relation linéaire entre la teneur en eau et la limite de liquidité pour des échantillons de silt

4.2.2. Corrélations entre paramètres mécaniques

Les paramètres mécaniques mettent en évidence cinq corrélations. Les données utilisées pour la recherche de corrélation sont issues d'essais au scissomètre ou au cône suédois ou encore d'essais de consolidation œdométrique.

4.2.2.1. Relation entre la résistance au cisaillement (S_u) mesurée au scissomètre de chantier et la contrainte de préconsolidation (σ'_p)

Les données d'échantillons majoritairement composés d'argile n'ont pas permis d'observer la corrélation $S_u(\sigma'_p)$. Les observations proviennent d'échantillons d'argile et de silt, et de silt ; la comparaison de nos résultats est quand même faite avec ceux d'échantillons d'argile trouvés dans la revue de littérature.

Windisch et Yong (1990) ont comparé des échantillons d'argile scandinaves avec ceux de l'est du Canada en utilisant la relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation. Les courbes de régressions (figure 4-14) ont montré qu'il existe une uniformité entre ces deux types d'argile lorsque 15kPa < S_u < 40kPa et 80kPa < σ'_p < 170kPa.

À l'instar des résultats de Windisch et Yong (1990), pour les échantillons d'argile et de silt, la résistance au cisaillement croît linéairement avec la contrainte de préconsolidation pour les échantillons de Chicoutimi et Jonquière (figures 4-15 et 4-16). En revanche les différentes courbes résultant des régressions non linéaires des données n'évoluent pas dans le même sens pour toutes les localités (figures 4-17 et 4-18). Cette situation ne permet pas une interprétation logique des liens de corrélation, d'autant plus que pour chaque localité les courbes de régression ont une allure divergente.

Les régressions linéaires à l'échelle locale et régionale de Jonquière et La Baie, pour les échantillons de silt, ont également une évolution semblable à celle de Windisch et Yong (1990) (figure 4-19 et figure 4-20). L'allure des régressions cubiques à l'échelle régionale et locale (figure 4-21 et figure 4-22) est similaire à celle des courbes de régression cubique pour les échantillons d'argile et de silt.

Les coefficients de régression les plus élevés ont été obtenus pour les corrélations non linéaires. Cependant l'interprétation des corrélations non linéaires pour La Baie, La Baie et Jonquière (échelle régionale) est contradictoire par rapport aux autres corrélations linéaires et non linéaires (l'allure des courbes de régression n'est pas la même).

La pente des droites de régression linéaire pour les argiles du SLSJ est moins raide que celle des argiles à l'est du Canada trouvée par Windisch et Yong (1990). Les argiles du SLSJ auraient une résistance au cisaillement plus faibles que celle des argiles marines de l'est Canada.

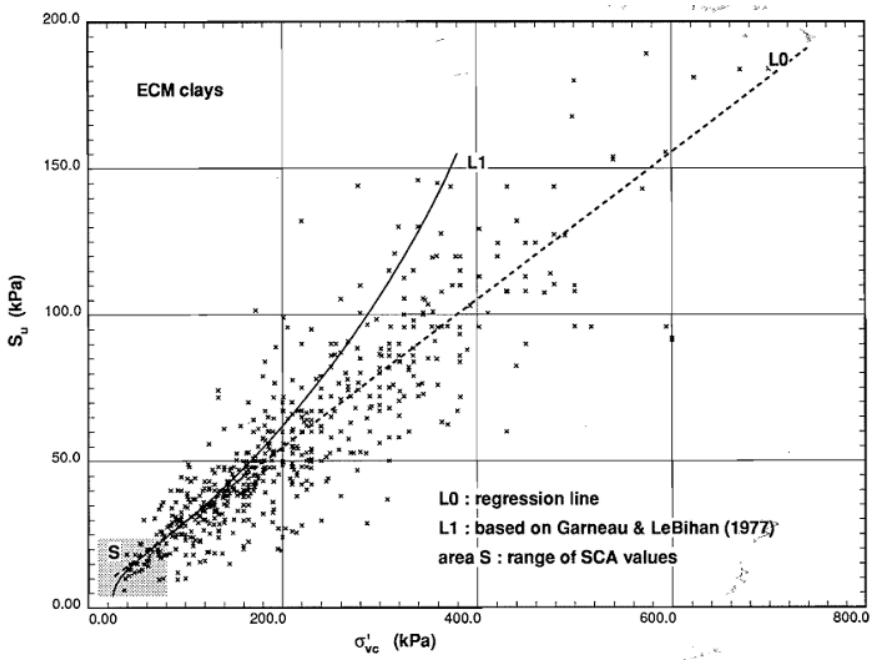


Figure 4-14 : Relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de consolidation (Windisch et Yong, 1990)

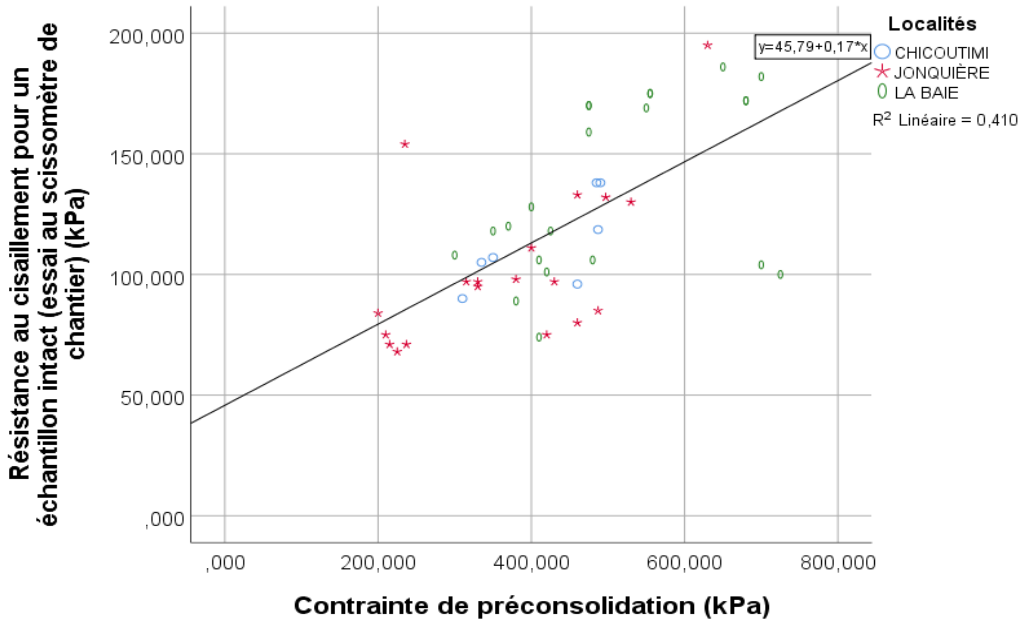


Figure 4-15 : Relation linéaire entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt

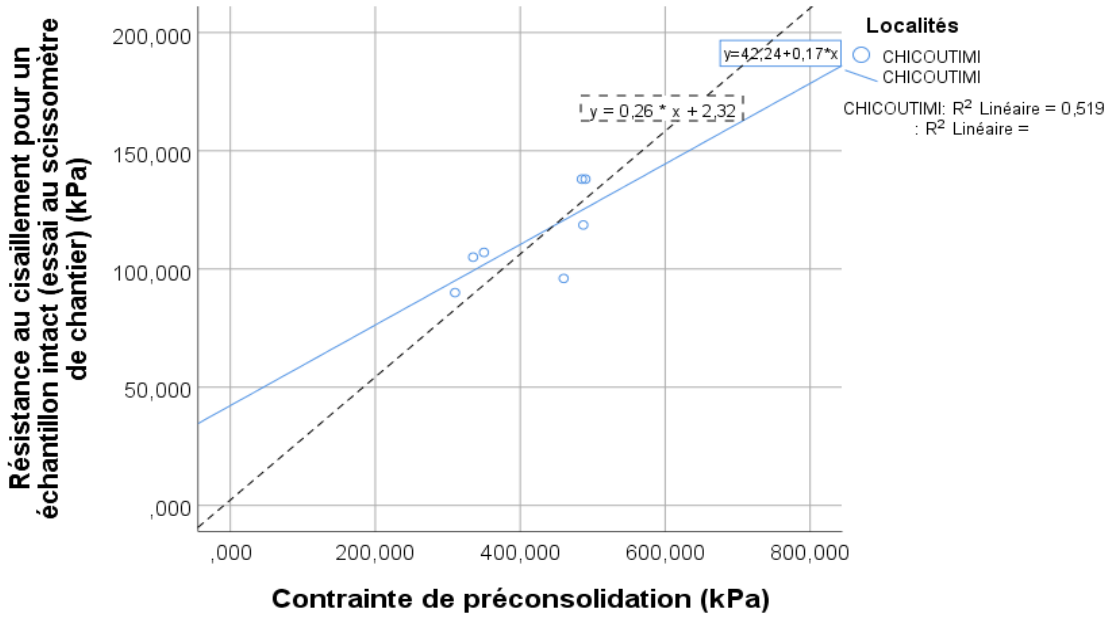


Figure 4-16 : Comparaison de la relation linéaire entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt avec celle issue d'échantillons d'argile marine de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990)

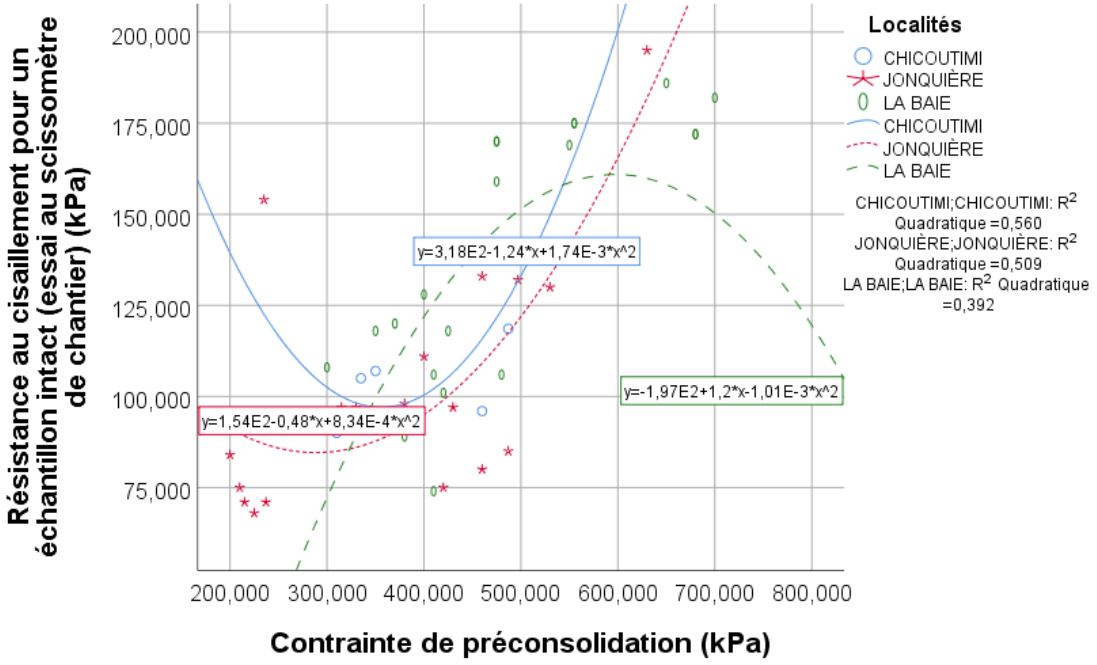


Figure 4-17 : Relation non linéaire quadratique entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités

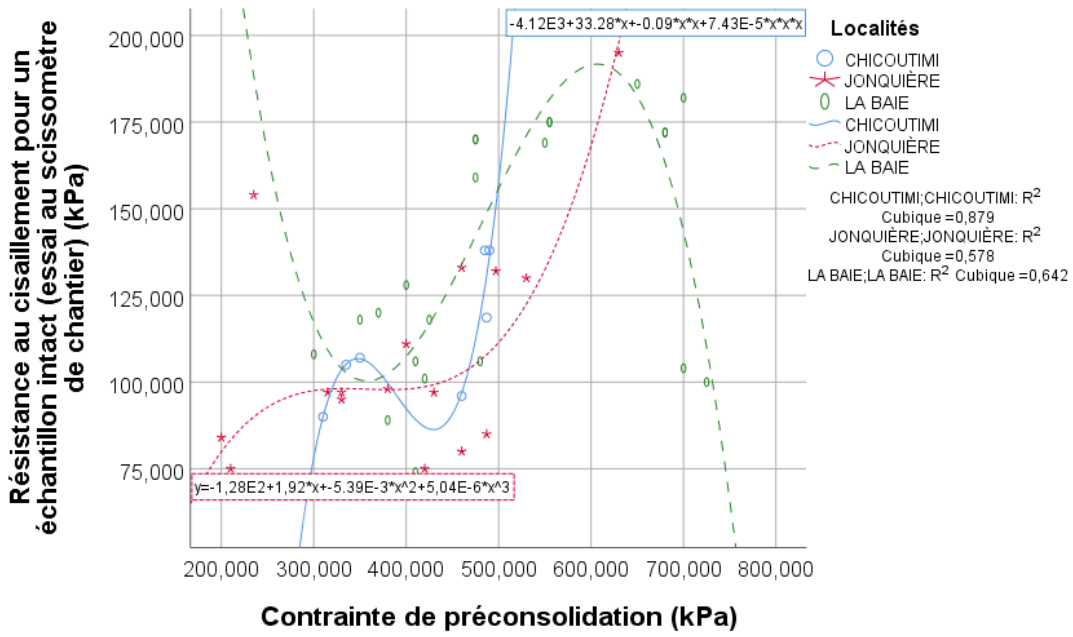


Figure 4-18 : Relation non linéaire cubique entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités

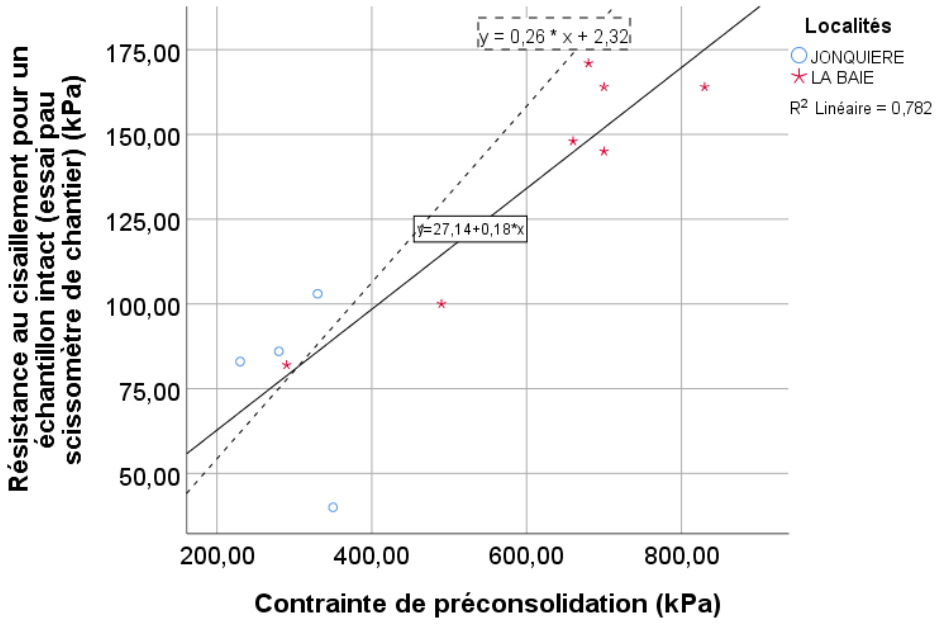


Figure 4-19 : Comparaison de la relation linéaire entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt avec celle issue d'échantillons d'argile marine de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990)

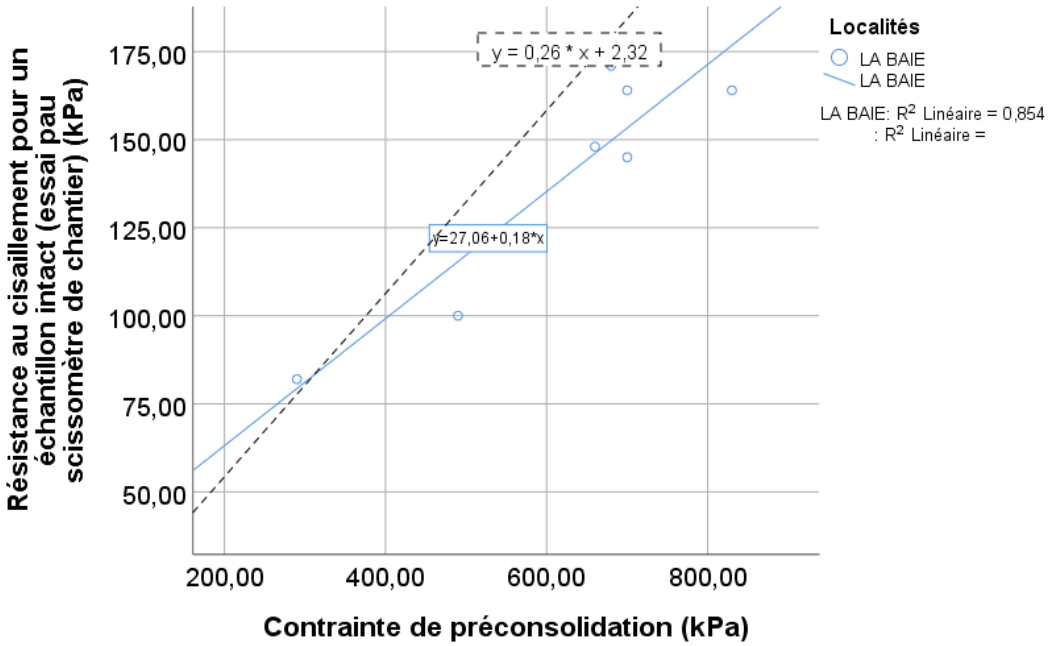


Figure 4-20 : Comparaison de la relation linéaire entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt pour une localité avec celle issue d'échantillons d'argile marine de l'est Canada (Windisch et Yong, 1990)

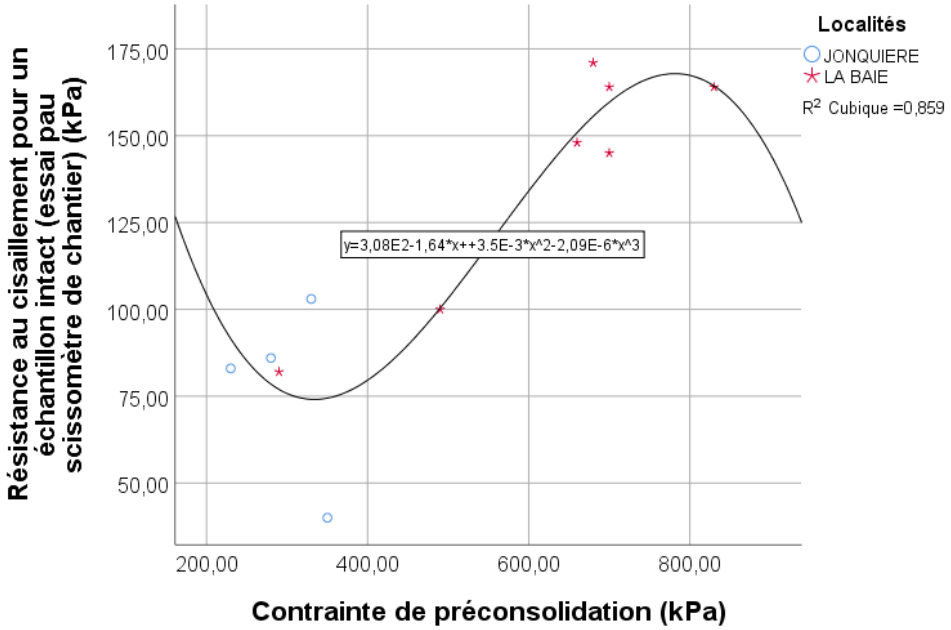


Figure 4-21 : Relation non linéaire cubique entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt

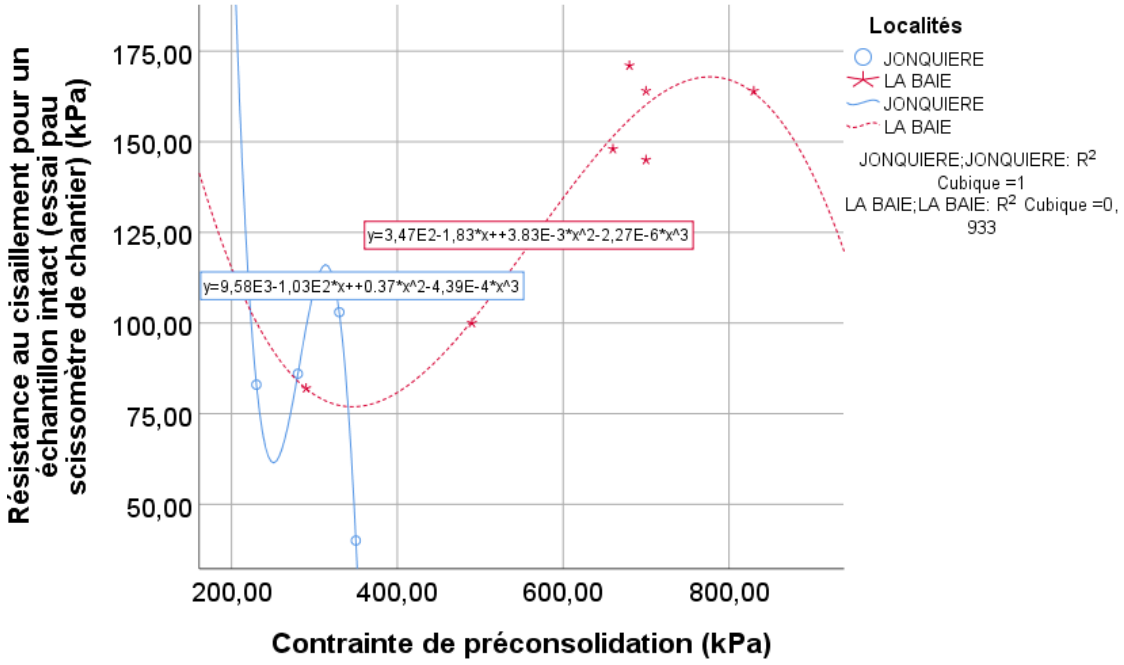


Figure 4-22 : Relation non linéaire cubique entre la contrainte de pré consolidation et la résistance au cisaillement pour des échantillons de silt pour plusieurs localités

4.2.2.2. Corrélation entre la sensibilité (S_t) mesurée au scissomètre de chantier et la contrainte de préconsolidation (σ'p)

Le nombre de données ayant permis d'obtenir cette relation ne joue pas favorablement sur la significativité du coefficient de régression, il y a peu de données ce qui ne permet pas déduire l'existence d'une corrélation significative entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation. Nous n'avons pas trouvé de corrélation de ce type dans la revue de littérature. Les six données mesurées à Chicoutimi n'ont pas révélé de relation linéaire entre la sensibilité mesurée au scissomètre de chantier et la contrainte de préconsolidation (figure 4-23). En revanche, la flexibilité des courbes de régression non linéaire (facilité de relier les données) a permis d'obtenir des coefficients de corrélation élevés et de corréler les données entre elles. Concernant la régression quadratique (figure

4-24), le résultat indique que la sensibilité ne devrait pas excéder la valeur de 25 environ et que les valeurs négatives de la sensibilité lorsque doivent être observées si la contrainte de préconsolidation est inférieure à 275kPa ou supérieure à 510kPa. Quant à la courbe de régression cubique les valeurs négatives sont observées seulement pour σ‘p > 510kPa (figure 4-25). Or, il est impossible d’obtenir des valeurs négatives lors de la procédure d’évaluation de la sensibilité, néanmoins ces valeurs peuvent traduire un gain de résistance après remaniement ou une faible sensibilité des échantillons.

En supposant que les valeurs négatives prédites par les courbes de régression non linéaire représentent des échantillons de sol peu sensible, il serait possible de vérifier si la prévision de l’évolution des courbes de régression concorde avec les informations réellement observées à l’aide des autres données. Dans la section 1, la relation S_t (I_L) suggère que la sensibilité augmente avec l’indice de liquidité, donc pour des échantillons d’argile et de silt peu sensibles l’indice de liquidité ne devrait pas être élevée. Malheureusement, le nombre de données disponibles ne permet pas de faire cette vérification.

En conclusion, les données disponibles dans cette étude ne permettent pas d’affirmer l’existence encore moins la fiabilité d’une relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de préconsolidation.

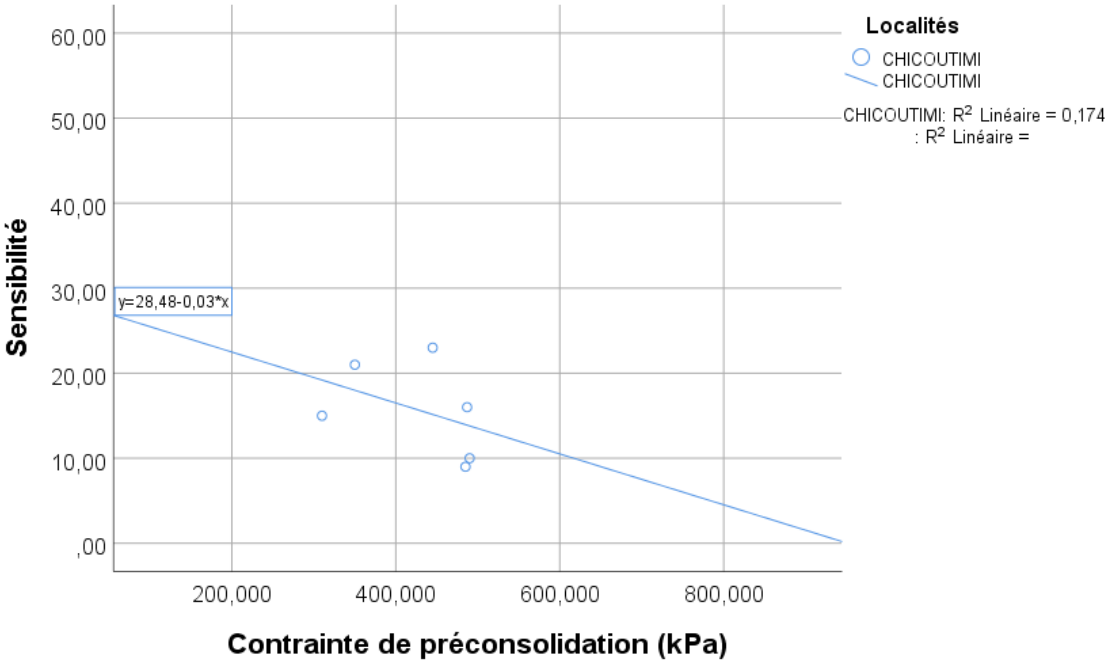


Figure 4-23 : Relation linéaire entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt

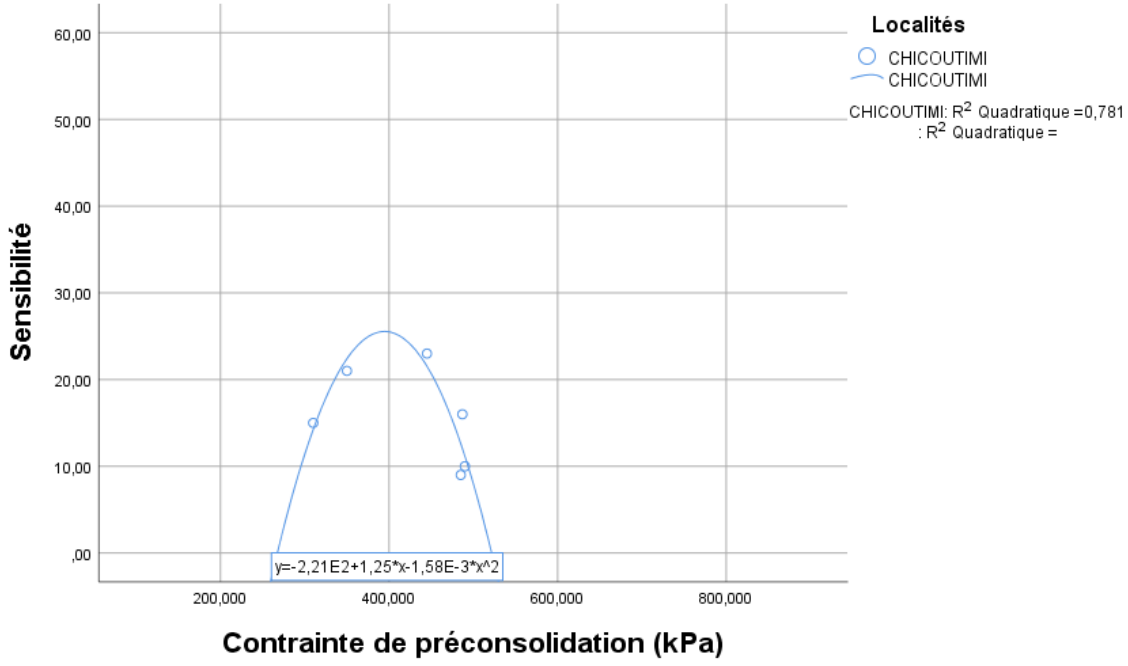


Figure 4-24 : Relation non linéaire quadratique entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt

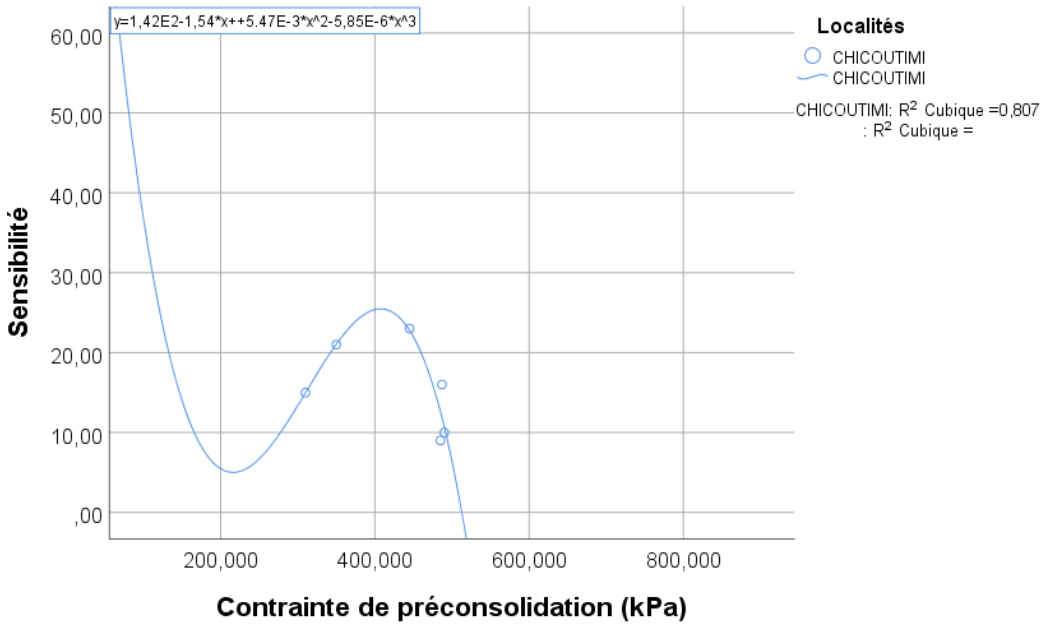


Figure 4-25 : Relation non linéaire cubique entre la sensibilité et la contrainte de préconsolidation pour des échantillons d'argile et de silt

4.2.2.3. Corrélation entre la sensibilité (S_t) et la résistance au cisaillement (S_u) mesurées au scissomètre de chantier

La relation linéaire S_t (S_u) a été trouvée seulement dans la localité de Chicoutimi pour les échantillons d'argile et de silt (figure 4-26). Cette relation indique qu'au-delà de S_u > 181 kPa le remaniement occasionnerait un gain de résistance. Il manque des données de Chicoutimi pour vérifier à l'aide de I_L si les échantillons dont S_u > 181kPa sont très peu sensibles. Cependant des études ont prouvées que les argiles de Chicoutimi sont surconsolidées, malgré cela elles restent sensibles. C'est une relation qui pourrait exister précisément pour les échantillons où le prélèvement a été effectué.

La fiabilité des corrélations non linéaires (figure 4-27 et figure 4-28) est remise en doute à cause de l'allure contradictoire des courbes de régression. La régression

quadratique montre que la sensibilité diminue lorsque la résistance augmente contrairement à la régression cubique.

Aucune corrélation n'est représentative pour la localité de Chicoutimi en générale et les courbes de régression sont divergentes pour les données d'une même localité. De plus les données disponibles pour Chicoutimi ne suffisent pas pour donner assurer la fiabilité des équations.

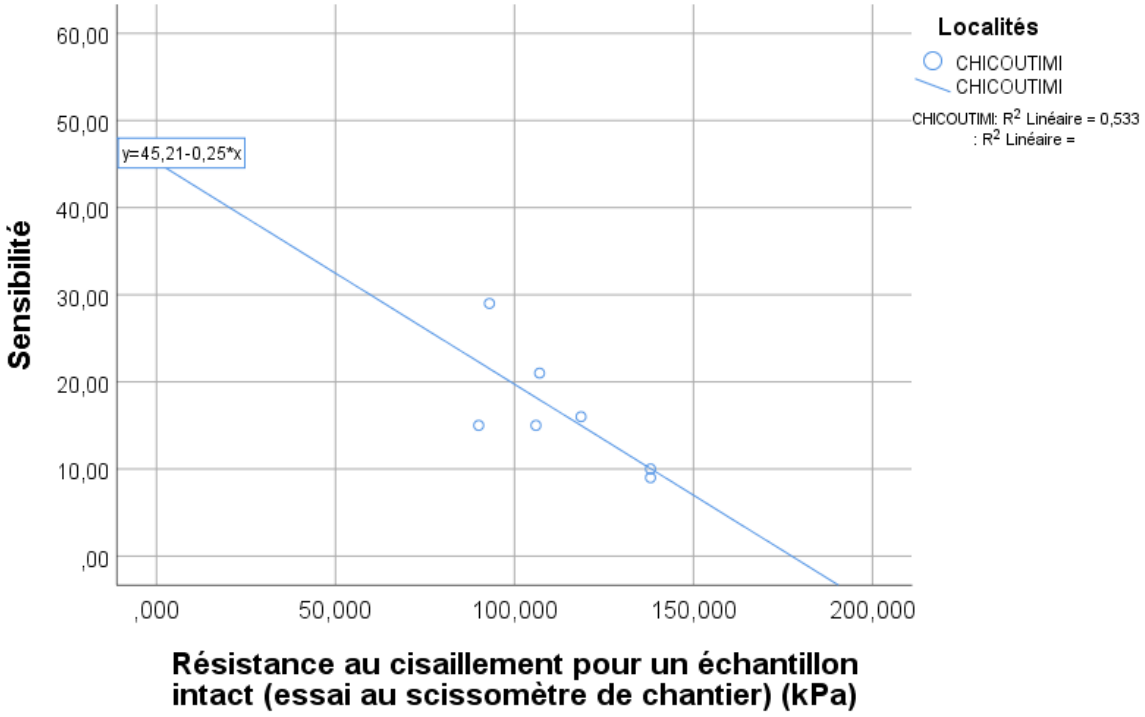


Figure 4-26 : Relation linéaire entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt (Chicoutimi)

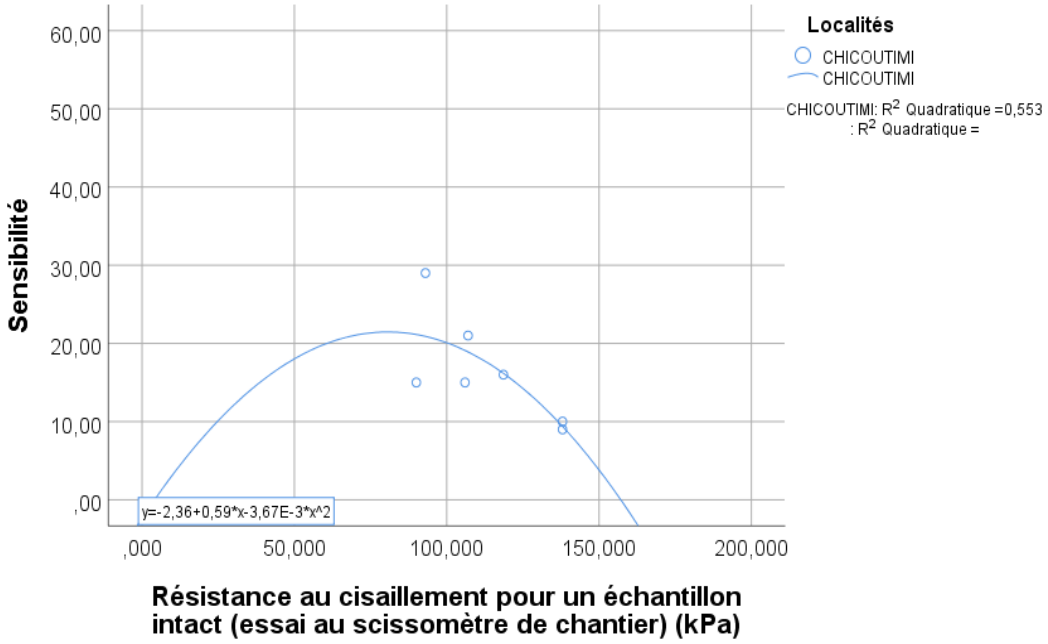


Figure 4-27 : Relation non linéaire quadratique entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt (Chicoutimi)

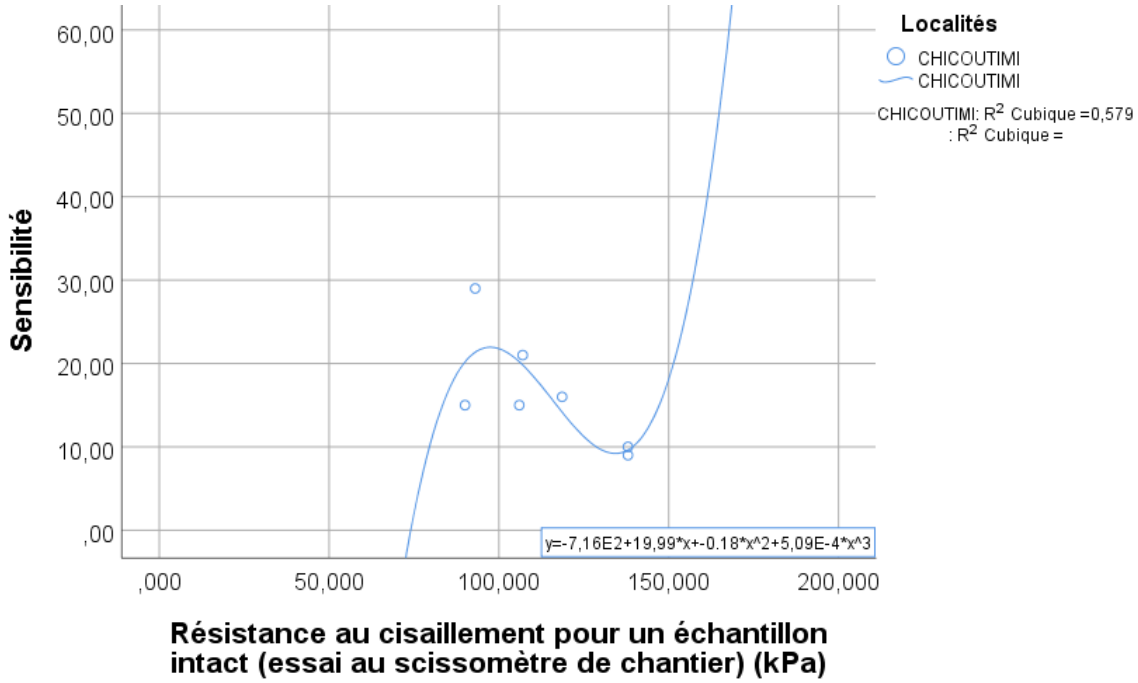


Figure 4-28 : Relation non linéaire cubique entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour des échantillons d'argile et de silt (Chicoutimi)

4.2.2.4. Corrélation entre la sensibilité (S_t) et la résistance au cisaillement pour échantillon remanié (S_{urc}) mesurées au cône suédois

Contrairement à la précédente observation pour les échantillons soumis au scissomètre de chantier, la sensibilité présente une relation avec la résistance au cisaillement d'échantillons remaniés et pas avec celle d'échantillons intacts obtenus lors d'essai au cône suédois. Compte tenu des insuffisances (manque de données et allure contradictoire des courbes de régression) rencontrées lors des précédentes corrélations ($S_t(\sigma'_p)$, $S_t(S_u)$), nous avons investigué sur une autre fonction que la courbe de régression pourrait avoir pour $S_t(S_{ur})$. Des échantillons d'argile de localités non identifiées ont permis d'observer la relation possible S_t (S_{ur}) à l'aide d'une courbe de régression de fonction de puissance (figure 4-29). Selon l'allure de la courbe de régression plus la résistance au cisaillement de l'échantillon remanié est faible plus est grande la sensibilité : c'est un constat évident compte tenu de la formule de calcul de la sensibilité : $S_t = \frac{S_u}{S_{ur}}$.

Au vu du résultat de la section 4.2.2.3 il est possible de supposer que la sensibilité ne peut être à la fois corrélée à la résistance au cisaillement d'échantillon remanié et à celle d'échantillon intact. Effectivement la relation S_t (S_{ur}) est présente pour les échantillons d'argile de Chicoutimi tandis que la relation S_t (S_u) est absente pour les mêmes échantillons, pour les échantillons des localités inconnues seule la relation S_t (S_{ur}) est observable. Les facteurs mis en jeux à cet effet ne sont pas connus et n'ont pas pu être explorés lors de cette recherche. Cette assertion reste donc précaire et nécessite plus d'investigations.

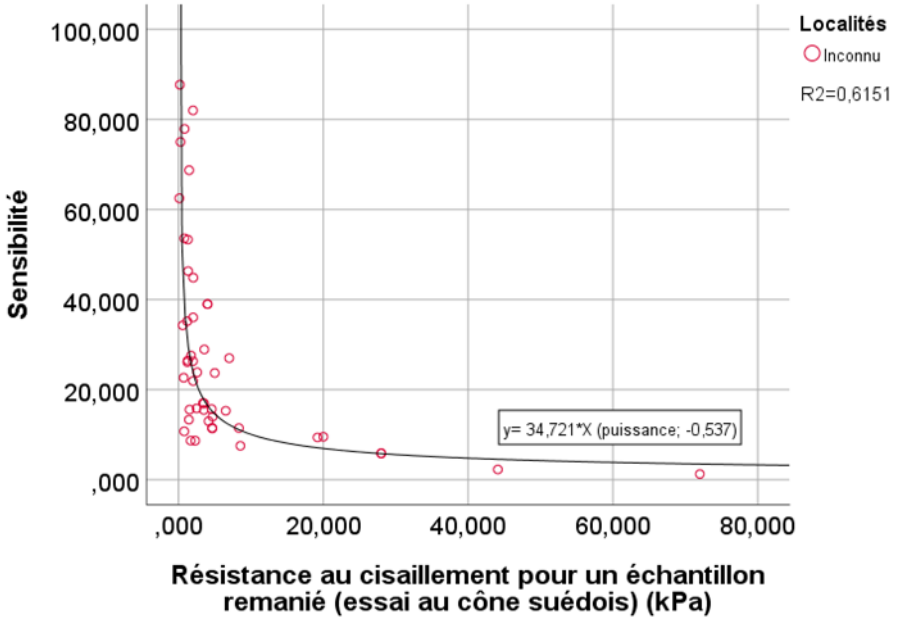


Figure 4-29:Relation non linéaire (fonction puissance) entre la sensibilité et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié (essai au cône suédois)

4.2.2.5. Corrélations entre la résistance au cisaillement pour échantillon intact (S_u) et la résistance au cisaillement pour échantillon remanié (S_{ur}) mesurées au cône suédois

Pour les mêmes données recueillies par essai de cône suédois il est possible d'observer que les résistances au cisaillement pour échantillons intacts et remaniés sont corrélées grâce à des courbes de régression linéaire et de puissance (figure 4-30), cubique (figure 4-32) et quadratique (figure 4-31). Peu importe la fonction de la courbe de régression, la résistance au cisaillement pour des échantillons remaniés croît plus ou moins avec la résistance au cisaillement pour des échantillons intacts.

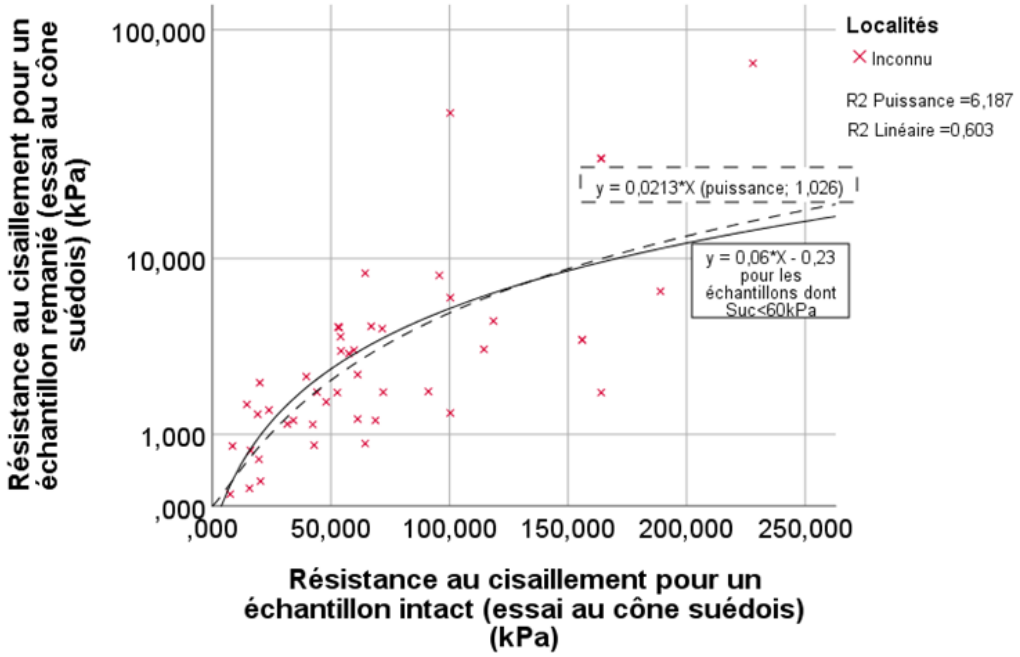


Figure 4-30 : Relations linéaire et non linéaire (fonction puissance) entre la résistance au cisaillement et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié pour des localités inconnues (essai au cône suédois)

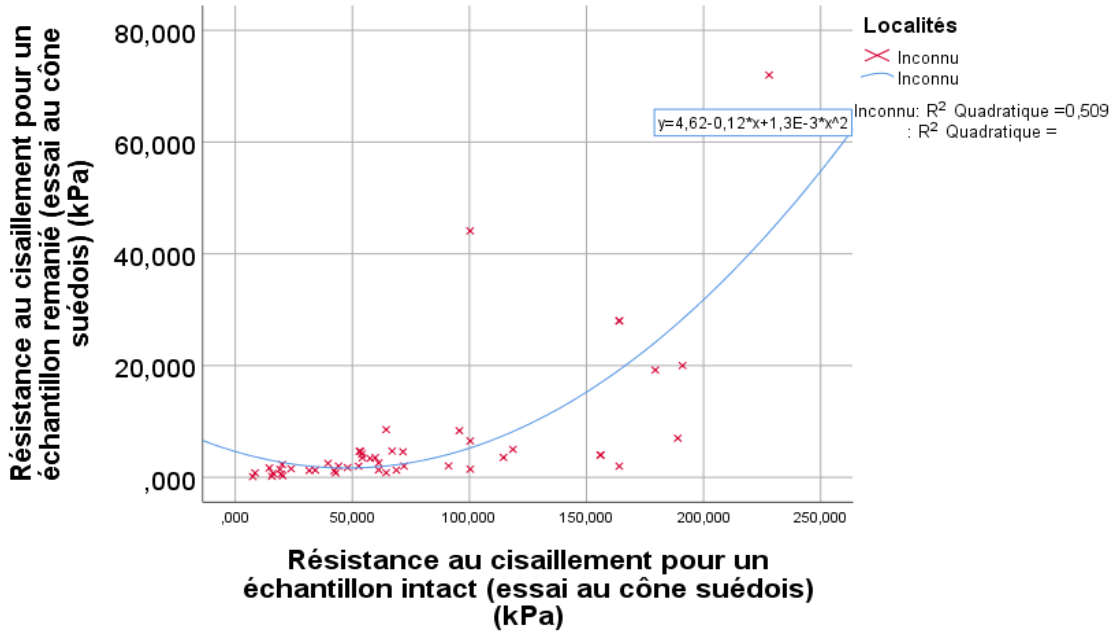


Figure 4-31 : Relation non linéaire quadratique entre la résistance au cisaillement et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié pour des localités inconnues (essai au cône suédois)

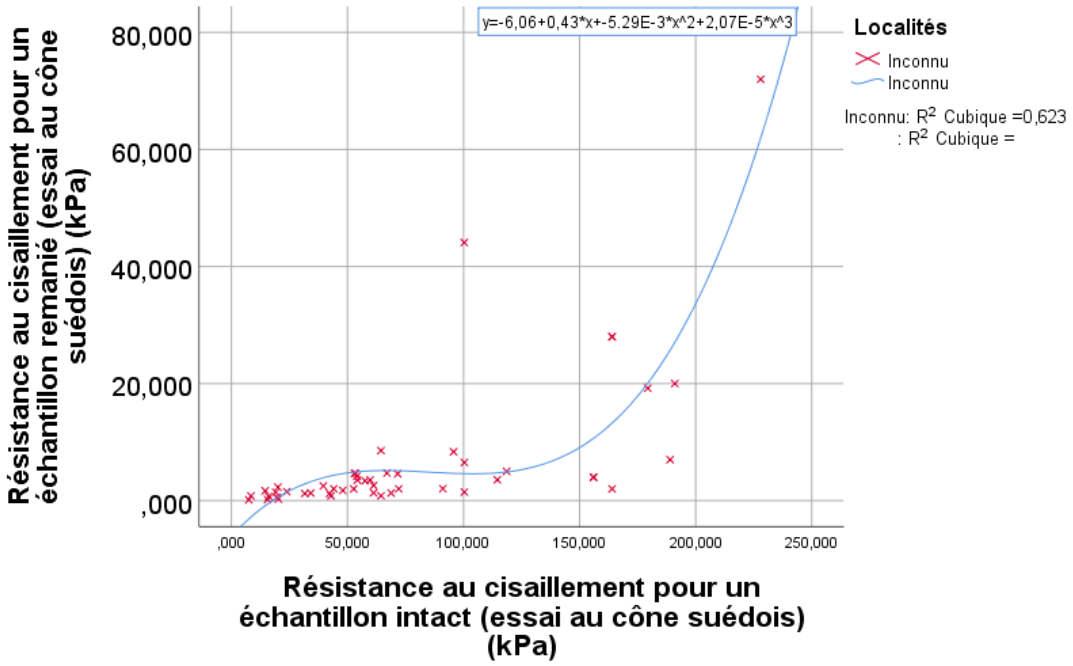


Figure 4-32: Relation non linéaire cubique entre la résistance au cisaillement et la résistance au cisaillement pour échantillon d'argile remanié pour des localités inconnues (essai au cône suédois)

4.2.3. Corrélations entre paramètres mécaniques et physiques

Les données disponibles ont permis d'obtenir deux corrélations entre les paramètres mécaniques et physiques dont une n'a pas été identifiée lors de la recherche bibliographique.

4.2.3.1. Corrélations entre la sensibilité (S_t) et l'indice de liquidité (I_L)

Les résultats montrent des corrélations linéaires et non linéaires pour les échantillons majoritairement composés d'argile et de silt (99 données), de silt (26 données); et une corrélation linéaire pour cinq échantillons de la municipalité de Shipshaw. À l'échelle régionale, seules les données d'échantillons de silt pour un même forage à Chicoutimi, Jonquière et La Baie présentent une régression de type linéaire (figure 4-38). Les autres régressions non linéaires sont observées localement pour chacune des localités suivantes :

Chicoutimi, Jonquière et La Baie pour les échantillons de silt, d'argile et de silt (figure 4-40 et figure 4-41) et Shipshaw pour l'argile et le silt (figure 4-34, figure 4-35). La figure 4-42 permet d'observer les différences existantes entre les courbes de régression de puissance obtenues à l'échelle régionale dans cette étude et celles trouvées dans la revue de littérature.

Les données des localités présentant une régression linéaire, donnent une droite de régression positive sauf pour échantillons de silt dans la localité de Jonquière. Il n'est pas étonnant de voir que l'indice de liquidité (I_L) augmente avec la sensibilité (S_t). En effet l'augmentation de l'indice de liquidité diminue la cohésion entre les grains ainsi que leur résistance, ce qui augmente aussi le risque que la cohésion de l'échantillon remanié soit nulle et d'obtenir ainsi une grande sensibilité. Le cas inverse observé dans l'arrondissement de Jonquière montre que les échantillons remaniés conservent une partie de leur résistance lorsqu'ils perdent en consistance. En effet les points corrélés ont une sensibilité entre 13 et 24, ce qui prouve que le remaniement entraîne quelque peu une perte de résistance. En ce qui concerne les échantillons de sable, I_L et S_t sont mesurables, probablement grâce à la quantité non négligeable d'argile qu'ils contiennent. Cela expliquerait le fait que la résistance des échantillons soit faiblement affectée par le remaniement, le remaniement n'a pas d'influence majeure sur les sols pulvérulents à plus forte raison sur la sensibilité. Effectivement la sensibilité pour les échantillons de sable est comprise entre 6 et 8.

Les régressions non linéaires ne font pas l'unanimité quant à la prédiction de la sensibilité en fonction de l'augmentation de l'indice de liquidité. Ce type de corrélation offre

plus souvent, des coefficients de régression plus élevés que celui de la corrélation linéaire simple. Cependant leur fiabilité dépend du nombre de données et de l'interprétation des courbes de régression obtenues par ces données. Par exemple la régression cubique pour les échantillons d'argile et de silt de Chicoutimi (figure 4-35) suppose que la sensibilité devrait atteindre des valeurs exponentielles lorsque l'indice de liquidité est négatif, autrement dit, l'échantillon serait dans un état de consistance très ferme, ce qui est impossible car plus l'indice de liquidité des élevée pour un échantillon plus celui-ci se trouve dans un été de consistance liquide. La régression quadratique (figure 4-34) quant à elle indique que la sensibilité diminue quand l'indice de liquidité est supérieur à 13. En se basant sur le sens logique de l'interprétation des régressions, la meilleure corrélation non linéaire est attribuée à la régression cubique pour les échantillons de silt à l'échelle régionale (figure 4-36). La régression linéaire quant à elle, reste la plus fiable.

Il est possible d'affirmer selon les données de silt, d'argile et de silt, que la sensibilité est plus grande dans la localité de La Baie, suivent par ordre Shipshaw, Jonquière et Chicoutimi.

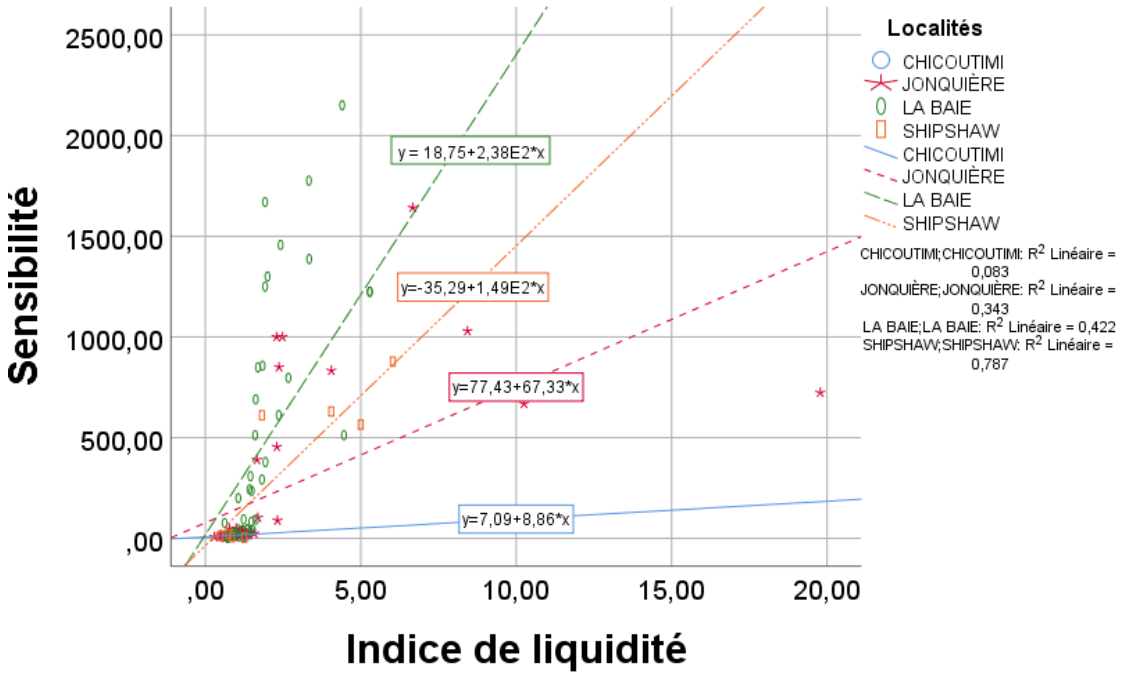


Figure 4-33 : Régression linéaire - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités

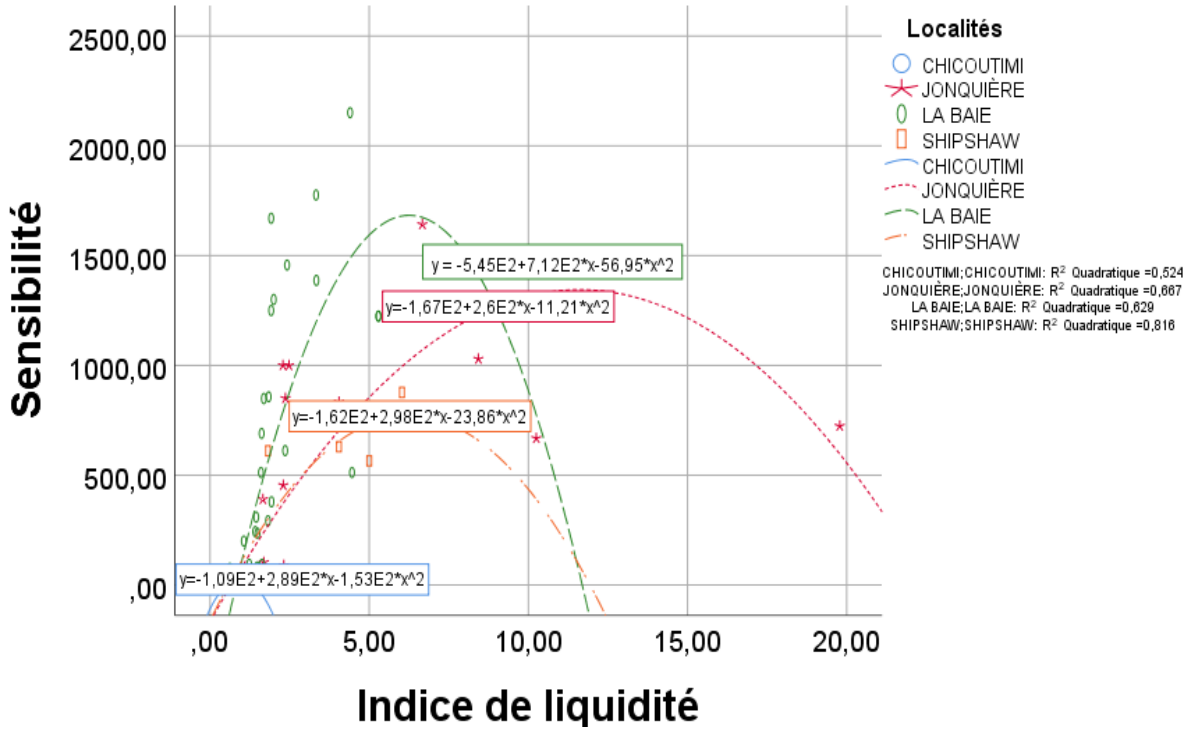


Figure 4-34 : Régression non linéaire quadratique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités

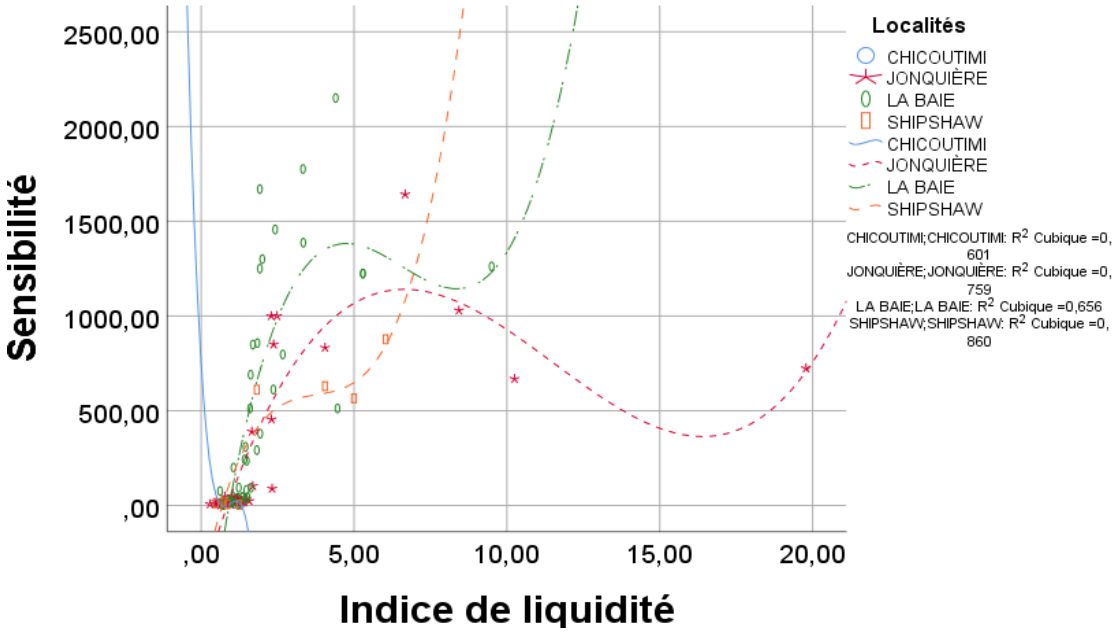


Figure 4-35 : Régression non linéaire cubique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités

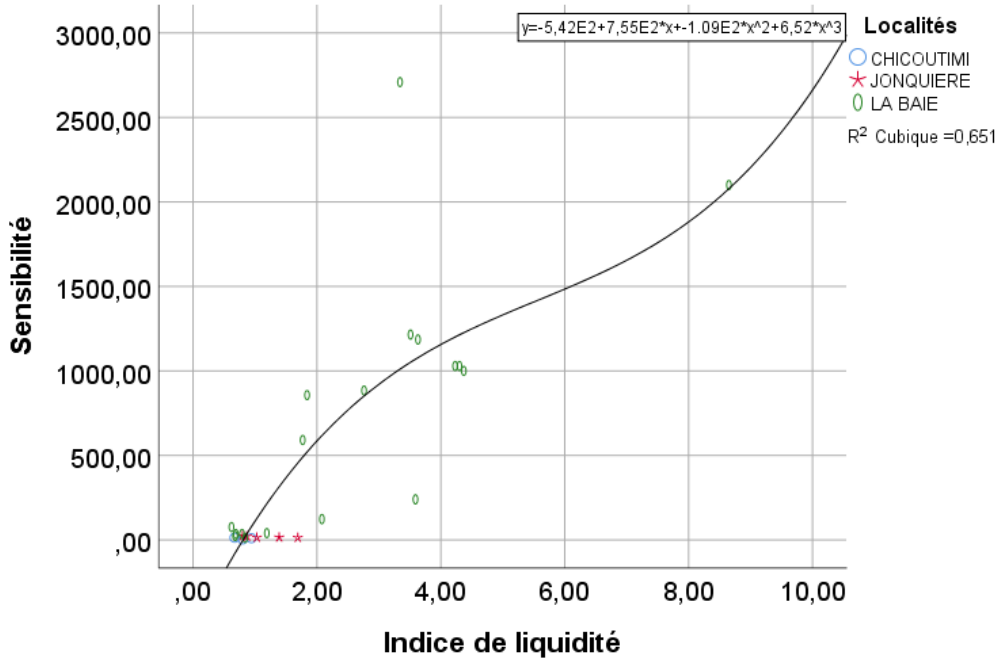


Figure 4-36 : Régression non linéaire cubique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt

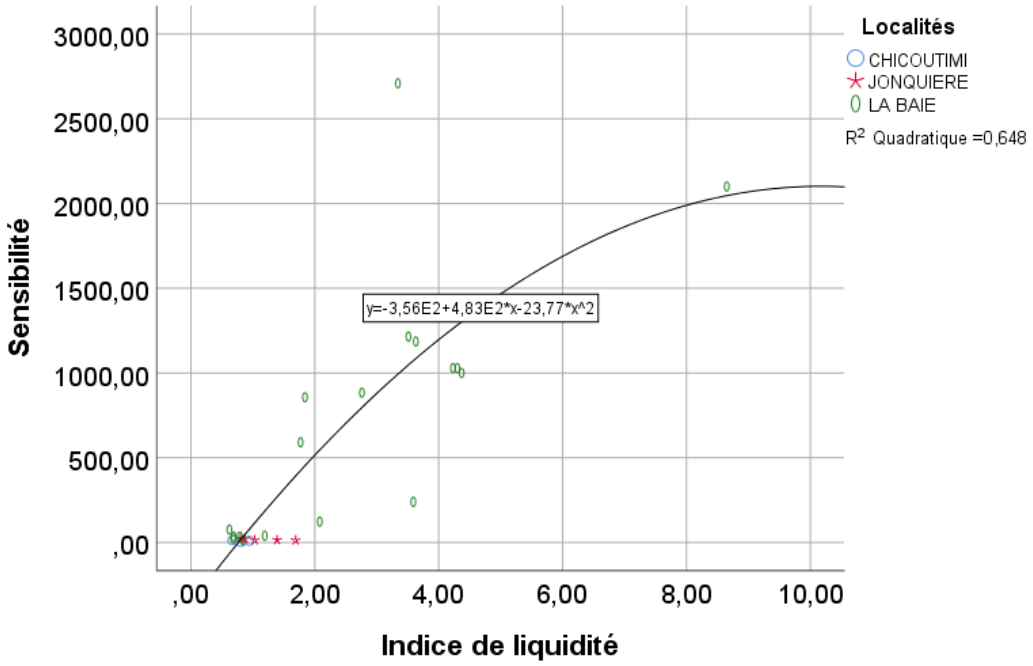


Figure 4-37: Régression non linéaire quadratique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt

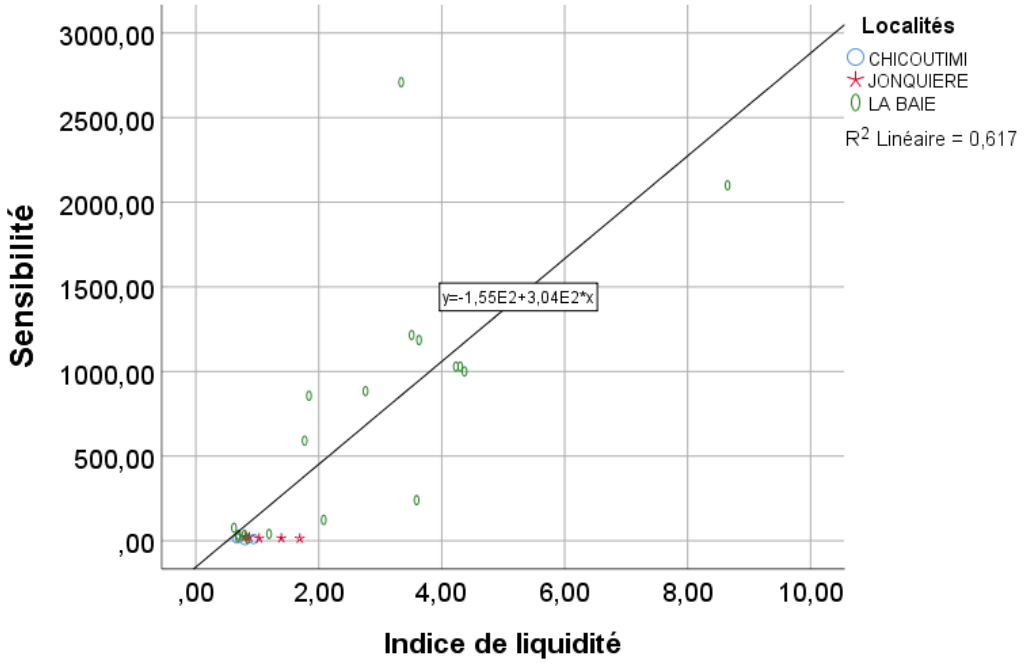


Figure 4-38 : Régression linéaire - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt

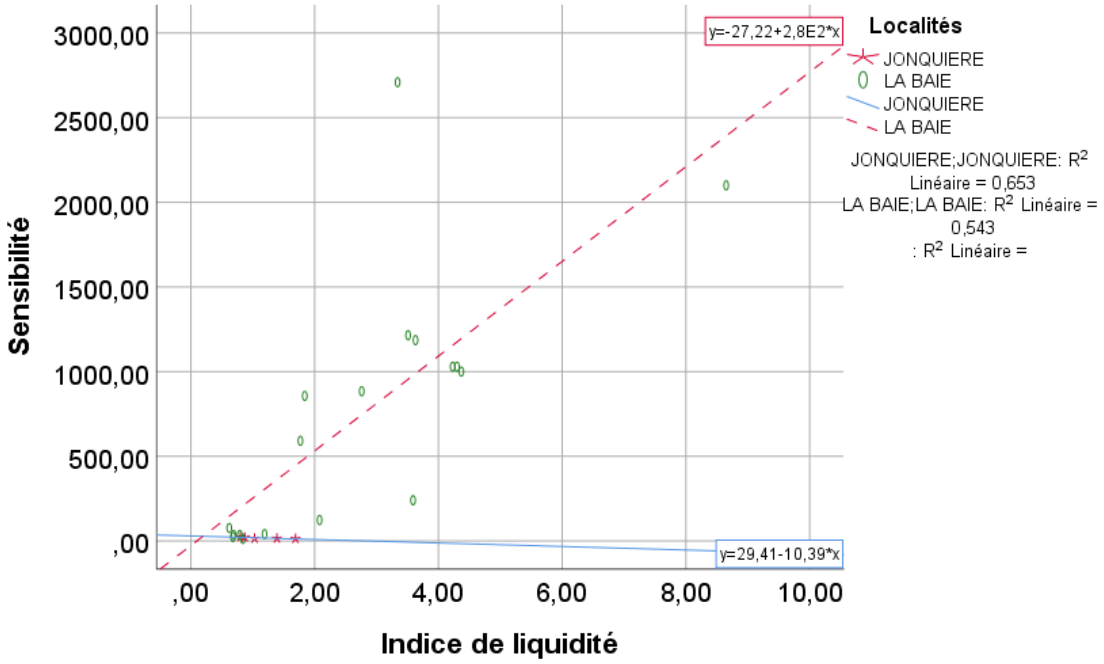


Figure 4-39 : Régression linéaire - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt dans plusieurs localités

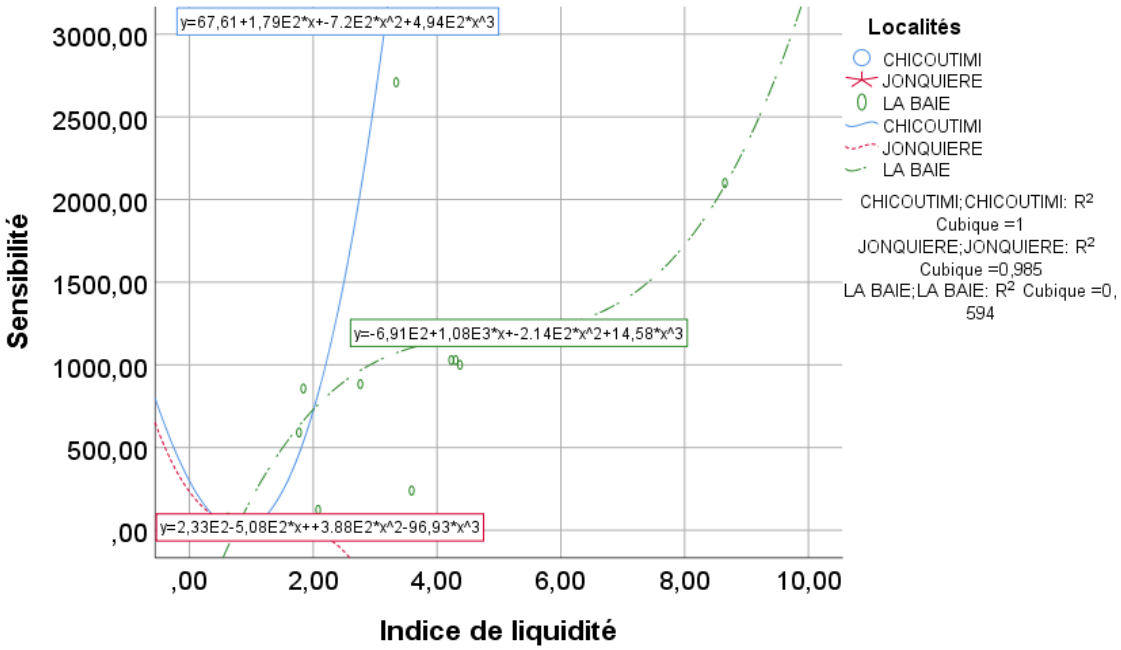


Figure 4-40 : Régression non linéaire cubique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt dans plusieurs localités

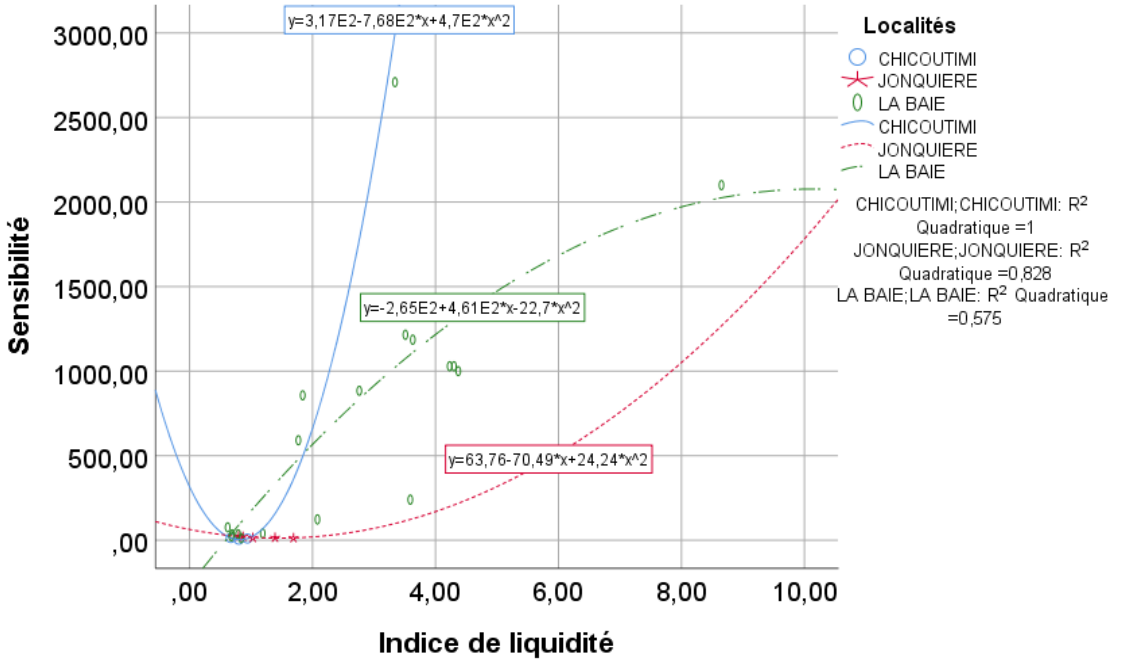


Figure 4-41 : Régression non linéaire quadratique - Sensibilité vs indice de liquidité pour des échantillons de silt dans plusieurs localités

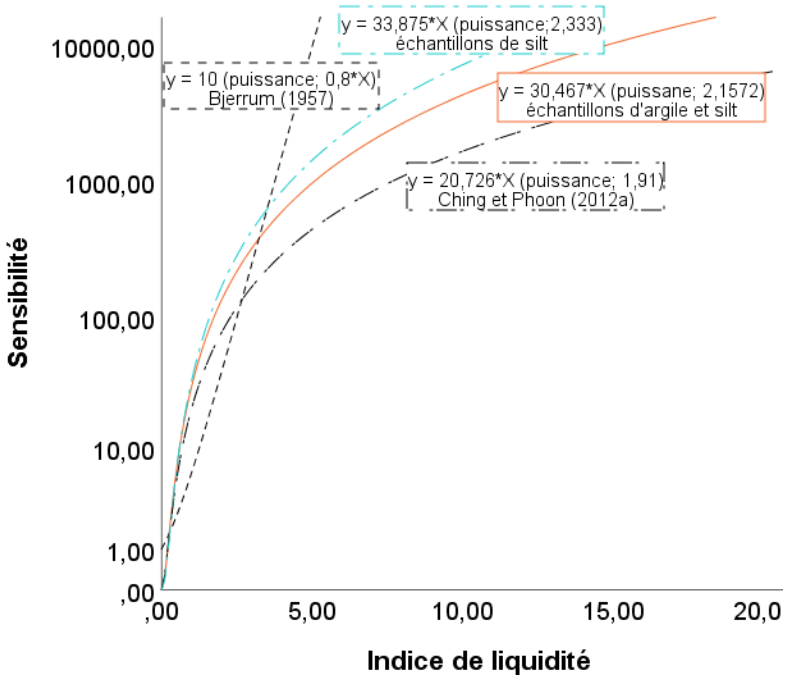


Figure 4-42 : Régressions (fonction puissance) – Comparaison de la sensibilité vs l'indice de liquidité pour des échantillons d'argile et de silt dans plusieurs localités avec relations de la revue de littérature

4.2.3.2. Corrélations entre la résistance de cisaillement pour échantillon intact (S_u) et la teneur en eau (W)

L'augmentation de la teneur en eau entraîne une diminution de la résistance au cisaillement pour les échantillons d'argile et de silt prélevés à Chicoutimi. La présence de l'eau interstitielle favorise la création de films d'eau absorbée, donc lorsque la teneur en eau augmente il y a aussi une augmentation de la répulsion intergranulaire et par la même occasion la perte de cohésion entre les grains de sol. Sachant que la quasi-totalité de la résistance au cisaillement des sols cohérents est due à la force de cohésion il est possible de conclure en conformité avec la figure 4-43 que, plus la teneur en eau augmente moins

la résistance au cisaillement est grande. La courbe de la régression cubique a une forme sinusoïdale ne donnant pas lieu à une interprétation juste de relation non linéaire (figure 4-44). La recherche bibliographique n'a pas révélé l'existence de cette relation.

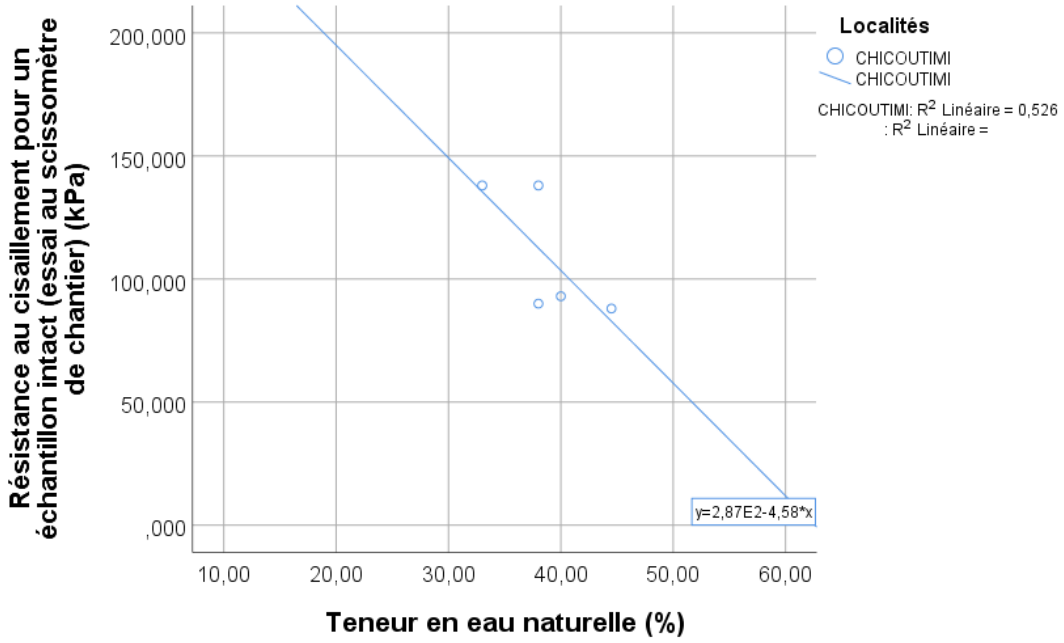


Figure 4-43: Relation linéaire entre la résistance au cisaillement et la teneur en eau naturelle pour la localité de Chicoutimi (échantillons d'argile et de silt)

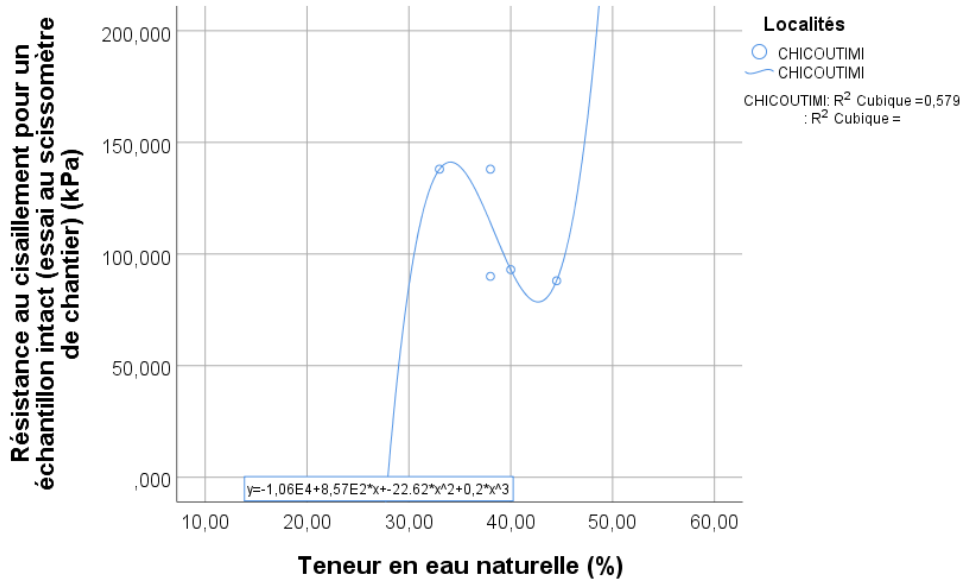


Figure 4-44 : Relation non linéaire cubique entre la résistance au cisaillement et la teneur en eau naturelle pour la localité de Chicoutimi (échantillons d'argile et de silt)

4.2.4. Sommaire des corrélations entre les paramètres géotechniques

Le tableau 4-2 présente pour chacune des corrélations existantes, l'équation correspondant au plus fort coefficient de régression. Le choix de la meilleure équation dépend du nombre de données disponibles et du type de régression. Sauf pour la régression linéaire, les régressions obtenues pour au moins 4 données ne sont pas jugées robustes. En raison de la flexibilité des régressions non linéaires, il est possible de percevoir un coefficient de régression élevées pour des variables qui ne sont plus corrélées au fur et à mesure que la taille de l'échantillon augmente. Pour diminuer ce risque un minimum de 4 données a été choisi arbitrairement pour qu'une corrélation soit prise en compte.

Tableau 4-2: Coefficients de corrélation et équations empiriques des régressions linéaires et non linéaires pour les paramètres géotechniques (Données du PACES et d'essais laboratoires effectués à l'UQAC)

Relations	Type de sol	Nombre d'observations	Localités	Coefficient de régression	Équations
Entre paramètres physiques					
I_P (W_L)	Argile et silt	177	Ch[1], Jonq[2], LB[3], Shw[4]	0,743	$I_P = -12,57+0,76\times W_L$
I_P (W_L)	Argile	159	Ch, Ch-N[5], H-S[6], Jonq, LB, TBY[7], N. Id[8]	0,955	$I_P = -15,27+0,84\times W_L$
I_P (W_L)	Sable	39	Ch, Jonq, LB, Shw	0,853	$I_P = -7,71+0,61\times W_L$
I_P (W_L)	Silt	83	Ch, Jonq, LB	0,929	$I_P = -9,32+0,68\times W_L$
I_P (W_L)	Silt et sable	10	Jonq et LB	0,759	$I_P = -10,4+0,77\times W_L$
W (W_L)	Argile	26	Ch-N, N. Id	0,573	$W = 13,59+0,65\times W_L$
W (W_L)	Argile	26	Ch-N, N. Id	0,61	$W = 30,62-1,15\times W_L+0,05\times W_L^2-4,65E-4\times W_L^3$
W (W_L)	Silt	43	Ch, Jonq, LB	0,511	$W = 21,38+0,44\times W_L$
W (W_L)	Silt	7	Jonq	0,509	$W = 22,2+0,53\times W_L$
W (W_L)	Silt	28	LB	0,65	$W = 22,56+0,37\times W_L$
ρ_d (W)	Argile	3	N. Id	0,826	$\rho_d = 2,5-0,02\times W$
Entre paramètres mécaniques et mécaniques					
S_u (σ'_p)	Argile et silt	7	Ch	0,519	$S_u = 42,24+0,17\times \sigma'_p$
S_u (σ'_p)	Argile et silt	19	Jonq	0,578	$S_u = -1,28E2+1,92\times \sigma'_p+-5,39E-3\times \sigma'^2_p+5,04E-6\times \sigma'^3_p$
S_u (σ'_p)	Argile et silt	22	LB	0,642	Non disponible
S_u (σ'_p)	Argile	5	Jonq et LB	0,725	Non disponible
S_u (σ'_p)	Silt	11	Jonq et LB	0,782	$S_u = 27,14+0,18\times \sigma'_p$
S_u (σ'_p)	Silt	11	Jonq et LB	0,859	$S_u = 3,08E2-1,64\times \sigma'_p+3,5E-3\times \sigma'^2_p-2,09E-6\times \sigma'^3_p$
S_t (σ'_p)	Argile et silt	6	Ch	0,807	$S_t = 1,42E2-1,54\times \sigma'_p+5,47E-3\times \sigma'^2_p-5,85E-6\times \sigma'^3_p$
S_t (σ'_p)	Argile et silt	6	Ch	0,781	$S_t = -2,21E2+1,25\times \sigma'_p-1,58E-3\times \sigma'^2_P$
S_t (S_u)	Argile et silt	7	Ch	0,533	$S_t = 45,21-0,25\times S_u$
S_t (S_u)	Argile et silt	7	Ch	0,579	$S_t = -7,16E2+19,99\times S_u-0,18\times S_u^2+5,09E-4\times S_u^3$

[1] Chicoutimi
[2] Jonquière
[3] La Baie
[4] Shipshaw
[5] Chicoutimi-Nord
[6] Hébertville-Station
[7] Canton-Tremblay
[8] Localité(s) non-identifiée(s)

Relations	Type de sol	Nombre d'observations	Localités	Coefficient de régression	Équations
S_t (S_u)	Argile et silt	7	Ch	0,553	$S_t = -2,36+0,59\times S_u-3,67E-3\times S_u^2$
S_{tc} (S_{urc})	Argile		N. Id	0,609	$S_t = 34,721\times \mathbf{S_{urc}}^{(-0,531)}$
S_{uc} (S_{urc})	Argile	49	Ch et N. Id	0,671	$S_{uc} = 19,97+18,56\times \mathbf{S_{urc\ r}}-0,63\times \mathbf{S_{urc}}^2+5,71E-3\times \mathbf{S_{urc}}^3$
S_{uc} (S_{urc})	Argile	48	N. Id	0,603	$S_{uc} = -0,23+ \mathbf{S_{ruc}} \times 0,06$
S_{uc} (S_{urc})	Argile	48	N. Id	0,619	$S_{uc} = -0,0213+ \mathbf{S_{ruc}}^{1,206}$
S_{uc} (S_{urc})	Argile	48	N. Id	0,639	$S_{uc}= 23,04+17,05\times \mathbf{S_{urc}} +-0,58\times \mathbf{S_{urc}}^2+5,28E-3\times \mathbf{S_{urc}}^3$
Entre paramètres physiques et mécaniques					
S_t (I_L)	Argile et silt	4	Shw	0,787	$S_t = -28,55+0,01\times I_L$
S_t (I_L)	Argile et silt	6	Ch	0,601	$S_t = -951+1210\times I_L+-200\times I_L^2+10,18\times I_L^3$
S_t (I_L)	Argile et silt	29	Jonq	0,759	$S_t = -4,27E2+5,46E2\times I_L+-57,73\times I_L^2+1,67\times I_L^3$
S_t (I_L)	Argile et silt	20	LB	0,656	$S_t =-9,51E2+1,21E3\times I_L+-2E2\times I_L^2+10,18\times I_L^3$
S_t (I_L)	Argile et silt	4	Shw	0,86	$S_t = -4,37E2+7,61E2\times I_L +-1,95E2\times I_L^2+17,28\times I_L^3$
S_t (I_L)	Argile et silt	6	Ch	0,524	$S_t = -1,09E2+2,89E2\times I_L -1,53E2\times I_L^2$
S_t (I_L)	Argile et silt	29	Jonq	0,667	$S_t = -1,67E2+2,6E2\times I_L -11,21\times I_L^2$
S_t (I_L)	Argile et silt	20	LB	0,629	$S_t = -5,45E2+7,12E2\times I_L -56,95\times I_L^2$
S_t (I_L)	Argile et silt	4	Shw	0,8119	$S_t = -1,62E2+2,98E2\times I_L-23,86\times I_L^2$
S_t (I_L)	Sable	5	Shw	0,52	$S_t = 5,47+1,13\times I_L$
S_t (I_L)	Silt	26	Ch, Jonq, LB	0,617	$S_t = -1,55E2+3,04E2\times I_L$
S_t (I_L)	Silt	26	Ch, Jonq, LB	0,651	$S_t = -5,42E2+7,55E2\times I_L-1,09E2\times I_L^2 +6,52\times I_L^3$
S_t (I_L)	Silt	26	Ch, Jonq, LB	0,648	$S_t = 3,56E2+4,83E2\times I_L-23,77\times I_L^2$
S_t (I_L)	Silt	5	Jonq	0,653	$S_t = 29,41-10,39\times I_L$
S_t (I_L)	Silt	18	LB	0,543	$S_t = -27,22+2,8E2\times I_L$
S_t (I_L)	Silt	5	Jonq	0,985	$S_t = 2,33E2-5,08E2\times I_L ++3,88E2\times I_L^2-96,93\times I_L^3$
S_t (I_L)	Silt	18	LB	0,594	$S_t = -6,91E2+1,08E3\times I_L -2,14E2\times I_L^2+14,58\times I_L^3$
S_t (I_L)	Silt	5	Jonq	0,828	$S_t = 63,76-70,49\times I_L +24,24\times I_L^2$
S_t (I_L)	Silt	18	LB	0,575	$S_t = -2,65E2+4,61E2\times I_L -22,7\times I_L^2$
σ'_p (W)	Argile	3	Ch	0,769	$\sigma'_p = 8,44E2-13,72\times W$
σ'_p (W)	Silt	13	Jonq et LB	0,627	$\sigma'_p = 1,33E3-22,15\times W$
σ'_p (W)	Silt	13	Jonq et LB	0,729	$\sigma'_p = -7,12E3+7,02E2\times W-20,27\times W^2+0,18\times W^3$
σ'_p (W)	Silt	13	Jonq et LB	0,68	$\sigma'_p = 3,13E3-1,19E2\times W+1,25\times W^2$
σ'_p(W)	Silt	9	LB	0,886	$\sigma'_p = 1,61E5-1,49E4\times W+4,6E2\times W^2-4,71\times W^3$
S_u(W)	Argile et silt	5	Ch	0,526	Su = 2,87E-4,58W
S_u(W)	Argile et silt	5	Ch	0,579	$Su = 1,06E4+8,57E2W+22,62W^2+0,2W^3$

4.3. Détermination des corrélations entre la profondeur et les paramètres géotechniques

La présentation des résultats est divisée en deux parties : les relations entre la profondeur et les paramètres physiques, les relations entre la profondeur et les paramètres mécaniques. Il faut noter que le niveau de la surface naturelle du sol est utilisé comme référence pour la profondeur, ainsi toute valeur négative de la profondeur représente la distance verticale par rapport au terrain naturel.

4.3.1. Corrélations entre la profondeur et les paramètres physiques

4.3.1.1. Corrélations entre la profondeur et la teneur en eau naturelle (W)

En témoignant que la teneur en eau variait en fonction de la profondeur (section 2.4), Bouchard et al, (1983) ont montré que la cimentation n'a pas été à l'origine de la consolidation des argiles du Saguenay. Le même résultat a été observé seulement pour les échantillons de sable dans les localités de Jonquière et Shipshaw (figure 4-45 et figure 4-46). Aucune corrélation n'a été trouvée pour les autres types de sols également pour les échantillons d'argile et ou de silt. Ce précédent résultat en plus de celui de Chicoutimi est contradictoire à celui de Bouchard et al (1983) sans doute parce que dans notre étude, les données collectées n'ont pas été mesurées dans le but d'étudier les corrélations entre les paramètres géotechniques de la région SLSJ.

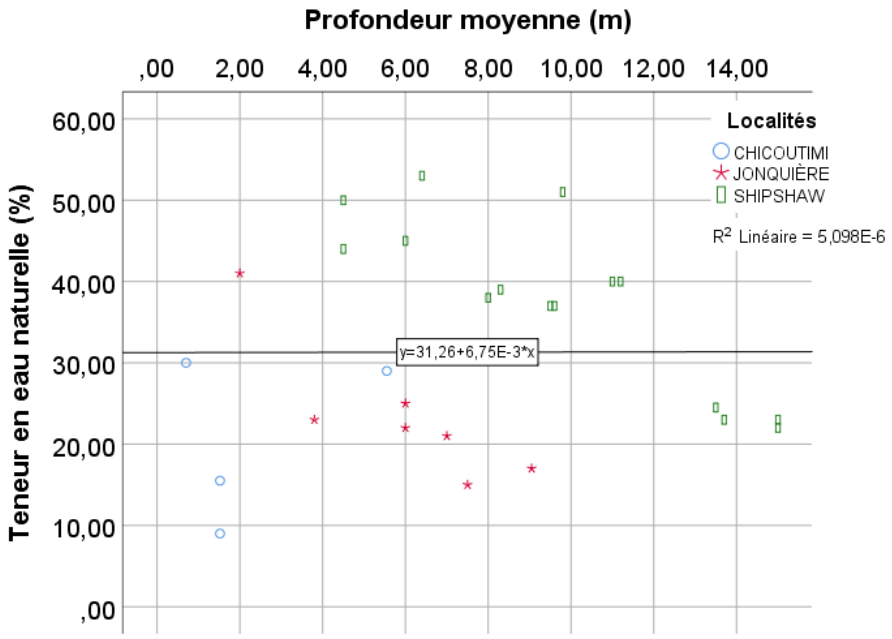


Figure 4-45 : Relation entre la profondeur et la teneur en eau pour les données d'échantillons de sable

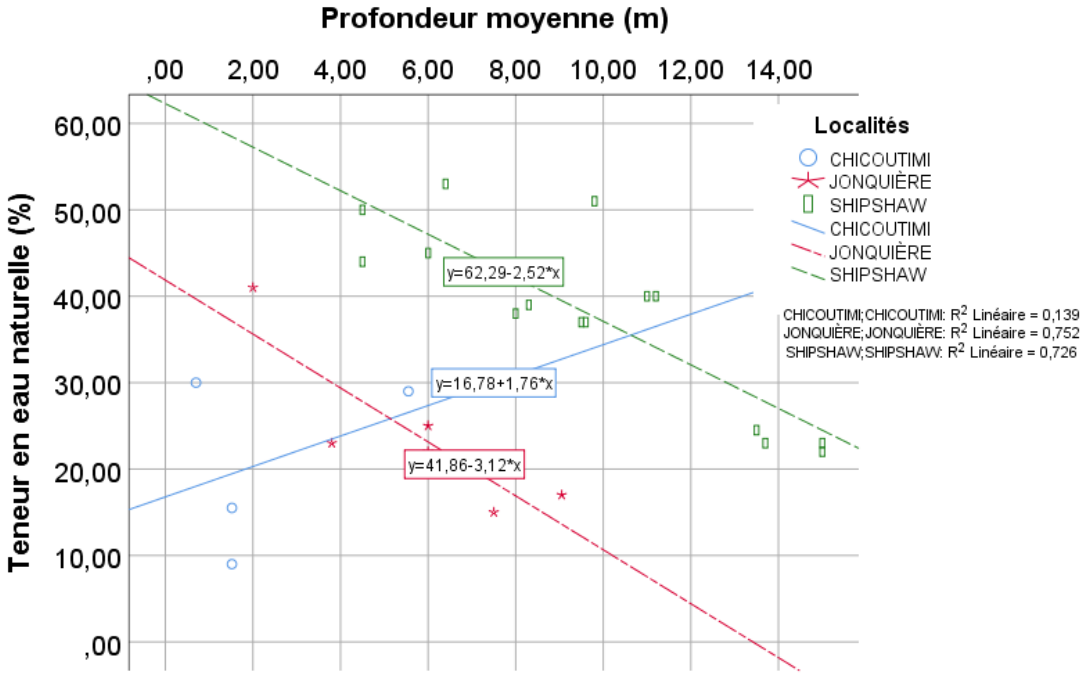


Figure 4-46:Relation entre la profondeur et la teneur en eau pour les données d'échantillons de sable dans plusieurs localités

4.3.1.2. Corrélations entre la profondeur, la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_p) et l'indice de plasticité (I_P)

Ce sont des résultats contradictoires qui ont été observés pour les relations non linéaires entre la limite de liquidité, la limite de plasticité et la profondeur des échantillons d'argile et aussi de sable (figure 4-45à figure 4-56). Seulement 3 données d'échantillons d'argile ont permis d'observer une régression de type linéaire pour la municipalité de Canton-Tremblay (figure 4-48 et figure 4-50). Pour les échantillons majoritairement composés de sable, des valeurs de W_L, W_P et I_P ont pu être calculées (figure 4-52, figure 4-53, figure 4-55 et figure 4-56).

En tenant compte uniquement des régressions linéaires, les limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_p) diminuent lorsque la profondeur augmente. L'évolution de W_L et de W_p en fonction de la profondeur permet d'avoir une idée de la présence d'argile sur l'étendue géographique étudiée. Ainsi pour les échantillons de sable de Chicoutimi et Shipshaw, la quantité d'argile diminue au fur et à mesure que la profondeur est grande contrairement à ceux de Jonquière et de La Baie. Cette hypothèse est soutenue par la relation entre l'indice de plasticité (I_p) et la profondeur (Figure 4-51 et Figure 4-56), car le sens d'évolution des droites de régression obtenues par la relation I_p (Prof) ressemble à celle de W_L (Prof) ou W_p (Prof). Cependant l'augmentation de la quantité d'argile pour les échantillons de La Baie est très peu variable étant donné que les pentes de régressions W_L (Prof), W_p (Prof) et I_p (Prof)

sont très faibles, cela peut traduire une homogénéité de la nature de sol des échantillons étudiés.

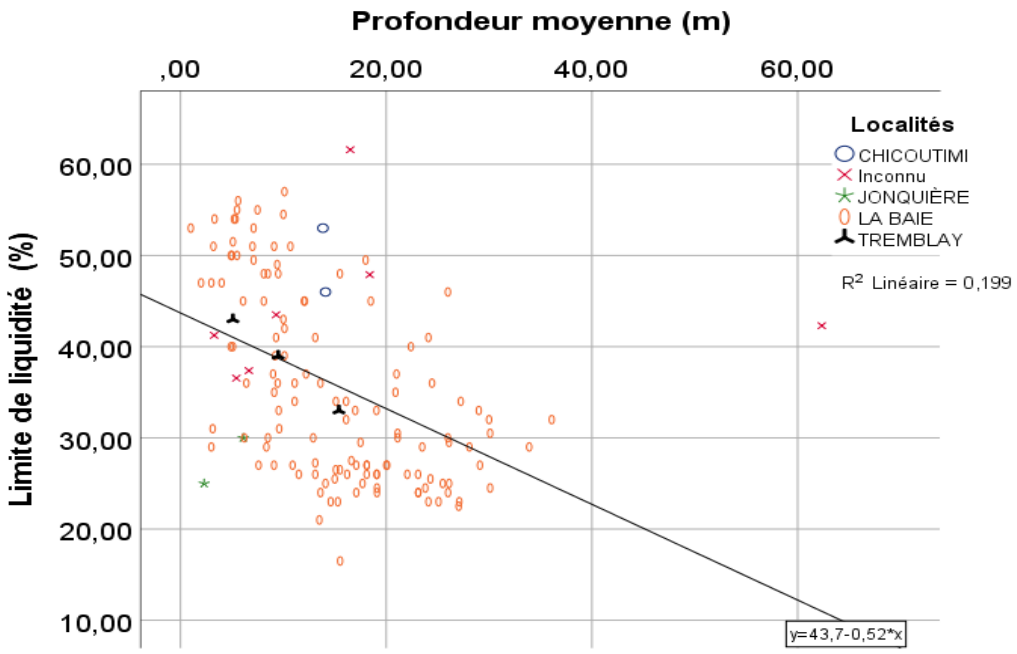


Figure 4-47: Relation entre la profondeur et la limite de liquidité pour les données d'échantillons l'argile

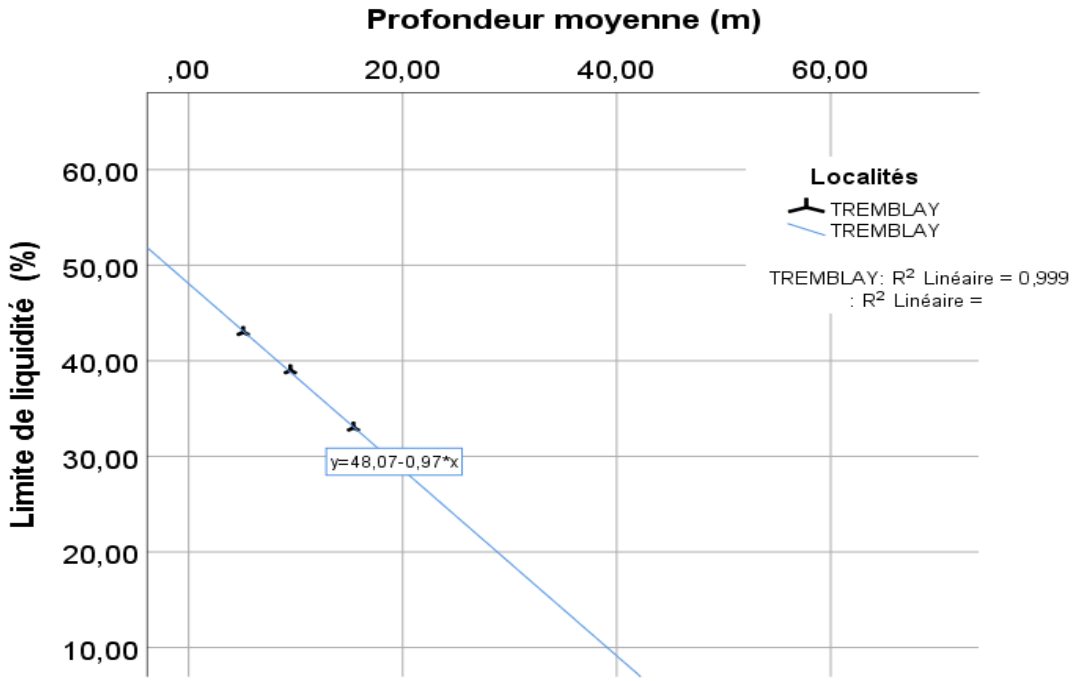


Figure 4-48: Relation entre la profondeur et la limite de liquidité pour les données d'échantillons d'argile dans la localité de Canton-Tremblay

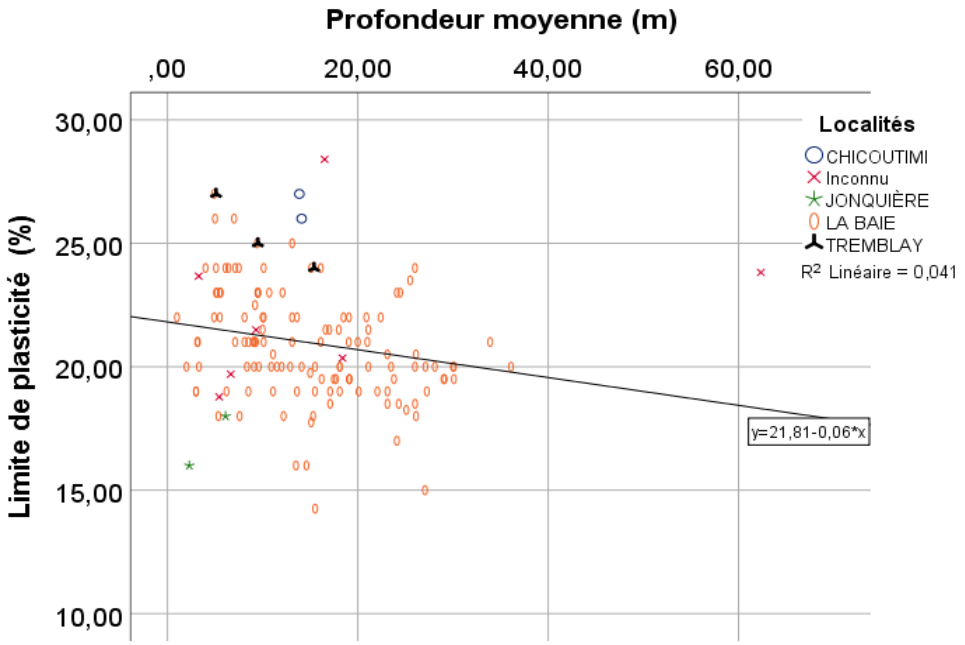


Figure 4-49:Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les données d'échantillons d'argile

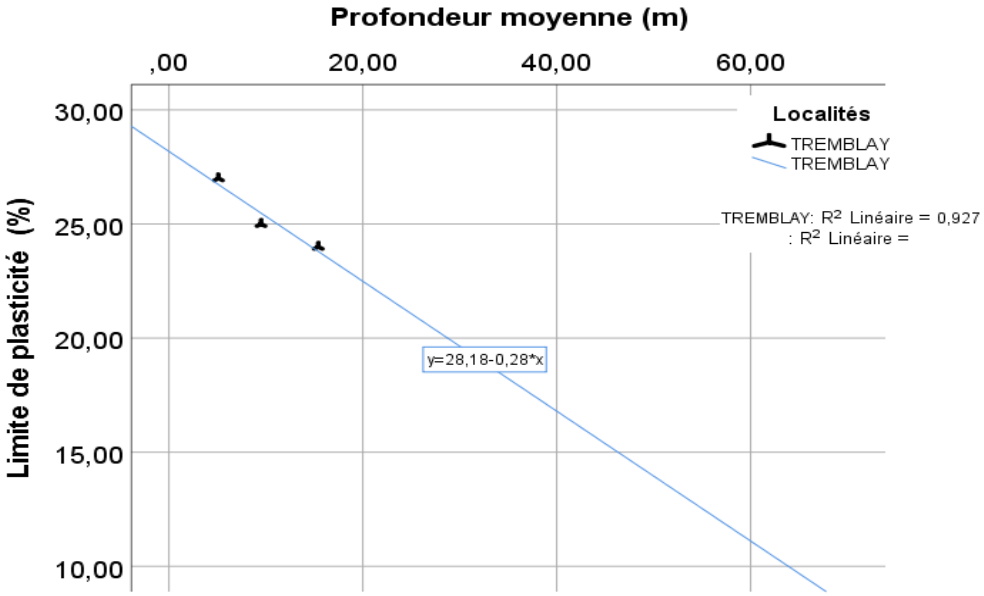


Figure 4-50: Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les échantillons d'argile dans la localité de Canton-Tremblay

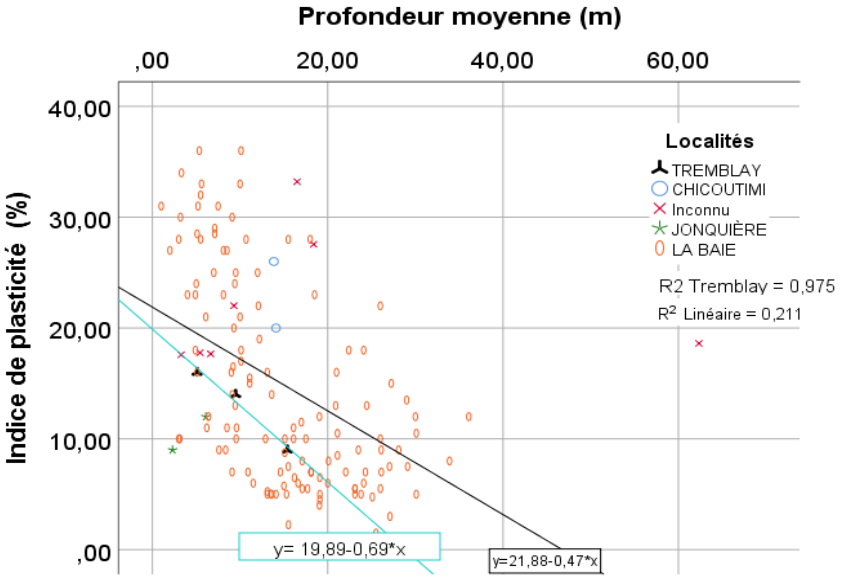


Figure 4-51:Relation linéaire entre la profondeur et l'indice de plasticité pour les échantillons d'argile

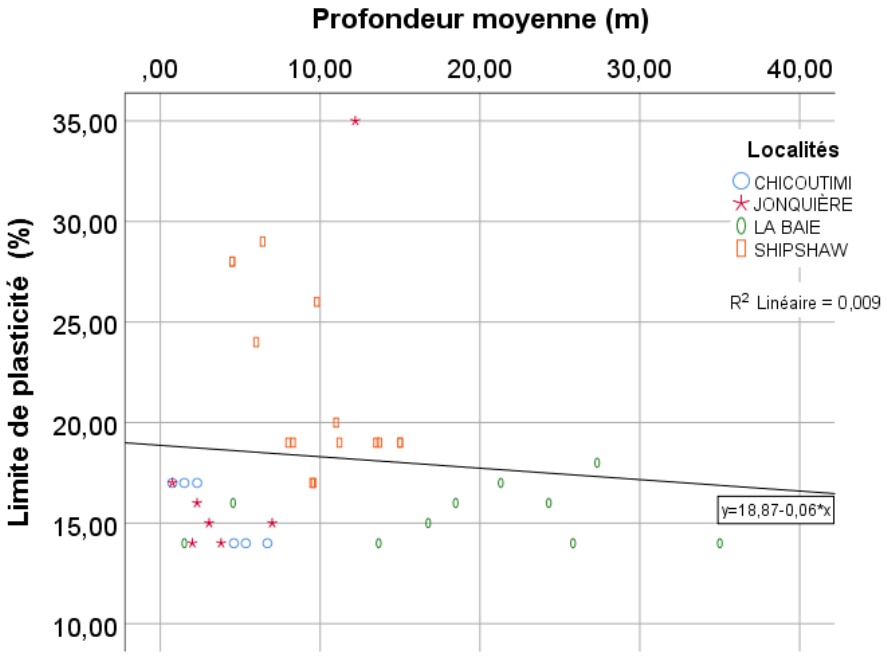


Figure 4-52: Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les échantillons de sable

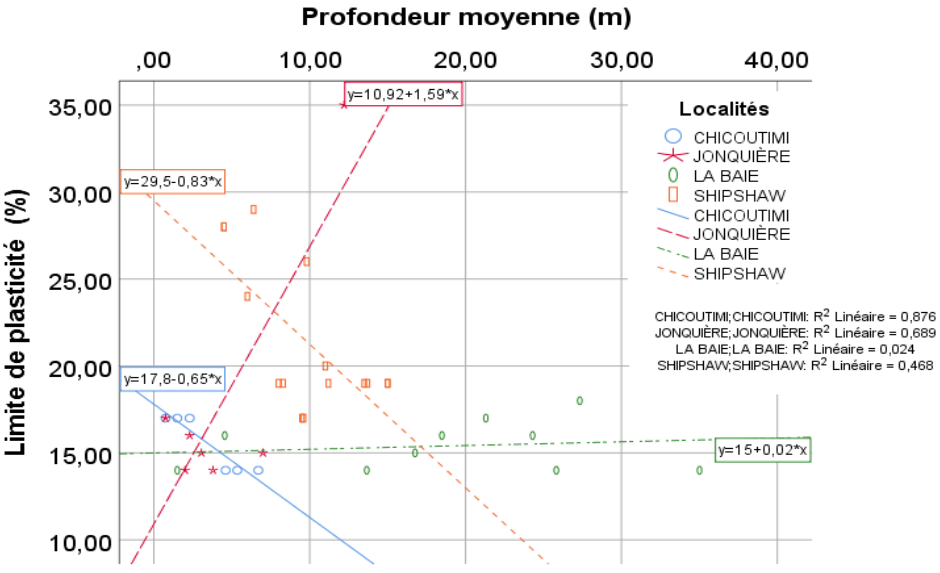


Figure 4-53:Relation linéaire entre la profondeur et la limite de plasticité pour les échantillons de sable dans plusieurs localités

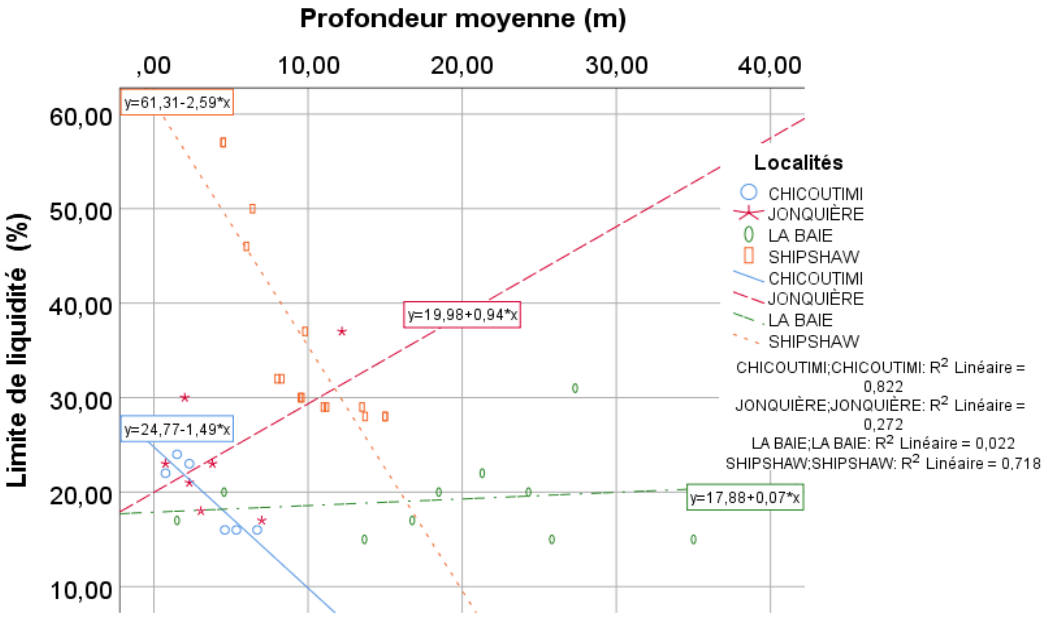


Figure 4-54: Relation linéaire entre la profondeur et la limite de liquidité pour les échantillons de sable dans plusieurs localités

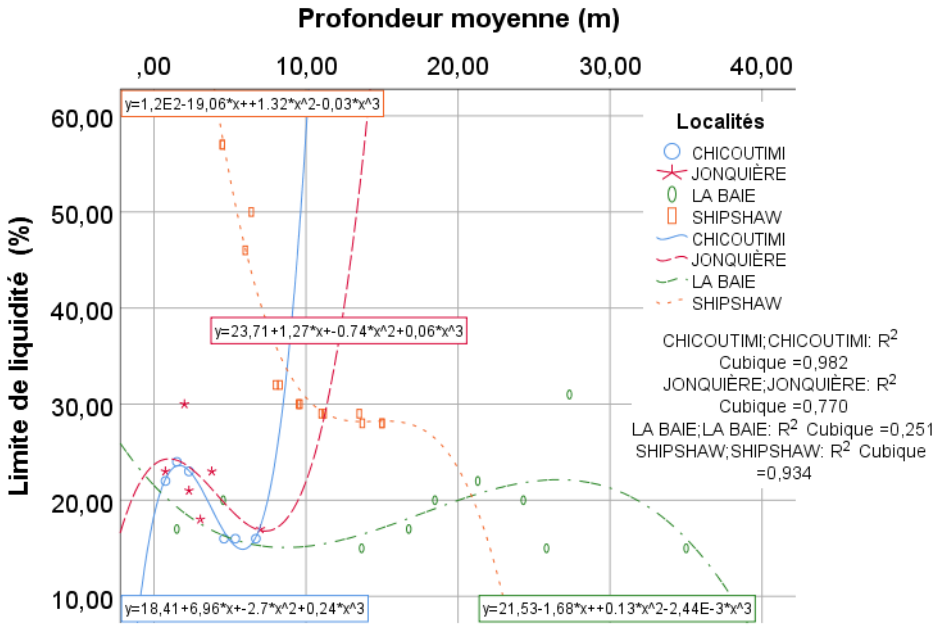


Figure 4-55: Relation non linéaire entre la profondeur et la limite de liquidité pour les échantillons de sable dans plusieurs localités

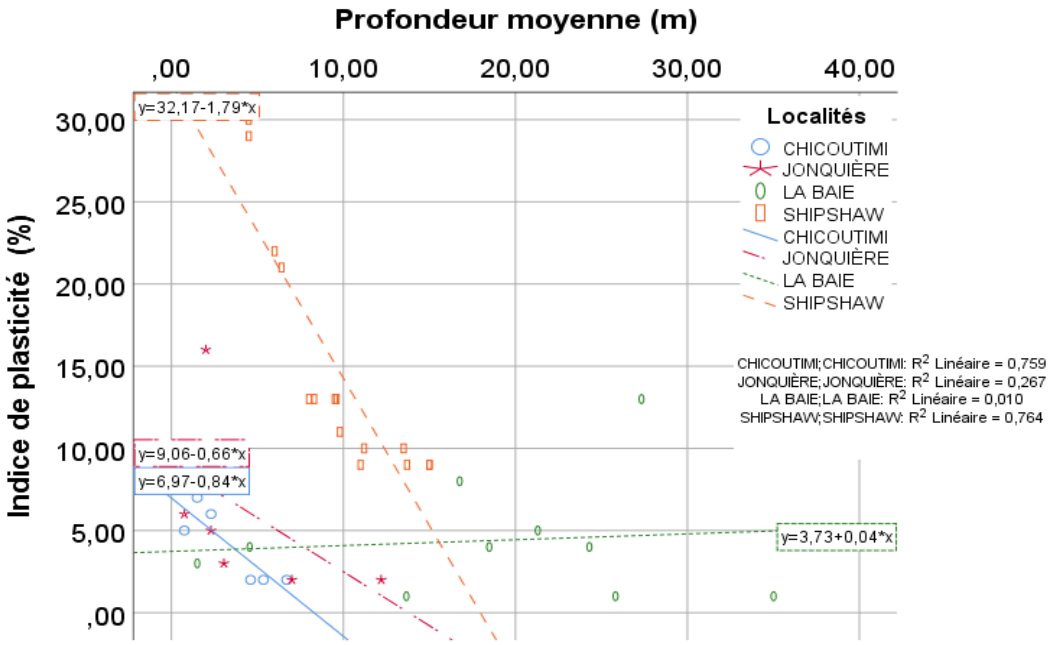


Figure 4-56: Relation linéaire entre la profondeur et l'indice de plasticité pour les échantillons de sable

4.3.1.3. Relation entre le poids volumique (γ) et la profondeur

La relation entre le poids volumique et la profondeur est aussi une corrélation pouvant donner une idée sur la composition granulaire et la stratification d'un dépôt, étant donné que le poids volumique est un paramètre physique permettant de classifier un sol. La relation γ (Prof) donne une idée sur la stratigraphie présente dans le dépôt observé (figure 4-57). À Jonquière la taille des grains diminue avec la profondeur, à La Baie c'est l'inverse. L'ensemble des données ne permet pas une appréciation générale de la relation.

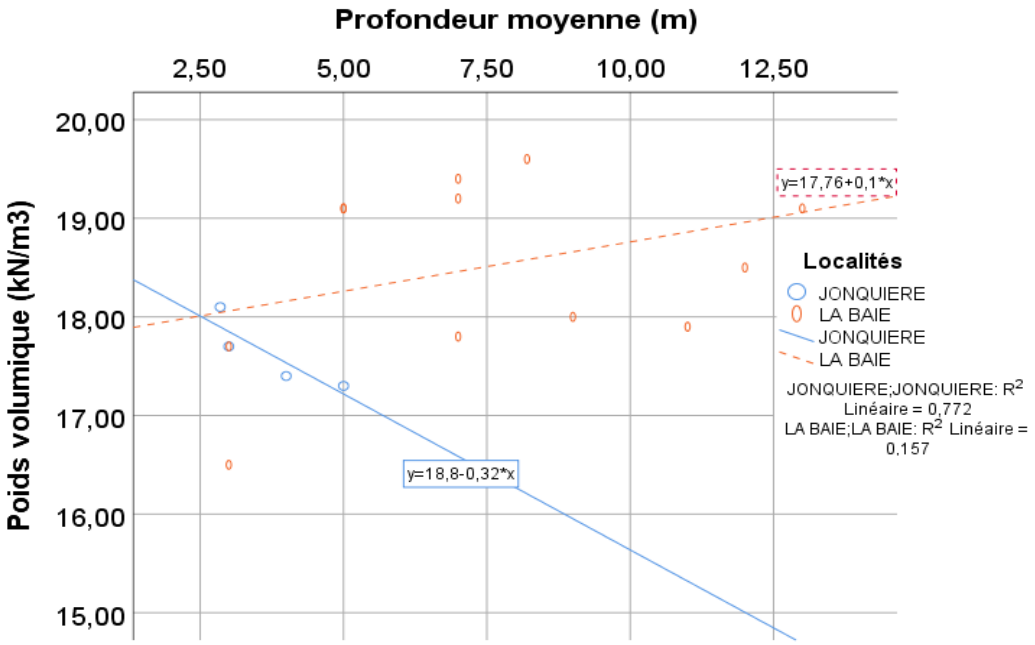


Figure 4-57: Relation linéaire entre la profondeur et le poids volumique pour les échantillons de silt dans plusieurs localités

4.3.2. Corrélations entre la profondeur et les paramètres mécaniques

4.3.2.1. Corrélation entre la profondeur, la contrainte de préconsolidation et la résistance au cisaillement

Bouchard et al (1983) ont utilisé les relations entre la contrainte de pré consolidation ($\sigma'p$), la résistance au cisaillement et la profondeur pour déterminer l'élévation des couches d'argiles en fin de déposition. Dans cette section du document, la profondeur peut être désignée par des valeurs négatives ou positives, afin de pouvoir différencier la position des échantillons par rapport au niveau horizontal du terrain naturel. Les distances verticales en dessous de cette référence sont marquées par des valeurs négatives et celles au-dessus prennent des valeurs positives. Pour les secteurs Jonquière, ils ont trouvé respectivement une épaisseur de dépôts évaluée à environ 120 m et 160 m. En suivant cette hypothèse

pour la même relation $\sigma'p$ (Prof), l'épaisseur des couches argileuses et silteuses en fin de déposition serait d'environ 15 m pour la région de Chicoutimi et 28 m environ en dessous du terrain naturel actuel de la région de Shipshaw (figure 4-58). Cette analyse semble logique pour la région de Shipshaw qui est plus proche du rivière Saguenay, les dépôts argileux ont pu subir une érosion fluviale. La relation $\sigma'p$ (Prof) pour les mêmes échantillons de Shipshaw montre également que la contrainte préconsolidation augmente au fur et à mesure que la profondeur est faible (figure 4-58). Cette observation peut s'expliquer par une topographie inclinée ou dépressive où contrainte de préconsolidation diminue au lieu de croître. Cependant la précédente hypothèse n'est pas plausible vu que 2 échantillons sur 3 seulement ont été prélevés dans le même forage : il pourrait s'agir d'échantillons homogènes prélevés à des distances proches, s'il existe un lien de dépendance entre la contrainte de préconsolidation et la profondeur alors l'existence de corrélation entre eux devient une évidence. Par contre une hétérogénéité des échantillons expliquerait mieux l'inégale répartition de charges au-dessus du dépôt intervenue au cours de son histoire géologique. Dans le cas de Chicoutimi (figure 4-58) il semblerait que les dépôts argileux en fin de déposition se trouvent à niveau stratigraphique plus bas que celui de Jonquière obtenu par Bouchard et al. (1983).

Quant à Chambord, selon la relation S_u (Prof), l'élévation des dépôt argileux où ont été prélevés les échantillons seraient d'environ 5 m (figure 4-59). La relation entre la profondeur et la résistance au cisaillement est faible à l'échelle régionale pour les

échantillons de sable (figure 4-60), tandis que pour la localité de La Baie, elle est assez élevée (figure 4-61). Il est possible aussi de remarquer que les données de la résistance au cisaillement pour échantillons de sable remaniés sont élevées et fortement corrélés avec la profondeur (figure 4-62).

La distance entre les points de prélèvement des échantillons peut jouer en faveur de la force de corrélation entre la profondeur et les paramètres géotechniques.

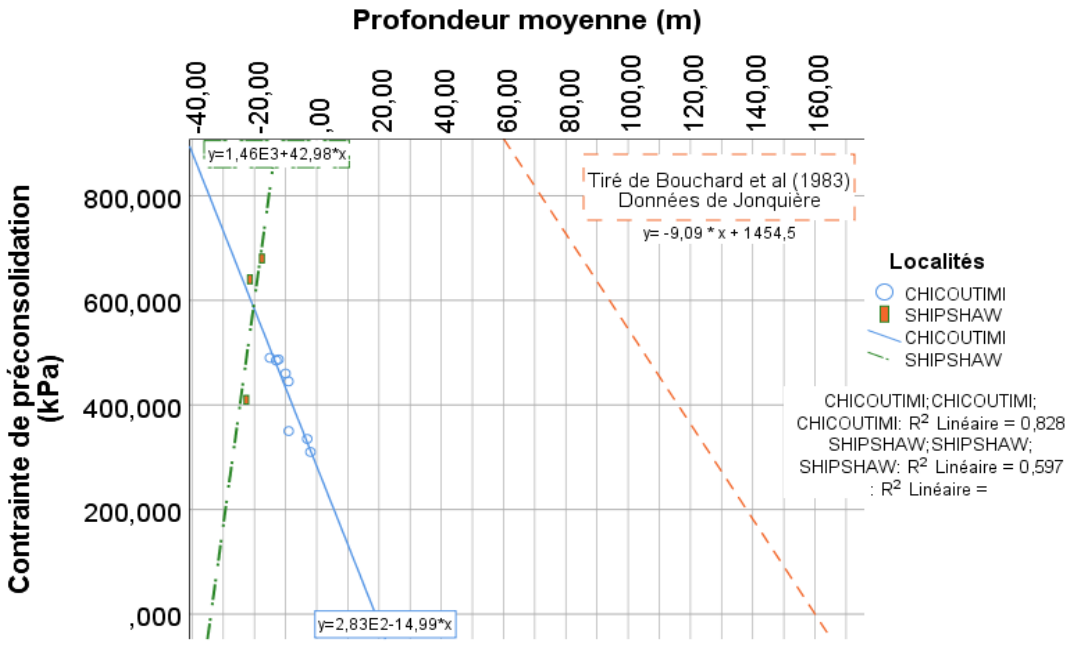


Figure 4-58 : Comparaison entre la profondeur et la contrainte de préconsolidation pour les échantillons d'argile et le silt dans plusieurs localités avec les résultats de Bouchard et al. (1983) à Jonquière

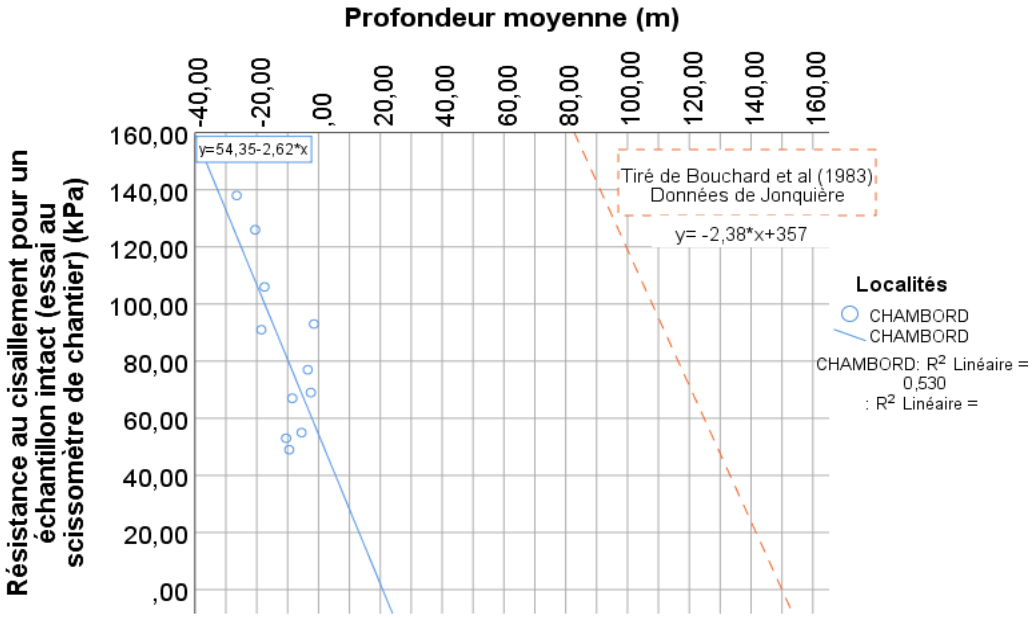


Figure 4-59 : Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour les échantillons d'argile intact dans la localité de Chambord

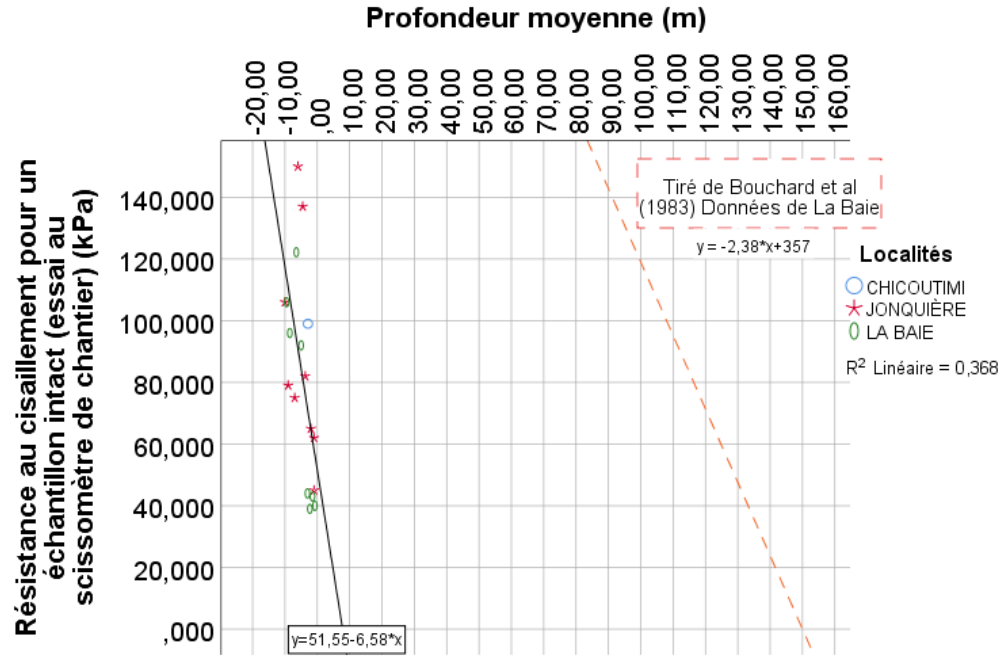


Figure 4-60: Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour les échantillons de sable intacts

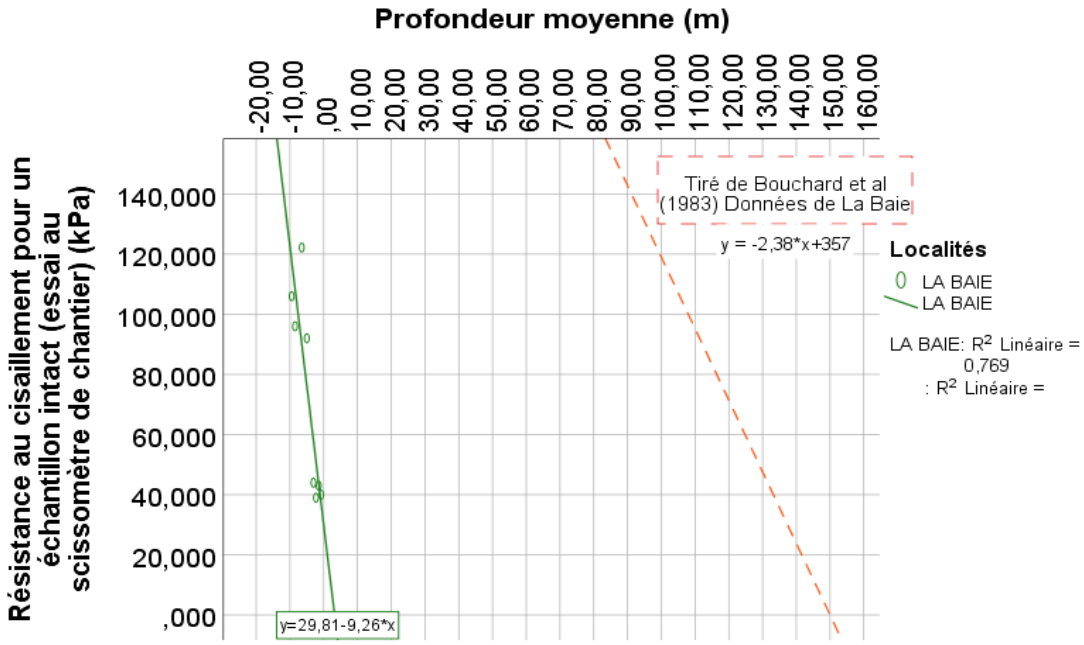


Figure 4-61: Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour les échantillons de sable intacts dans la localité de La Baie

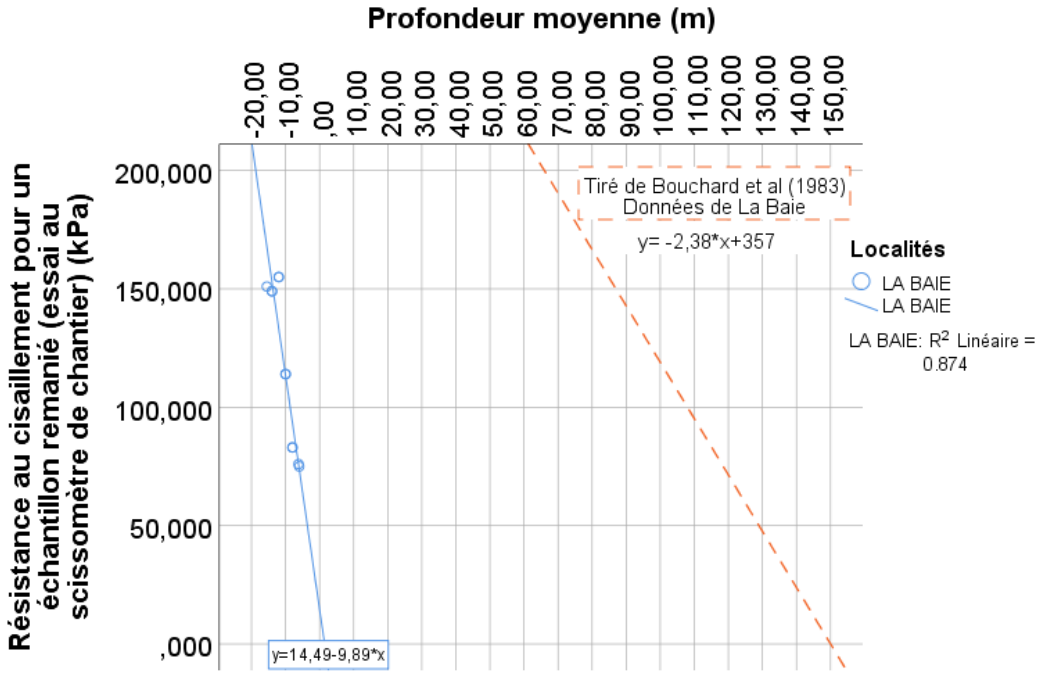


Figure 4-62 : Relation linéaire entre la profondeur et la résistance au cisaillement pour échantillons d'argile et de silt remaniés dans la localité de La Baie

4.3.2.2. Corrélation entre la profondeur et le nombre de coups (N)

Le nombre de coups mesuré à l'aide d'essai pressiométrique est un paramètre géotechnique servant à évaluer la résistance d'un sol. La résistance d'un sol homogène croît avec la profondeur. Aucune corrélation entre le nombre de coups et la profondeur n'a été trouvée pour les échantillons de sable à l'échelle régionale (figure 4-63), ni à l'échelle locale. Les échantillons étudiés seraient donc hétérogènes mais majoritairement composés de sable.

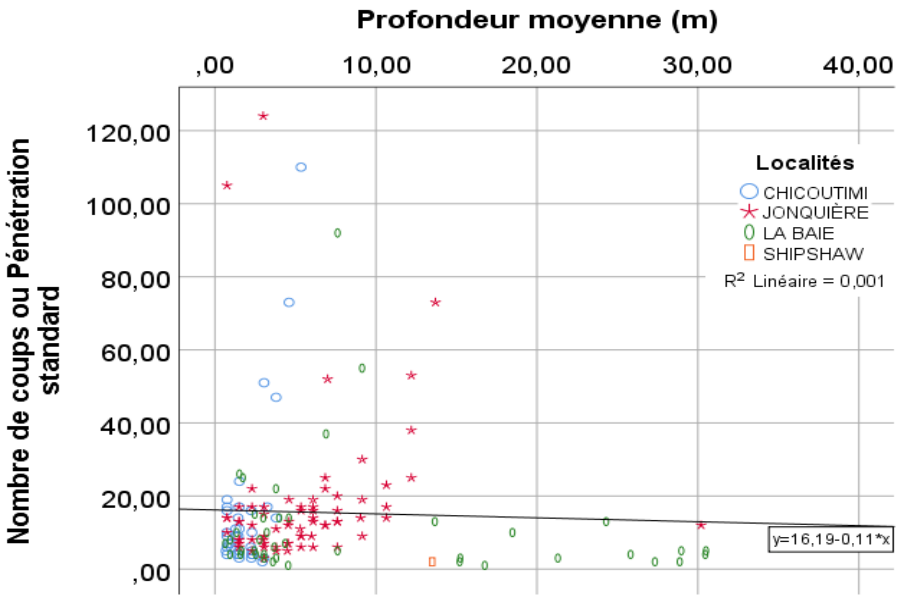


Figure 4-63:Relation linéaire entre la profondeur et le nombre de coups pour des échantillons de sable

4.3.3. Sommaire des corrélations entre les paramètres géotechniques et la profondeur

Le tableau 4-3 présente pour chacune des corrélations existantes, l'équation correspondant au plus fort coefficient de régression. Le choix de la meilleure équation dépend du nombre de données disponibles et du type de régression. Sauf pour la régression linéaire, les régressions obtenues pour moins de 4 données ne sont pas jugées robustes. En raison de la flexibilité des régressions non linéaires, il est possible de percevoir un coefficient de régression élevées pour des variables qui ne sont plus corrélées au fur et à mesure que la taille de l'échantillon augmente. Pour diminuer ce risque le chiffre 4 a été choisi arbitrairement.

Tableau 4-3 : Coefficients de corrélation et équations empiriques des régressions linéaires et non linéaires pour les paramètres géotechniques et la profondeur (Données du PACES et d'essais laboratoires effectués à l'UQAC)

Relation	Type de sol	Nombre d'observations	Localités	Coefficient de régression	Équation
Entre les paramètres physiques et la profondeur					
W (Prof)	Sable	7	Jonq	0,752	W= 3,1208Prof + 41,863
W (Prof)	Sable	15	Shw	0,726	W = 2,5195 Prof + 62,29
W (Prof)	Sable	7	Jonq	0,881	$W = 0,1977\ Prof^3 + 3,8102\ Prof^2 + 25,019\ Prof + 76,624$
W (Prof)	Sable	15	Shw	0,787	$W = 0,006\ Prof^3 - 0,0496\ Prof^2 - 0,3353\ Prof + 47,415$
W (Prof)	Sable	7	Jonq	0,8333	$W = 0,4583\ Prof^2 + 8,0865\ Prof + 53,024$
W (Prof)	Sable	15	Shw	0,787	$W = -0,2256\ Prof^2 - 1,9111\ Prof + 43,162$
W (Prof)	Silt	7	Jonq	0,499	$W = -0,9062\ Prof^3 - 9,143\ Prof^2 - 28,536\ Prof + 19,41$
W (Prof)	Silt	7	Jonq	0,57	$W = -1,4754\ Prof^2 - 10,523\ Prof + 29,501$
W_L (Prof)	Argile	3	TBY	0,999	$W_L = - 0,9734\ Prof + 48,068$
W_L (Prof)	Sable	6	Ch	0,822	$W_L = 1,4927\ Prof + 24,774$
W_L (Prof)	Sable	15	Shw	0,718	$W_L = 2,5866\ Prof + 61,31$
W_L (Prof)	Sable	6	Ch	0,982	$W_L = -0,2399\ Prof^3 - 2,6964\ Prof^2 - 6,9636\ Prof + 18,408$
W_L (Prof)	Sable	7	Jonq	0,77	$W_L = -0,0591\ Prof^3 - 0,7355\ Prof^2 - 1,2747\ Prof + 23,707$
W_L (Prof)	Sable	15	Shw	0,934	$W_L = 0,0305\ Prof^3 + 1,3213\ Prof^2 + 19,055\ Prof + 119,56$
W_L (Prof)	Sable	6	Ch	0,825	$W_L = 0,0541\ Prof^2 + 1,8885\ Prof + 25,247$
W_L (Prof)	Sable	7	Jonq	0,696	$W_L = 0,3759\ Prof^2 + 4,0385\ Prof + 29,657$
W_L (Prof)	Sable	15	Shw	0,834	$W_L = 0,4344\ Prof^2 + 11,116\ Prof + 98,131$
W_L (Prof)	Silt	9	Jonq	0,556	$W_L = -0,0048\ Prof^3 - 0,3213\ Prof^2 - 5,3094\ Prof + 29,622$
W_L (Prof)	Silt	9	Jonq	0,48	$W_L = -0,1073\ Prof^2 - 3,3305\ Prof + 32,932$
W_P (Prof)	Argile	3	TBY	0,927	$W_P = -92,51+3,26 \times W_P$
W_P (Prof)	Sable	6	Ch	0,876	$W_P = -24,37+1,34 \times W_P$
W_P (Prof)	Sable	7	Jonq	0,689	$W_P = 0,6572\ Prof + 9,0627$
W_P (Prof)	Sable	15	Shw	0,468	$W_P = 0,8255\ Prof + 29,502$
I_P (Prof)	Argile	3	TBY	0,975	$I_P = 0,6889\ Prof + 19,889$
I_P (Prof)	Sable	6	Ch	0,759	$I_P = 0,8415\ Prof + 6,9731$

Relation	Type de sol	Nombre d'observations	Localités	Coefficient de régression	Équation
I_P (Prof)	Sable	15	Shw	0,764	I_P =1,7912 Prof + 32,167
I_P (Prof)	Sable	6	Ch	0,963	I_P= -0,1606 Prof^3 - 1,8372 Prof^2 - 5,0544 Prof + 2,4308
I_P (Prof)	Sable	15	Shw	0,985	I_P = 0,0236 Prof^3 + 0,9799 Prof^2 + 13,7 Prof + 73,639
I_P (Prof)	Sable	6	Ch	0,759	I_P = 0,0041 Prof^2 + 0,8716 Prof + 7,0092
I_P (Prof)	Sable	15	Shw	0,977	I_P= 0,2936 Prof^2 + 7,5568 Prof + 57,059
I_L (Prof)	Sable	3	Jonq	0,586	I_L = -0,3124 Prof + 0,5803
I_L (Prof)	Sable	18	Jonq et Shw	0,524	I_L = 0,0062 Prof^3 + 0,1334 Prof^2 + 0,7663 Prof + 2,3943
Y (Prof)	Silt	4	Jonq	0,772	Y = 0,3163 Prof + 18,799×Y
Entre les paramètres mécaniques et la profondeur					
σ'_p(Prof)	Argile et silt	7	Ch	0,828	σ'_p =-14,989 Prof + 282,82
σ'_p(Prof)	Argile et silt	3	Shw	0,597	σ'_p = 42,982 Prof + 1459,9
σ'_p(Prof)	Argile et silt	7	Ch	0,849	σ'_p = 0,2627 Prof^3 + 6,8649 Prof^2 + 35,619 Prof + 368,6
σ'_p(Prof)	Argile et silt	7	Ch	0,828	σ'_p =-0,0862 Prof^2 - 16,387 Prof + 278,84
σ'_p(Prof)	Silt	13	Jonq et LB	0,488	σ'_p = -37,415 Prof + 258,35
σ'_p(Prof)	Silt	13	Jonq et LB	0,686	σ'_p = -0,1725 Prof^3 - 11,867 Prof^2 - 192,47 Prof - 197,75
σ'_p(Prof)	Silt	13	Jonq et LB	0685	σ'_p = -7,6731 Prof^2 - 162,72 Prof - 138,4
S_u(Prof)	Argile	13	Chb[9]	0,53	S_u = -2,6195 Prof + 54,352
S_u(Prof)	Argile	13	Chb	0,918	S_u = 0,0261 Prof^3 + 1,3488 Prof^2 + 16,358 Prof + 111,51
S_u(Prof)	Argile	13	Chb	0,783	S_u = 0,2631 Prof^2 + 4,3137 Prof + 82,711
Prof (S_u)	Sable	8	LB	0,769	S_u =-9,2631 Prof + 29,814
Prof (S_u)	Sable	8	LB	0,9163	S_u = 0,6274 Prof^3 + 8,5151 Prof^2 + 19,376 Prof + 49,785

[9] Chambord

4.4. Influence des valeurs aberrantes sur les corrélations

À travers cette partie de l'étude il est possible d'avoir un aperçu de l'influence que peut avoir le traitement des valeurs aberrantes sur les corrélations. Quelques corrélations sont choisies afin d'observer l'effet des valeurs aberrantes sur de quelconques types de régression. Le tableau 4-4 ainsi que les figures 4-64, 4-65, 4-66, 4-67, 4-68, 4-69 et 4-70 résument les résultats obtenus pour quelques corrélations analysées à cet effet. Au regard de ces illustrations, il semble à première vue que le degré d'influence des VA sur les corrélations varie uniquement selon le type de régression. Pourtant les équations et coefficients de régression varient également en fonction de la variabilité des paramètres géotechniques et des méthodes appliquées pour le traitement des valeurs aberrantes.

Afin d'analyser l'influence du traitement des valeurs aberrantes selon le type de régression, la relation entre la profondeur et la teneur en eau est prise comme exemple même si ces deux variables ne sont pas corrélées entre elles. Seules les données de la teneur en eau sont concernées par le traitement de valeurs aberrantes, contrairement à celles de la profondeur. La comparaison entre les figures 4-64,4-65, 4-66 et 4-67 montre qu'il y a moins de variation en fonction du type de traitement des VA pour la régression linéaire et de puissance : ce sont les courbes de régression obtenues pour les données dont les VA sont supprimées par la méthode BM qui se différentient légèrement des autres courbes de régression. En ce qui concerne la régression non linéaire quadratique et cubique de plus grands écarts sont plus observables pour l'équation de régression et moins pour le coefficient de corrélation.

Les figures 4-68, 4-69 et 4-70, quant à elles mettent plus en relief le rôle de la variabilité des paramètres géotechniques étudiés puisque les paramètres choisis ont un COV supérieur à 75%, voire 100% pour S_{tc}. Pour ces 3 figures cités précédemment, les données dont VA sont supprimées par la méthode BM donnent les pires coefficients de régressions cubique et de puissance. Il est possible de supposer que la suppression des valeurs aberrantes par la méthode BM altère plus la force d'une corrélation parce que cette méthode est plus stricte que la méthode D. Cependant de faibles coefficients de régression sont quelques fois retrouvés pour les données dont les VA ne sont mêmes pas traités. En ce qui concerne les régressions non linéaires, les écarts observés dépendent de la dispersion des données. Par exemple pour les régressions non linéaires entre la profondeur et la teneur en eau (COV = 19%), les équations et coefficient de régression varient légèrement même si l'allure des courbes de régression ne change pas (figures Figure 4-64 à 4-67). Or en observant la relation cubique entre les résistances S_{uc} (COV = 77%) et S_{urc} (COV = 187%), l'allure courbes de régression change en fonction du traitement des valeurs aberrantes (figure 4-70) et le coefficient de régression pour les données dont VA sont supprimées par la méthode BM est largement inférieur autres coefficients de régression (Tableau 4-4). Une autre observation intéressante est que, l'incidence des VA est plus remarquable dépendamment du type de régression, en effet l'allure de la courbe de régression puissance $S_{tc}(S_{urc})$ reste la même (figure 4-68), bien que les deux paramètres soient très variables (COV de S_{tc} = 105%).

La régression non linéaire cubique est la plus vulnérable en ce qui concerne le traitement des valeurs aberrantes et la suppression des VA selon la méthode BM est plus susceptible d'altérer les liens de corrélations entre deux paramètres géotechniques ayant une grande variabilité. La détermination de la meilleure méthode de traitement des VA pour la recherche de corrélation dépendra donc de la variabilité des données étudiées.

Tableau 4-4 : Influence des valeurs aberrantes sur des équations et coefficients de quelques régressions

Relation	Types de données	Équation	Coefficient de régression
Exemple de régressions linéaires			
Prof(W)	Initiales	W = -0,1407 Prof + 44,048	0,0285
Prof(W)	VA supprimées par BM	W = -0,1268 Prof + 43,512	0,0279
Prof(W)	VA supprimées par D	W = -0,1436 Prof + 43,995	0,0308
Prof(W)	VA corrigées par BM	W = -0,1406 Prof + 44,012	0,0299
Prof(W)	VA corrigées par D	W= -0,141 Prof + 44,045	0,0288
Exemples de régression non linéaire (fonction puissance)			
Prof(W)	Initiales	$W = 44{,}199\ Prof^{-0{,}029}$	0,012
Prof(W)	VA supprimées par BM	$W = 43{,}434\ Prof^{-0{,}024}$	0,01
Prof(W)	VA supprimées par D	$W = 44{,}244\ Prof^{-0{,}03}$	0,0133
Prof(W)	VA corrigées par BM	$W = 44{,}206\ Prof^{-0{,}029}$	0,0128
Prof(W)	VA corrigées par D	$W = 44{,}202\ Prof^{-0{,}029}$	0,0121
$S_{tc}(S_{urc})$	Initiales	$S_{tc} = 34{,}648\ S_{urc}^{-0{,}523}$	0,609
$S_{tc}(S_{urc})$	VA supprimées par BM	$S_{tc} = 28{,}69\ S_{urc}^{-0{,}341}$	0,246
$S_{tc}(S_{urc})$	VA supprimées par D	$S_{tc} = 32{,}877\ S_{urc}^{-0{,}408}$	0,4181
$S_{tc}(S_{urc})$	VA corrigées par BM	$S_{tc} = 32{,}92\ S_{urc}^{-0{,}567}$	0,4716
$S_{tc}(S_{urc})$	VA corrigées par D	$S_{tc} = 34{,}242\ S_{urc}^{-0{,}531}$	0,5553
Exemples de régression non linéaire (quadratique)			
Prof(W)	Initiales	$W = -0{,}0029\ Prof^2 - 0{,}0425\ Prof + 43{,}655$	0,0367
Prof(W)	VA supprimées par BM	$W = -0{,}0033\ Prof^2 - 0{,}0083\ Prof + 42{,}885$	0,0359
Prof(W)	VA supprimées par D	$W = -0{,}0025\ Prof^2 - 0{,}0622\ Prof + 43{,}707$	0,0383
Prof(W)	VA corrigées par BM	$W = -0{,}0029\ Prof^2 - 0{,}0442\ Prof + 43{,}624$	0,0383
Prof(W)	VA corrigées par D	$W = -0{,}0029\ Prof^2 - 0{,}044\ Prof + 43{,}66$	0,037
Prof(I_L)	Initiales	$I_L = -0{,}0035\ Prof^2 + 0{,}218\ Prof + 0{,}0681$	0,2367
Prof(I_L)	VA supprimées par BM	$I_L = -0{,}0026\ Prof^2 + 0{,}1603\ Prof + 0{,}3159$	0,2854

Relation	Types de données	Équation	Coefficient de régression
Prof(I_L)	VA supprimées par D	I_L = -0,003 Prof^2 + 0,1851 Prof + 0,2253	0,2629
Prof(I_L)	VA corrigées par BM	I_L = -0,0033 Prof^2 + 0,2018 Prof + 0,1391	0,2781
Prof(I_L)	VA corrigées par D	I_L = -0,0034 Prof^2 + 0,2081 Prof + 0,1096	0,2653
Exemples de régression non linéaire (cubique)			
Prof(W)	Initiales	W = 0,0003 Prof^3 - 0,0255 Prof^2 + 0,4173 Prof + 41,638	0,0458
Prof(W)	VA supprimées par BM	W = 0,0003 Prof^3 - 0,026 Prof^2 + 0,457 Prof + 40,839	0,0472
Prof(W)	VA supprimées par D	W = 0,0003 Prof^3 - 0,0231 Prof^2 + 0,3571 Prof + 41,869	0,0462
Prof(W)	VA corrigées par BM	W = 0,0003 Prof^3 - 0,0252 Prof^2 + 0,4107 Prof + 41,629	0,0476
Prof(W)	VA corrigées par D	W = 0,0003 Prof^3 - 0,0253 Prof^2 + 0,4131 Prof + 41,655	0,046
S_{uc}(S_{urc})	Initiales	S_{uc}= 19,97+18,56S_{urc}-0,63S_{urc}^2+0,005S_{urc}^3	0,671
S_{uc}(S_{urc})	VA supprimées par BM	S_{uc} = 16,81+20,4S_{urc} +0,4S_{urc}^2-0,17S_{urc}^3	0,366
S_{uc}(S_{urc})	VA supprimées par D	S_{uc} = 12,61+28,22S_{urc} -2,81S_{urc}^2+0,1S_{urc}^3	0,606
S_{uc}(S_{urc})	VA corrigées par BM	S_{uc} = 3,93+41,38S_{urc} -7,19S_{urc}^2+0,48S_{urc}^3	0,609
S_{uc}(S_{urc})	VA corrigées par D	S_{uc} = 26,39+13,99 S_{urc}-0,06S_{urc}^2-0,01S_{urc}^3	0,628

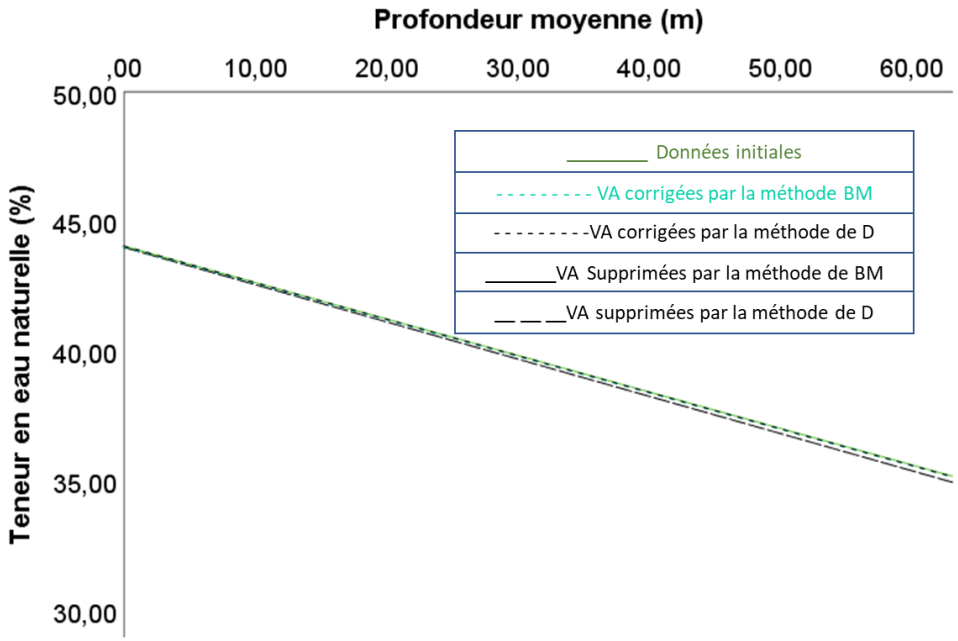


Figure 4-64: Influence des valeurs aberrantes sur la relation linéaire entre la profondeur et la teneur en eau des échantillons d'argile

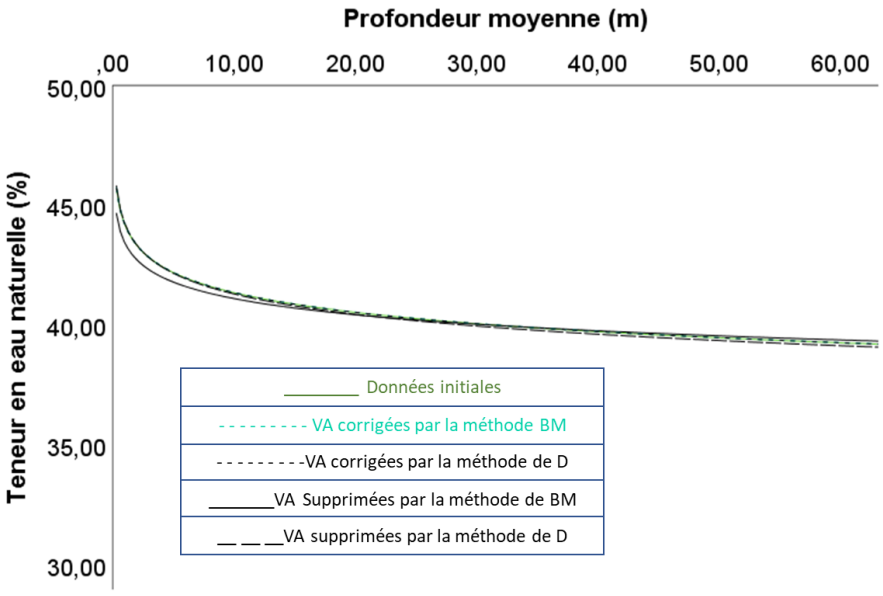


Figure 4-65: Influence des valeurs aberrantes sur la relation non linéaire (fonction puissance) entre la profondeur et la teneur en eau (échantillons d'argile)

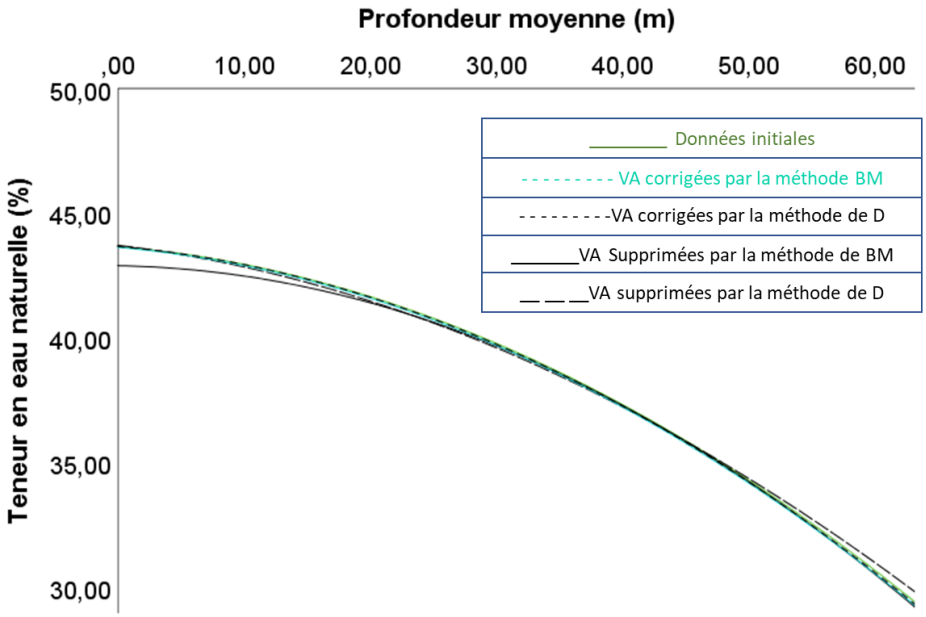


Figure 4-66: Influence des valeurs aberrantes sur la relation non linéaire (fonction quadratique) entre la profondeur et la teneur en eau (échantillons d'argile)

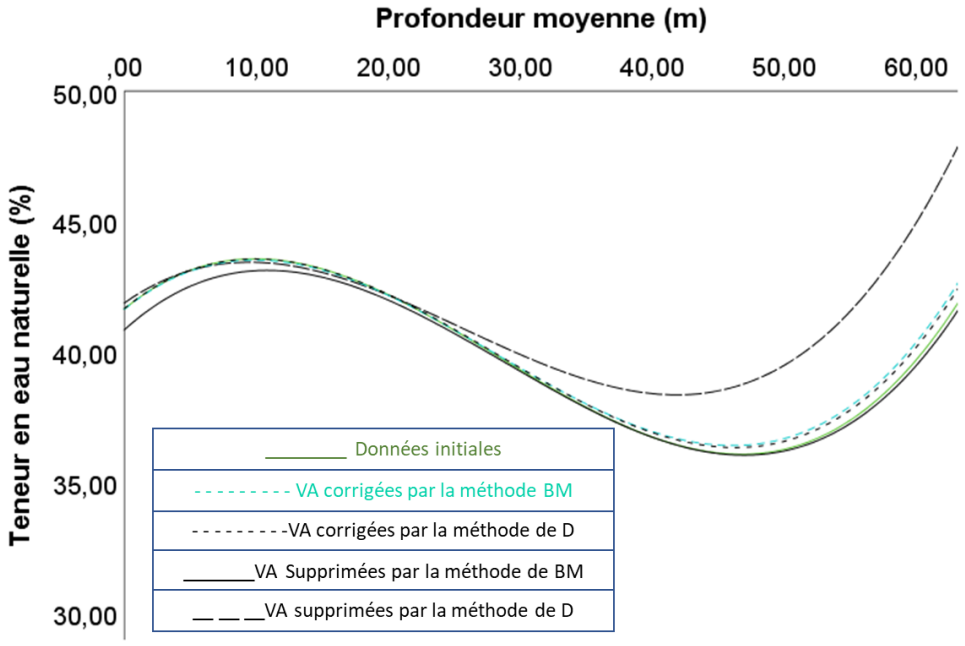


Figure 4-67:Influence des valeurs aberrantes sur la relation non linéaire (fonction cubique) entre la profondeur et la teneur en eau (échantillons d'argile)

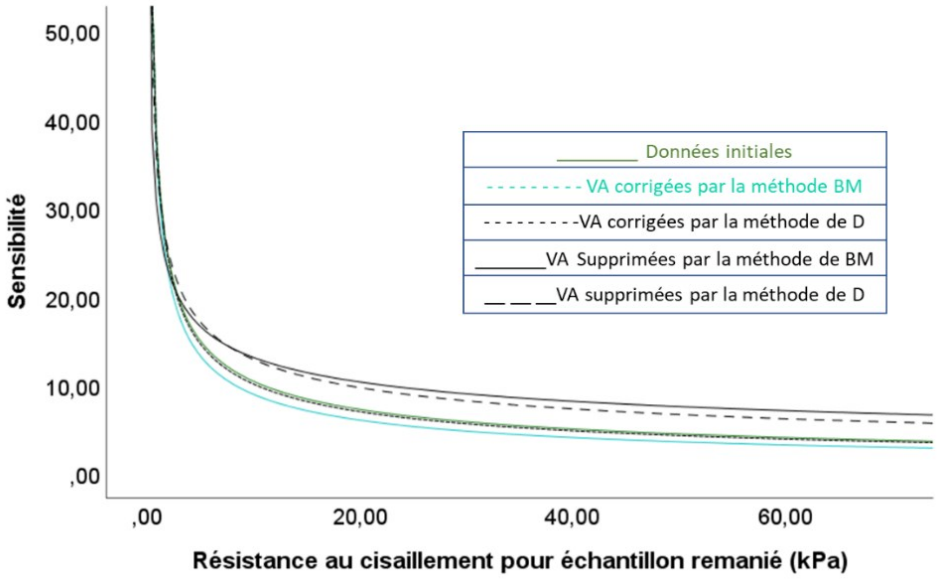


Figure 4-68:Influence des valeurs aberrantes sur la corrélation non linéaire (fonction puissance) $S_{tc}(S_{urc})$ (échantillons d'argile)

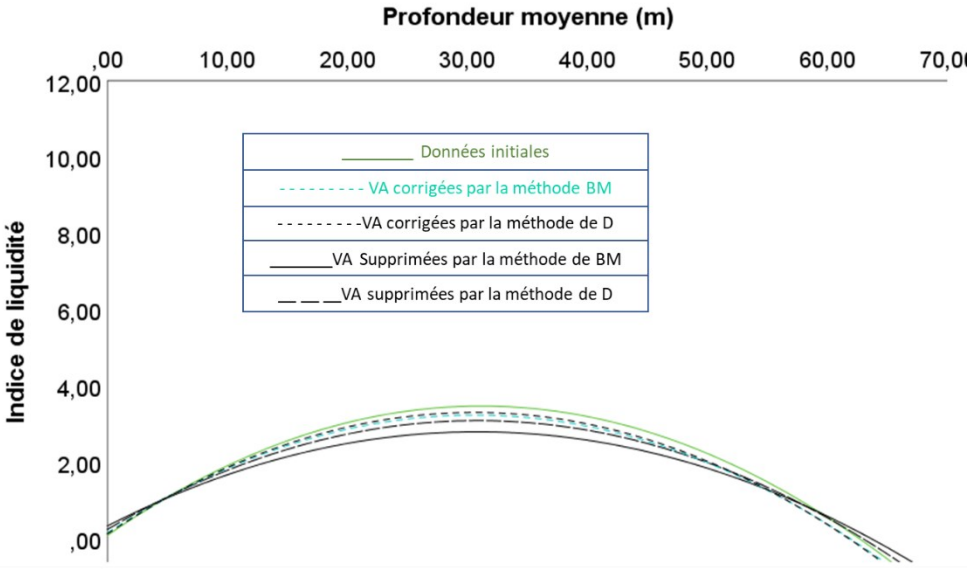


Figure 4-69: Influence des valeurs aberrantes sur la corrélation non linéaire (quadratique) entre la profondeur et l'indice de liquidité (échantillons d'argile)

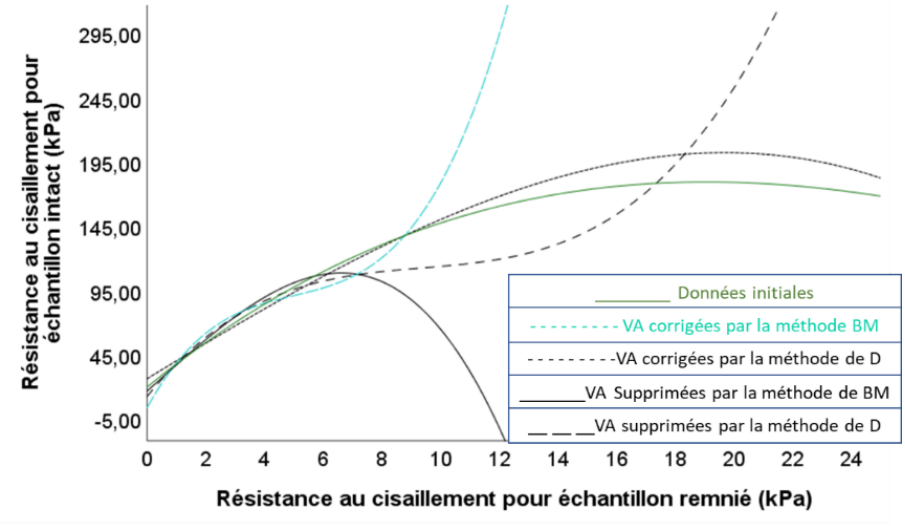


Figure 4-70: Influence des valeurs aberrantes sur la corrélation non linéaire (cubique), $S_{uc}(S_{urc})$ (échantillons d'argile)

CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET CONCLUSION

5.1. Discussion

Les méthodes pour détecter et traiter les valeurs aberrantes sont plus efficaces lorsque leur flexibilité est adaptée à la variabilité inhérente de l'échantillon étudié. Il est important de porter une attention particulière à la transformation de variables lors de manipulation de données car elle pourrait être à l'origine d'apparition ou de dissimulation de valeur(s) aberrante(s); le bon jugement de l'opérateur est donc primordial dans la prise de décision. Il faut souligner le fait que les essais n'ont pas tous été effectués à la même période; il est fort possible que les conditions climatiques aient joué un rôle positif comme négatif dans l'analyse des données. Les données ont été regroupées sans tenir compte des conditions climatiques (ce qui a pu entraîner une variabilité des données) afin d'avoir une idée plus standard de l'argile de la région SLSJ. L'hétérogénéité de la nature des échantillons prélevés a pu être une source d'incohérence entre nos résultats et ceux obtenus d'études faites sur des argiles de l'est Canada, il ressort toutefois une similarité entre les valeurs des incertitudes des paramètres géotechniques et quelques différences dans les corrélations.

La comparaison de nos résultats avec les informations existantes dans la revue de littérature a permis de soulever des différences entre les argiles de l'est Canada et d'ailleurs. Notamment pour les paramètres comme la teneur en eau, les indices de plasticité et de liquidité, la sensibilité et la contrainte de pré

consolidation. L'indice de liquidité qui se trouve être beaucoup plus élevée pour les échantillons de la mer Laflamme que pour ceux de la Scandinavie, ou encore les valeurs plus élevées de l'indice de plasticité pour les argiles scandinaves. Il en ressort que les argiles scandinaves sont plus plastiques que celles étudiées.

Une autre particularité de cette étude est que les échantillons ont été choisis indépendamment de leur situation géographique afin d'être représentatifs de la région. Cette approche n'a pas permis d'observer certaines relations comme celle de la profondeur et la teneur en eau (caractéristique d'un échantillon de sol non cimenté). Effectivement la teneur en eau dépend du flux d'infiltration de l'eau dans le sol qui dépend lui aussi de la stratigraphie du dépôt, or d'un point géographique à l'autre la stratigraphie peut varier. En outre, les autres relations qui ont été observées comme la relation entre la sensibilité et l'indice de liquidité peuvent être qualifiées ''d'emblématiques'' pour les dépôts d'origine marine. Certaines corrélations obtenues dans notre étude peuvent ne pas être significatives à cause du faible nombre de données (parfois 3 données seulement). Plusieurs recherches de corrélations ont montré des régressions non linéaires là où il n'y avait pas de régression linéaire. L'utilisation de régression non linéaire (cubique et quadratique) n'est pas très fiable à cause facilité d'évoluer pour relier les points. Aussi en les utilisant il faut s'assurer de disposer d'un nombre significatif de données afin de ne pas influencer la justesse du coefficient de corrélation.

Malgré le caractère hétérogène des échantillons, la relation entre l'indice de liquidité et la sensibilité reste existante pour nos échantillons d'argile. La

différence entre la relation S_t (I_L) réside seulement dans la nature de la régression qui est une droite pour les échantillons de notre étude et une courbe pour les échantillons utilisés dans la revue de littérature (Ching et Phoon, 2012a). Les valeurs plus élevées de l'indice de liquidité dans la région SLSJ prédisent aussi des sensibilités plus élevées pour les localités de cette région; ce qui se trouve être vrai, vues les valeurs extrêmement grandes de la sensibilité observées dans cette étude, pour des échantillons dont l'indice de liquidité est supérieur à 1.

5.2. Conclusion

Les objectifs fixés ont été atteints grâce aux méthodes statistiques mises en place. Le traitement de valeurs aberrantes et le test d'adéquation ont été sollicités pour déterminer les incertitudes des paramètres géotechniques, il s'agit de : la masse volumique, la densité des grains, la teneur en eau, l'indice des vides et les limites d'Atterberg, la sensibilité au remaniement, la résistance de l'échantillon remanié et non remanié, la contrainte de préconsolidation, le coefficient de surconcolidation, le nombre de coups (essai de pénétration standard), la résistance de pointe et la résistance au frottement latéral du cône (essai de pénétration au cône). Le seuil de détermination de valeur aberrante par la méthode de Doerffel est généralement inférieur à celui de la méthode de la boîte à moustaches. La détermination des incertitudes de paramètres géotechniques confirme la grande variabilité de certaines propriétés de l'argile sensible déjà observée dans la revue de littérature. Les régressions non linéaires donnent des corrélations plus fortes que les régressions linéaires, néanmoins la

régression linéaire est privilégiée dans certains cas où le sens d'évolution des courbes de régressions non linéaires est contradictoire. La comparaison des corrélations obtenues avec celles de la revue de littérature montre quelques similarités malgré l'hétérogénéité de la nature des échantillons soumis à notre étude.

La présence des valeurs aberrantes entraîne une légère différence (tout au plus à une unité près) dans les résultats de calcul des incertitudes des paramètres géotechniques. Cependant la différence est plus notable quand il s'agit de déterminer la loi de probabilité que les données suivent le mieux : un test d'adéquation peut donner des lois de probabilité qui varient en fonction du traitement des valeurs aberrantes. Les valeurs aberrantes ont beaucoup moins d'incidences sur les régressions de type linéaire et puissance que sur les régressions de type quadratique ou cubique. L'influence des valeurs aberrantes sur la détermination des incertitudes des paramètres géotechniques et sur leurs corrélations pourrait être davantage étudiée à l'aide d'autres méthodes de détection et de traitement. La force de la relation entre les paramètres étudiés dépend de plusieurs facteurs dont le type de sol, l'hydrogéologie, la profondeur de l'échantillon, la localisation. Une discrétisation par sous-régions et un échantillonnage plus serré pourraient mieux assurer l'exactitude des corrélations obtenues dans cette étude.

RÉFÉRENCES

Auvinet, G., Mellah, R., Masrouri, F. (1999) - « Stochastic finite element analyses in geomechanics ». Proceedings. Vlllth International Conference on Applications of Statistics and Probability, ICASP8. Melchers & Stewart, eds., 2000 Balkema, Rotterdam, p. 79-85

Baillargeon, G. 2016. Probabilités et statistiques avec applications en technologie et ingénierie. 3e éd. Les Éditions SMG, Québec.

Barnett, V., et Lewis, T. 1994. Outliers in Statistical Data. 3e éd. Wiley, 582p.

Bentley, S.P., et Smalley, I.J. 1978. Mineralogy of sensitive clays from Quebec. The Canadian Mineralogist, 16(1) : 103-112

Bilodeau, C., Genois, A., Demers, D., Potvin, J., Dupuis, C., Robitaille, D., Hébert, J., St-Cyr, R., Proulx, J., et Perret, D. 2005. Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles. Guide d'utilisation des cartes de zones de contraintes et d'application du cadre normatif, Gouvernement du Québec, Québec.

Blanchette, J.D. 2016. Étude du comportement statique et cyclique de deux argiles sensibles de l'est du Canada. Mémoire de maîtrise. Université Laval.

Bolle, A. 2000. Étude et prise en compte de la variabilité spatiale. Revue Française de Géotechnique, (93) : 12.

Bouchard, R., Dion, D.J., et Tavenas, F. 1983. Origine de la préconsolidation des argiles du Saguenay, Québec. Canadian Geotechnical Journal, **20**:315-328.

Boutin, V., Il y a 45 ans, Saint-Jean-Vianney sombrait dans un glissement de terrain, Saguenay. Radio Canada, le 3 mai 2016. https://www.tvanouvelles.ca

Cambou, B. 1977. L'incertitude sur les résultats d'un problème de mécanique des sols ou des roches traités par la méthode des éléments finis. Revue Française de Géotechnique, : 53-64. doi:10.1051/geotech/1977001053.

CERM-PACES 2013a. Résultat du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la région Saguenay-Lac-Saint-Jean [en ligne]. Centre d'étude sur les ressources minérales Université du Québec à Chicoutimi. Disponible à http://pcdt.uqac.ca/pcdt/rapport_sc/Rap_scienti_SLSJ_VF_20130719.pdf.

CERM-PACES 2013b. Atlas des eaux souterraines du Saguenay-Lac-Saint-Jean [en ligne]. Centre d'étude sur les ressources minérales Université du Québec à Chicoutimi. Québec. Disponible à http://pcdt.uqac.ca

Ching, J., et Phoon, K.-K. 2012a. Modeling parameters of structured clays as a multivariate normal distribution. Canadian Geotechnical Journal, 49(5):522-545. doi:10.1139/t2012-015.

D'Ignazio, M., Phoon, K.-K., Tan, S.A., et Länsivaara, T.T. 2016. Correlations for undrained shear strength of Finnish soft clays. Canadian Geotechnical Journal, 53(10):1628-1645.

Daigneault, R.-A., Cousineau, P.A., Leduc, É., Baudouin, G., Millette, S., Horth, N., Roy, D.W., Lamothe, M., et Allard, G. 2011. Cartographie des formations superficielles réalisée dans le territoire municipalisé du Saguenay – Lac-Saint-Jean (Québec) entre 2009 et 2011. Rapport final. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

Demers, D., et Leroueil, S. 2002. Evaluation of preconsolidation pressure and the overconsolidation ratio from piezocone tests of clay deposits in Quebec. Canadian Geotechnical Journal, 39 : 174-192. doi:10.1139/T01-071.

Desbiens, J.-F., Deux résidences évacuées après un glissement de terrain, Saguenay. TVA Nouvelles le 9 août 2018 https://www.tvanouvelles.ca

Elliott, A.-P. 2014. Mise en évidence de connexions hydrauliques locales et régionales entre aquifères rocheux et granulaires: exemple de la région Saguenay-Lac-Saint-Jean [en ligne]. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Canada, Québec. Disponible à https://constellation.uqac.ca.

Farcette, N. 2015. Développement et intégration d'une méthode de prédiction de soulèvement de structures de chaussées en contexte nordique dans le cadre d'une nouvelle approche rationnelle de conception des chaussées. Projet de fin d'études. Université Laval.

Frontline Systems Inc. 2019. Analytic Solver for Microsoft Excel V2019, P.O Box 4288, Incline Village, Nevada 89450 USA: Frontline Systems Inc.

Geoslope. 1977. Slope stability analysis, Alberta, Canada. https://www.geoslope.com

Gouvernement du Québec, Ministère des Transports de la Mobilité durable et de, l'Électrification, et Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire. 2017. Glissements de terrain dans les dépôts meubles types et causes. Gouvernement du Québec.

Gouvernement du Québec, Système d'Information Géomonière du Québec. 2003-2020. Géologie du quaternaire, Zones morpho-sédimentologiques. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles. Québec. http://sigeom.mines.gouv.qc.ca

Hébert, K., Leroueil, S., et Locat, A. 2016. Caractérisation des argiles du Bas-Saint-Laurent (Rapport final). Ministère des Transports du Québec.

Horth, N. 2017. Paléogéographie quaternaire de la région des Monts-Valin et dispersion glaciaire au Saguenay-Lac-Saint-Jean (QUÉBEC). Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Montréal.

Houle, J., Deux maisons démolies en raison de risque de glissement de terrain, Saguenay. TVA Nouvelles, le 6 décembre 2017. https://www.tvanouvelles.ca

IBM Corp. 2015. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0. Armonk, New York: IBM Corp

IBM SPSS Statistics. Guide sommaire de IBM SPSS Statistics 20. IBM Corp. 2011.ftp://public.dhe.ibm.com/software/analytics/spss/documentation/statistics/20.0/fr/client/Manuals/IBM_SPSS_Statistics_Brief_Guide.pdf.

Lacaze, B., Mailhes, C., Maubourguet, M., et Tourneret, J.-Y. 1997. Probabilités et statistiques appliquées. CÉPADUÈS-ÉDITIONS, Toulouse, 360p.

Lamontagne, M., et Demers, D. 2007. Description et analyse du glissement de terrain meurtrier du 25 octobre 1870 dans le rang des Lahaie, Sainte-Geneviève-de-Batiscan, Québec 1. Canadian Journal Earth Sciences, **44** : 947-960. doi:10.1139/E07-001.

Langlois, Y. 1991. Caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols par échantillonnage aléatoire simple. Mémoire de maîtrise. Institut national de la recherche scientifique.

La Rochelle, P., Zebdi, M., Leroueil, S., Tavenas, F., and Virely, D. 1988. Piezocone tests in sensitive clays of Eastern Canada. Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing (I.S.O.P.T.), Orlando, 20–24 Mars1988. Edité par J. DeRuiter. Vol. 2, pp. 831–841.

Larouche, A. 2016. Glissement de terrain, routes fermées et maisons inondées, Saguenay. TVA Nouvelles, le 22 juillet 2016. https://www.tvanouvelles.ca

Larouche, A. 2018. Glissement de terrain à L'Anse-Saint-Jean, Saguenay. TVA Nouvelles, le 3 mai 2018. https://www.tvanouvelles.ca

Lasalle, P. & Tremblay, G. (1978). Dépôts meubles Saguenay – Lac Saint-Jean. Ministère des Resources Naturelles, Rapport géologique, 191. 61p.

Leduc, É. 2016. Le quaternaire de la Région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec: Cartographie, sédimentologie, modélisation de l'extension marine et paléogéographie. Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Montréal. Disponible à archipel.uqam.ca

Le Guen, M. 2002. LA boite a moustaches pour sensibiliser à la Statistique. Bulletin de Méthodologie Sociologique, SAGE Publications 73(1) : 43-64.

Leroueil, S., Tavenas, F., et Le Bihan, J.-P. 1983. Propriétés et caractéristiques des argiles de l'est du Canada. Canadian Geotechnical Journal 20(4):681-705.

LOCAT, J., LEFEBVRE, G. & BALLIVY, G., 1984. Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from Eastern Canada. Canadian Geotechnical Journal 21: 530–540.

Locat, J., et Leroeuil, S. 1987 Physicochemical and geotechnical characteristics of recent Saguenay Fjord sediments. Canadian Geotechnical Journal 25: 382-388.

Lu, Y.M., Jin, Y.F., Shen, S.L., Yu, F., et Zhang, J. 2015. Statistical analysis on physical properties of Shanghai soft clay. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS and AGSSEA, 46(3):31-36.

Massey, Franck J. 1951. Comment, Telegram from Administrative Council of Lebanon. Journal of the American Statistical Association, **46**(253): 68-78.

Medjnoun, A., et Bahar, R., 2016. Analytical and statistical study of the parameters of expansive soil [en ligne]. Journal of Geological and Environmental Engineering, **10**(2):243-246. Disponible à http://www.nrcresearchpress.com

Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire. 2016. Zones à risque de glissement de terrain au Québec [en ligne]. Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire. Québec. Disponible à https://www.mamot.gouv.qc.ca

Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune et Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles. 2006. Portrait Territorial - Saguenay / Lac-Saint-Jean. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles [en ligne]. Québec. Disponible à https://mern.gouv.qc.ca

Ministère des Transports du Québec. 2013. Glissement de terrains Exploration et Exploitation des gaz de schistes [en ligne]. Québec. Disponible à www.bape.gouv.qc.ca [cité le 5 février 2018].

Ministère des Transports du Québec Service de la géotechnique et de la géologie direction du laboratoire des chaussées. 2000. Gestion des risques de glissement de terrain liés aux pluies des 19 et 20 juillet 1996 au Saguenay- Lac-Saint-Jean. Québec.

Ministère Québécois des Forêts, de la Faune, et des Parcs. 2015. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec [en ligne]. Gouvernement du Québec. Disponible à https://www.mffp.gouv.qc.ca

Nader, A. 2014. Engineering Characteristics of Sensitive Marine Clays - Examples of Clays in Eastern Canada. Université d'Ottawa, Canada.

Perret, D., Locat, J., et Leorueil, S. 1995. Strength development with burial in fine grained. Canadian Geotechnical Journal, 32(1):247-262.

Osborne, J.W., et Overbay, A. 2004. The power of outliers (and why researchers should ALWAYS check for them). Practical Assessment, Research and Evaluation, **9**(6) : 1-8.

Planchon, V. 2005. Traitement des valeurs aberrantes : concepts actuels et tendances générales. Biotechnologie Agronomie Société et Environnement (BASE), 9(1):19-34.

Quinn, P.E. 2009. Large Landslides in sensitive clay in eastern canada and the associated hazard and risk to linear infrastructure [en ligne]. Thèse de doctorat. Queen's University, Kingston. Ontario.

Régie du bâtiment du Québec. 2009. Si vous devez construire dans un endroit où le sol est argileux [en ligne]. Disponible à https://www.rbq.gouv.qc.ca [cité le 7 mars 2018].

Saporta, G. 2011. Probabilités analyse des données et statistiques. 3e éd. Éditions TECHNIP, Paris.

Sobotka, G. 1974. Contribution à l'étude des argiles de la mer Champlain Becancour, Québec. Direction de l'information géologique du Québec. Québec.

Sorensen, K.K. 2013. Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays. (1957): 1-6.

Tavenas, F., Chagnon, J.-Y., et Rochelle, P. La. 1971. The Saint-Jean-Vianney Landslide: Observations and Eyewitnesses Accounts. Canadian Geotechnical Journal, 8(3): 463-478

Tavenas, F., et Leroueil, S. 1979. Les concepts d'état limite et d'état critique et leurs applications pratiques à l'étude des argiles. Revue française de géotechnique, (6):27-49.

Tremblay, G. 1971. Glaciation et déglaciation dans la région Saguenay - Lac-Saint-Jean, Québec [en ligne]. Cahiers de géographie du Québec, **15**(36) : 467-494. doi: 10.7202/020982ar.

Walter, J., Rouleau, A., Chesnaux, R., Lambert, M., et Daigneault, R. 2018. Characterization of general and singular features of major aquifer systems in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region. Canadian Water Resources Journal, 43(2) : 75-91. doi:10.1080/07011784.2018.1433069.

Wellmer, F.-W. 1998. Statistical Evaluations in Exploration for Mineral Deposits. Springer, Germany.

Windisch, E.J., et Yong, R.N. 1990. A statistical evaluation of some engineering properties of eastern Canadian clays. Canadian Geotechnical Journal, 27(3) : 373-386.

ANNEXES

ANNEXES A : Paramètres géotechniques, seuils de valeurs aberrantes et valeurs aberrantes selon les méthodes de Doerffel et de la boîte de moustaches

Paramètres	**Nombre de données**	**Min-Max**	**Méthode BM Min-Max**	**Méthode BM VA**	**Méthode D Min-Max**	**Méthode D VA**
W (%)	659	12,5-73,53	19,5-63,5	12,5-14,95-63,45-64,8-65-65-65-65-65,51-65,51-65,6-67-70-73,53 (**14**)	69.65	70-73.53 (**2**)
W_L ***(%)***	159	16,5-67,11	Aucun			Aucun
W_P ***(%)***	160	11,93-28,24	14,25-28,25	11,93-14,25-28,4 (**3**)		Aucun
I_P ***(%)***	159	1,5-43,54	Aucun			Aucun
I_L	155	-0,69-9,57	-2,04--5,85	5,64-5,85-6,3-6,37-6,56-7,64-8,3-8,38-9,57 (**9**)	6.62	7,64-8,3-8,38-9,57 (**4**)
$\mathbf{e}_{0d}$	31	0,66-2,58	0,28-2,17	2,23-2,58 (**2**)	2.4	2.58 (**1**)
e_{oc}	25	0,38-2,8	0,55-1,44	0,38-0,52-1,5-1,8-2,09-2,8 (**6**)	2.304	2.834 (**1**)
$\mathbf{n}_d$ ***(%) densité***	31	39,79-72	Aucun			Aucun
n_C ***(%) consol***	25	27,53-73,91	38,64-61,16	27,53-34,43-64,31-67,66-73,92 (**5**)		Aucun
Dr densité	29	2,174-2,851	2,52-2,96	2,174-2,26-2,41 (**3**)	2.3	2.97
Dr consol	22	2,12-2,88	2,53-2,96	2,12-2,132 (**2**)		Aucun
ρ** densité **(g/cm3)	26	1,56-2,97	1,45-2,22	2,97 (**1**)		Aucun
***ρ** consolid (g/cm3)*	12	1,58-2,52	1,73-2,52	2,85 (**1**)		Aucun
Q_C ***(kPa)***	1128	60-8300	-750 _ 3250	3300-3300-3300-3400-3500-3860-4700-5130-5300-5600-6050-7000-7740-8300 (**14**)	Échantillon de grande taille, la méthode ne peut être appliquée	
f_S ***(kPa)***	1130	8-633	-12,5—87,5	90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-90-91-95-95-95-100-100-100-100-100-100-105-105-105-105-105-110-110-110-110-110-110-111-115-115-115-120-	Échantillon de grande taille, la méthode ne peut être appliquée	

				120-120-120-120-120-120-120-120-120-121,8-125-125-125-125,4-130-135-136-140-140-143,3-160-170-180-190-190-190-233-500-633 (**76**)		
N	39	1-100	-6,75—19	26-89-90-90-99-100 (**6**)	80.005	89-90-90-99-100 (**4**)
S_u ***(kPa)***	352	20-197	Aucun			Aucun
S_{ur} ***(kPa)***	61	3-131	Aucun			Aucun
S_t	403	1-1902	-797,25—1368,75	1389-1492-1553-1715-1717-1576-1902 (**7**)	1503.07	1553-1715-1717-1576-1902 (**5**)
S_{uc} ***(kPa)***	60	3-60	-61,72-197,6	228-245 (**2**)		Aucun
S_{urc} ***(kPa)***	49	0,12-72	-3,75—9,77	19,2-19,21-20-28-28-44,1-72 (**7**)	25.33	28-28-44.1-72 (**4**)
S_{tc}	49	1,273-87,707	-25,21—72,79	75-77,9-82-87,707 (**4**)		Aucun
C_u ***(kPa)***	38	2,8-129,515	-21,49—99,79	114,9-127,33-129,515 (**3**)		Aucun
σ'_p ***(kPa)***	43	17-775	510,5	570-570-683-700-775 (**5**)		Aucun
OCR	29	0,29-50	-7,147—14,86	50 (**1**)	19.45	50 (**1**)

ANNEXE B : Détails de la procédure de détermination des incertitudes pour l'indice des vides mesuré par essai de consolidation œdométrique

a. Traitement de valeurs aberrantes

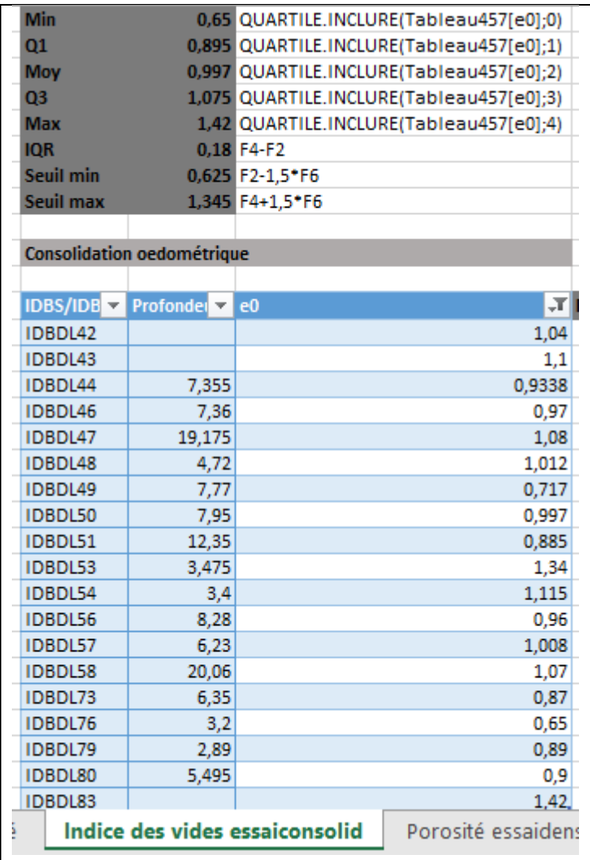
Étapes	Type de données	Traitement sur Excel	Commentaires
1	Données initiales	Consolidation oedométrique IDBS/IDB | Profonde | e0 IDBDL40 | | 0,38 IDBDL41 | 27,6 | 1,5 IDBDL42 | | 1,04 IDBDL43 | | 1,1 IDBDL44 | 7,355 | 0,9338 IDBDL46 | 7,36 | 0,97 IDBDL47 | 19,175 | 1,08 IDBDL48 | 4,72 | 1,012 IDBDL49 | 7,77 | 0,717 IDBDL50 | 7,95 | 0,997 IDBDL51 | 12,35 | 0,885 IDBDL52 | 7,87 | 2,0926 IDBDL53 | 3,475 | 1,34 IDBDL54 | 3,4 | 1,115 IDBDL55 | | 2,834 IDBDL56 | 8,28 | 0,96 IDBDL57 | 6,23 | 1,008 IDBDL58 | 20,06 | 1,07 IDBDL62 | 5,03 | 0,525 IDBDL73 | 6,35 | 0,87 IDBDL76 | 3,2 | 0,65 IDBDL78 | 2,89 | 1,802 IDBDL79 | 2,89 | 0,89 IDBDL80 | 5,495 | 0,9 IDBDL83 | | 1,42	Les données initialement recueillies, sont entrées dans le logiciel Excel. Dans un premier temps, elles ne subissent aucune modification avant la réalisation du test d'adéquation. Par la suite ces données initiales sont traitées par la méthode de la boîte de moustaches puis par celle de Doerffel. Le traitement consiste à la suppression ou à la correction des valeurs aberrantes. La section suivante présente le cas où les valeurs aberrantes sont corrigées.

2	Données dont les valeurs aberrantes sont corrigées par la méthode de la boîte de moustaches		Lorsque la valeur d'une donnée parmi les données initiales, va au-delà du seuil supérieur ou en dessous du seuil inférieur, cette donnée est remplacée par une autre d'une valeur respectivement inférieure ou supérieure au seuil et les valeurs contenues dans le tableau gris sont recalculées, d'où l'obtention de nouveaux seuils. Si d'autres VA sont toujours détectées l'opération doit être répétée jusqu'à ce qu'il y en ait plus. Les cases coloriées dans la colonne G du tableau Excel indiquent les valeurs corrigées avec les valeurs initiales à droite dans la colonne H.

Min	0,56	QUARTILE.INCLURE(Tableau457[e0];0)
Q1	0,89	QUARTILE.INCLURE(Tableau457[e0];1)
Moy	1,008	QUARTILE.INCLURE(Tableau457[e0];2)
Q3	1,115	QUARTILE.INCLURE(Tableau457[e0];3)
Max	1,44	QUARTILE.INCLURE(Tableau457[e0];4)
IQR	0,225	F4-F2
Seuil min	0,5525	F2-1,5*F6
Seuil max	1,4525	F4+1,5*F6

Consolidation oedométrique

IDBS/ID	Profon	e0	Valeurs initiales
IDBDL40		0,56	0,38
IDBDL41	27,6	1,44	1,5
IDBDL42		1,04	
IDBDL43		1,1	
IDBDL44	7,355	0,9338	
IDBDL46	7,36	0,97	
IDBDL47	19,175	1,08	
IDBDL48	4,72	1,012	
IDBDL49	7,77	0,717	
IDBDL50	7,95	0,997	
IDBDL51	12,35	0,885	
IDBDL52	7,87	1,44	2,09
IDBDL53	3,475	1,34	
IDBDL54	3,4	1,115	
IDBDL55		1,44	2,8
IDBDL56	8,28	0,96	
IDBDL57	6,23	1,008	
IDBDL58	20,06	1,07	
IDBDL62	5,03	0,56	0,52
IDBDL73	6,35	0,87	
IDBDL76	3,2	0,65	
IDBDL78	2,89	1,44	1,8
IDBDL79	2,89	0,89	
IDBDL80	5,495	0,9	
IDBDL83		1,42	

3	Données dont les valeurs aberrantes sont supprimées par la méthode de la boîte de moustaches		Les valeurs aberrantes détectées précédemment sont tout simplement supprimées, d'où l'obtention d'un nouvel échantillon. À l'instar de cet exemple, il arrive parfois d'observer d'autres VA puisque les seuils de VA dans le tableau gris sont automatiquement recalculés lorsqu'un changement est opéré sur les données. Dans ce cas, nous supposons que ces valeurs sont issues de la variabilité inhérente du paramètre géotechnique et nous décidons de ne pas effectuer de test d'adéquation sur l'échantillon où les VA sont supprimées. En effet, si l'origine des VA est stochastique, il est préférable de réaliser le test d'adéquation sur les données initiales afin de préserver les informations liées à la variabilité inhérente du paramètre géotechnique.

4	Données dont les valeurs aberrantes sont corrigées par la méthode de Doerffel		Les procédés appliqués pour la méthode de la boîte de moustaches sont les mêmes pour la méthode de Doerffel à la différence que seuls les seuils supérieurs sont pris en compte.

Moy	1,102296	MOYENNE(Tableau457[e0])
Écart typ	0,3082822	ECART.MOYEN(Tableau457[e0])
g	3,9	Lu sur le digramme de Doerfell
XA	2,3045967	G1+G2*G3

Consolidation oedométrique

IDBS/IDB	Profonde	e0	Valeur initiale
IDBDL40		0,38	
IDBDL41	27,6	1,5	
IDBDL42		1,04	
IDBDL43		1,1	
IDBDL44	7,355	0,9338	
IDBDL46	7,36	0,97	
IDBDL47	19,175	1,08	
IDBDL48	4,72	1,012	
IDBDL49	7,77	0,717	
IDBDL50	7,95	0,997	
IDBDL51	12,35	0,885	
IDBDL52	7,87	2,0926	
IDBDL53	3,475	1,34	
IDBDL54	3,4	1,115	
IDBDL55		2,3	2,834
IDBDL56	8,28	0,96	
IDBDL57	6,23	1,008	
IDBDL58	20,06	1,07	
IDBDL62	5,03	0,525	
IDBDL73	6,35	0,87	
IDBDL76	3,2	0,65	
IDBDL78	2,89	1,802	
IDBDL79	2,89	0,89	
IDBDL80	5,495	0,9	
IDBDL83		1,42	

5	Données dont les valeurs aberrantes sont supprimées par la méthode de la boîte de Doerffel		Les procédés appliqués pour la méthode de la boîte de moustaches sont les mêmes pour la méthode de Doerffel à la différence que seuls les seuils supérieurs sont pris en compte.

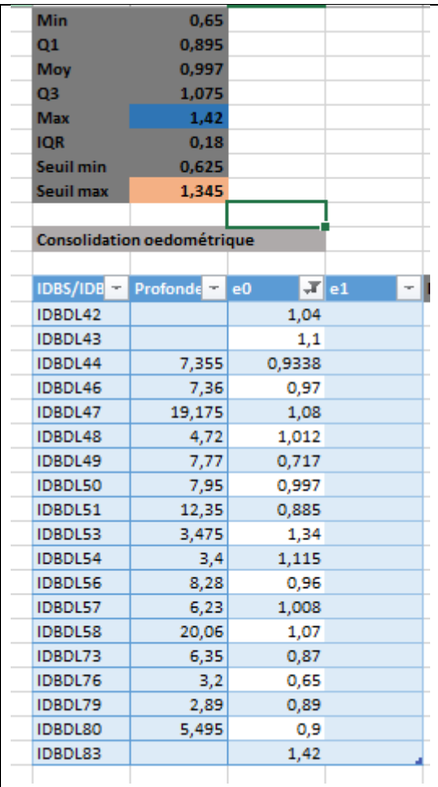
Moy	1,052392	MOYENNE(Tableau457[e0])
Écart typ	0,254006	ECART.MOYEN(Tableau457[e0])
g	3,9	Lu sur le digramme de Doerfell
XA	2,043016	G1+G2*G3

Consolidation oedométrique

IDBS/IDE	Profonde	e0
IDBDL40		0,38
IDBDL41	27,6	1,5
IDBDL42		1,04
IDBDL43		1,1
IDBDL44	7,355	0,9338
IDBDL46	7,36	0,97
IDBDL47	19,175	1,08
IDBDL48	4,72	1,012
IDBDL49	7,77	0,717
IDBDL50	7,95	0,997
IDBDL51	12,35	0,885
IDBDL52	7,87	2,0926
IDBDL53	3,475	1,34
IDBDL54	3,4	1,115
IDBDL56	8,28	0,96
IDBDL57	6,23	1,008
IDBDL58	20,06	1,07
IDBDL62	5,03	0,525
IDBDL73	6,35	0,87
IDBDL76	3,2	0,65
IDBDL78	2,89	1,802
IDBDL79	2,89	0,89
IDBDL80	5,495	0,9
IDBDL83		1,42

b. Test d'adéquation

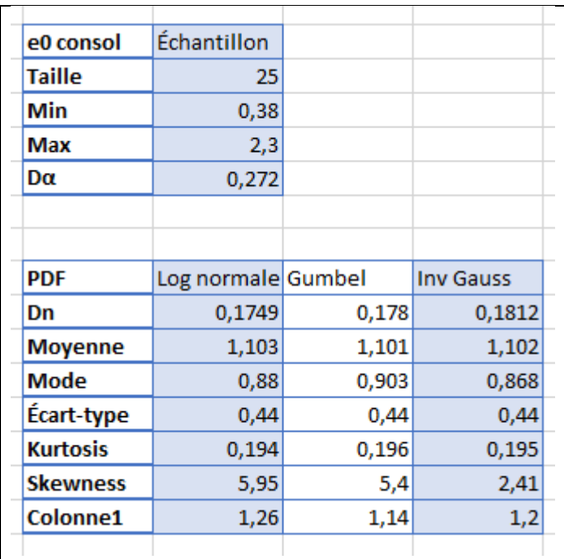
<table>
<tr><th>Étapes</th><th>Type de données</th><th>Résultats du test d'adéquation à l'aide Analytic Ssolver (Frontline Systems Inc., 2019)</th><th>Commentaires</th></tr>
<tr><td>6</td><td>Données initiales</td><td>
<table>
<tr><td>e0 consol</td><td>Échantillon</td></tr>
<tr><td>Taille</td><td>25</td></tr>
<tr><td>Min</td><td>0,38</td></tr>
<tr><td>Max</td><td>2,834</td></tr>
<tr><td>Dα</td><td>0,272</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>PDF</td><td>Log normale</td><td>Inv Gauss</td><td>Log logistique</td></tr>
<tr><td>Dn</td><td>0,1854</td><td>0,1862</td><td>0,1928</td></tr>
<tr><td>Moyenne</td><td>1,12</td><td>1,12</td><td>1,15</td></tr>
<tr><td>Mode</td><td>0,88</td><td>0,86</td><td>0,86</td></tr>
<tr><td>Écart-type</td><td>47</td><td>0,48</td><td>0,67</td></tr>
<tr><td>Kurtosis</td><td>0,2223</td><td>0,23</td><td>0,48</td></tr>
<tr><td>Skewness</td><td>6,33</td><td>2,69</td><td>----</td></tr>
<tr><td>Colonne1</td><td>1,33</td><td>1,27</td><td>1,91</td></tr>
</table>
</td><td>Après la simulation des données pour le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov à l'aide de l'outil Analytic Solver(Frontline Systems Inc., 2019), les résultats sont présentés sous forme de classement des lois de probabilités les plus adéquates aux données entrées à celles qui le sont le moins; c'est à dire de celle qui ayant la plus petite à la plus grande valeur de D_n. Pour une loi de probabilité, si la valeur de D_n est inférieure à celle de D_α alors le test est positif et cette loi peut être utilisée pour analyser les données simulées.</td></tr>
<tr><td>7</td><td>Données dont les valeurs aberrantes sont corrigées par la méthode de la boîte de moustaches</td><td>
<table>
<tr><td>e0 consol</td><td>Échantillon</td></tr>
<tr><td>Taille</td><td>25</td></tr>
<tr><td>Min</td><td>0,56</td></tr>
<tr><td>Max</td><td>1,44</td></tr>
<tr><td>Dα</td><td>0,272</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>PDF</td><td>Erlang</td><td>Gamma</td><td>Logistique</td></tr>
<tr><td>Dn</td><td>0,1304</td><td>0,1304</td><td>0,1319</td></tr>
<tr><td>Moyenne</td><td>1,03</td><td>1,03</td><td>1,03</td></tr>
<tr><td>Mode</td><td>0,963</td><td>0,963</td><td>1,03</td></tr>
<tr><td>Écart-type</td><td>0,27</td><td>0,27</td><td>0,27</td></tr>
<tr><td>Variance</td><td>0,073</td><td>0,073</td><td>0,072</td></tr>
<tr><td>Kurtosis</td><td>0,41</td><td>0,41</td><td>4,2</td></tr>
<tr><td>Skewness</td><td>0,52</td><td>0,52</td><td>0</td></tr>
</table>
</td><td>Les données ayant été traitées par la méthode de la boîte de moustaches, les valeurs minimale et maximale de l'échantillon ont changé et le test d'adéquation donne des résultats différents aux précédents.</td></tr>
</table>

8	Données dont les valeurs aberrantes sont supprimées par la méthode de la boîte de moustaches		La suppression des VA a entrainé l'apparition d'autres VA, l'origine des VA étant supposé stochastique, le test d'adéquation n'a pas été réalisé. Effectivement la valeur maximale (en bleu) est supérieure au seuil maximal déterminé par la méthode de la boîte de moustaches (en orange), ce qui veut dire qu'il existe au moins une VA parmi les données malgré une première suppression effectuée à l'étape 3.

Min	0,65
Q1	0,895
Moy	0,997
Q3	1,075
Max	1,42
IQR	0,18
Seuil min	0,625
Seuil max	1,345

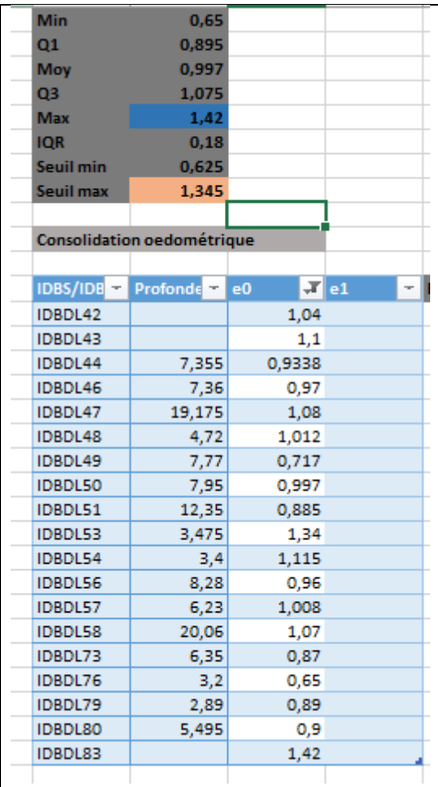
Consolidation oedométrique

IDBS/IDB	Profonde	e0	e1
IDBDL42		1,04	
IDBDL43		1,1	
IDBDL44	7,355	0,9338	
IDBDL46	7,36	0,97	
IDBDL47	19,175	1,08	
IDBDL48	4,72	1,012	
IDBDL49	7,77	0,717	
IDBDL50	7,95	0,997	
IDBDL51	12,35	0,885	
IDBDL53	3,475	1,34	
IDBDL54	3,4	1,115	
IDBDL56	8,28	0,96	
IDBDL57	6,23	1,008	
IDBDL58	20,06	1,07	
IDBDL73	6,35	0,87	
IDBDL76	3,2	0,65	
IDBDL79	2,89	0,89	
IDBDL80	5,495	0,9	
IDBDL83		1,42	

9	Données dont les valeurs aberrantes sont corrigées par la méthode de Doerffel		Les changements sont similaires à ceux observés dans l'étape 7.

e0 consol	Échantillon
Taille	25
Min	0,38
Max	2,3
Dα	0,272

PDF	Log normale	Gumbel	Inv Gauss
Dn	0,1749	0,178	0,1812
Moyenne	1,103	1,101	1,102
Mode	0,88	0,903	0,868
Écart-type	0,44	0,44	0,44
Kurtosis	0,194	0,196	0,195
Skewness	5,95	5,4	2,41
Colonne1	1,26	1,14	1,2

10	Données dont les valeurs aberrantes sont supprimées par la méthode de la boîte de Doerffel		Constat identique à celui de l'étape 8.

Min	0,65
Q1	0,895
Moy	0,997
Q3	1,075
Max	1,42
IQR	0,18
Seuil min	0,625
Seuil max	1,345

Consolidation oedométrique

IDBS/IDE	Profonde	e0	e1
IDBDL42		1,04	
IDBDL43		1,1	
IDBDL44	7,355	0,9338	
IDBDL46	7,36	0,97	
IDBDL47	19,175	1,08	
IDBDL48	4,72	1,012	
IDBDL49	7,77	0,717	
IDBDL50	7,95	0,997	
IDBDL51	12,35	0,885	
IDBDL53	3,475	1,34	
IDBDL54	3,4	1,115	
IDBDL56	8,28	0,96	
IDBDL57	6,23	1,008	
IDBDL58	20,06	1,07	
IDBDL73	6,35	0,87	
IDBDL76	3,2	0,65	
IDBDL79	2,89	0,89	
IDBDL80	5,495	0,9	
IDBDL83		1,42	

c. Détermination du plus petit C_k (en orange)

L'explication du calcul de C_k est donnée dans la section 1.4.1.2.

Paramèetre	Échantillon de données	Lois de probabilité	Dα	Dn	Ck
e0 consol	Initiale	Log normale	0,2720000	0,1854	0,681618
e0 consol	VA traitées par BM	Erlang	0,2720000	0,1304	0,479412
e0 consol	VA supprimées par BM				
e0 consol	VA traitées par D	Log normale	0,2720000	0,1749	0,643015
e0 consol	VA supprimées par D				

d. Détermination des incertitudes

Paramètre	Échantillon	Taille	Min	Max	Dα	Loi de probabilité	Ck	COV	Dn	Moyenne	Mode	Écart-type	Variance	Kurtosis	Skweness
e0 densité	VA supprimées par BM	29	0,66	1,77	0,2525457	Erlang	0,397552	0,258120	0,1004	1,17	1,09	0,302			

ANNEXE C : Tableau présentant le bilan de résultats de tous les tests d'adéquations (En jaune les indiques du meilleur résultat pour un paramètre géotechnique)

Paramètre	Échantillon	Taille	Min	Max	Dα	PDF	Ck	COV	Dn	Moyenne	Mode	Écart-type	Variance	Kurtosis	Skweness
W (%)	Initiale	659	12,5	73,53	0,0529781	Logistique	1,0155144	0,205907	0,0538	42,155	42,155	8,68	75,335	4,2	0
W (%)	VA traitées par BM	659	19,6	63,4	0,0529781	Normale	0,9815381	0,201092	0,052	42,12	42,12	8,47	71,8	3	0
W (%)	VA supprimées par BM	645	21,81	62	0,0535499	Normale	0,7507010	0,190237	0,0402	41,79	41,79	7,95	62,24	3	0
W (%)	VA traitées par D	659	12,5	69,64	0,0529781	Logistique	1,0155144	0,205457	0,0538	42,15	42,15	8,66	74,96	4,2	0
W (%)	VA supprimées par D	657	12,5	67	0,0530587	Logistique	1,0139722	0,205457	0,0538	42,15	42,15	8,66	74,97	4,2	0
WL (%)	Initiale	159	16,5	67,11	0,1078550	Inv Gauss	0,9948541	0,303281	0,1073	37,279	32,488	11,306	127,83	0,91	1,38
WL (%)	VA traitées par BM														
WL (%)	VA supprimées par BM														
WL (%)	VA traitées par D														
WL (%)	VA supprimées par D														
WP (%)	Initiale	160	11,93	28,4	0,1075174	Gumbel	0,7422052	0,126351	0,0798	21,1	19,9	2,666	7,11	1,14	5,4
WP (%)	VA traitées par BM	160	14,26	28,24	0,1075174	Gumbel	0,7589466	0,124112	0,0816	21,11	19,93	2,62	6,86	5,4	1,14
WP (%)	VA supprimées par BM	157	15	27,9	0,1075174	Logistique	1,0854053	0,162757	0,1167	20,89	20,89	3,4	11,57	4,2	0
WP (%)	VA traitées par D														
WP (%)	VA supprimées par D														
IP (%)	Initiale	159	1,5	43,54	0,1078550	Gamma	0,9077000	0,617048	0,0979	16,19	10,03	9,99	99,742	1,234	2,283
IP (%)	VA traitées par BM														
IP (%)	VA supprimées par BM														
IP (%)	VA traitées par D														
IP (%)	VA supprimées par D														
IL	Initiale	155	-0,69	9,57	0,1092378	Gumbel	1,3017469	0,841346	0,1422	2,08	1,292	1,75	3,063	1,14	5,4
IL	VA traitées par BM	155	-0,69	5,85	0,1092378	Gumbel	1,2001337	0,755000	0,1311	2	1,32	1,51	2,27	5,4	1,14
IL	VA supprimées par BM	146	-0,69	5,27	0,1125544	Gumbel	1,1647701	0,754246	0,1311	2,002	1,32	1,51	2,27	5,4	1,14
IL	VA traitées par D	155	-0,69	6,61	0,1092378	Min extreme	1,1955565	0,783251	0,1306	2,03	1,32	1,59	2,52	5,4	1,14
IL	VA supprimées par D		Non												
e0 densité	Initiale	31	0,66	2,58	0,2442632	Log normale	0,4196293	1,000000	0,1025	1,245	1,0717	1,245	0,163	1,006	4,85
e0 densité	VA traitées par BM	31	0,66	2,16	0,2442632	Log normale	0,4077569	0,308943	0,0996	1,23	1,07	0,38	0,144	4,66	0,95
e0 densité	VA supprimées par BM	29	0,66	1,77	0,2525457	Erlang	0,3975519	0,258120	0,1004	1,17	1,09	0,302			
e0 densité	VA traitées par D	31	0,66	2,4	0,2442632	Log normale	0,4147166	0,314516	0,1013	1,24	1,07	0,39			
e0 densité	VA supprimées par D	30	0,66	2,23	0,2483009	Erlang	0,4236795	0,285358	0,1052	1,202	1,104	0,343			

e0 consol	Initiale	25	0,38	2,834	0,2720000	Log normale	0,6816176	41,964286	0,1854	1,12	0,88	47	0,2223	6,33	1,33
e0 consol	VA traitées par BM	25	0,56	1,44	0,2720000	Erlang	0,4794118	0,262136	0,1304	1,03	0,963	0,27	0,073	0,41	0,52
e0 consol	VA supprimées par BM	non													
e0 consol	VA traitées par D	25	0,38	2,3	0,2720000	Log normale	0,6430147	0,398912	0,1749	1,103	0,88	0,44	0,194	5,95	1,26
e0 consol	VA supprimées par D	non													
n (%) densité	Initiale	31	39,79	72	0,2442632	Gamma	0,3975220	0,144449	0,0971	53,86	52,73	7,78	60,52	0,1252	0,2889
n (%) densité	VA traitées par BM														
n (%) densité	VA supprimées par BM														
n (%) densité	VA traitées par D														
n (%) densité	VA supprimées par D														
n (%) consol	Initiale	25	27,53	73,92	0,2720000	Logistique	0,6286765	0,192399	0,171	50,78	50,78	9,77	95,49	4,2	0
n (%) consol	VA traitées par BM	25	38,64	61,15	0,2720000	Logistique	0,4227941	0,133888	0,115	50,49	50,49	6,76	45,64	4,2	0
n (%) consol	VA supprimées par BM	non													
n (%) consol	VA traitées par D														
n (%) consol	VA supprimées par D														
Dr densité	Initiale	29	2,174	2,851	0,2525457	Weibull	0,6592867	0,040441	0,1665	2,72	2,76	0,11	0,0122	4,603	-0,958
Dr densité	VA traitées par BM	29	2,53	2,851	0,2525457	Min Extreme	0,4676382	0,034432	0,1181	2,73	2,78	0,094	0,0089	5,4	-1,4
Dr densité	VA supprimées par BM														
Dr densité	VA traitées par D														
Dr densité	VA supprimées par D														
Dr consol	Initiale	22	2,12	2,88	0,2899530	Weibull	0,7314979	0,047778	0,2121	2,7	2,753	0,129	0,0166	4,49	-0,927
Dr consol	VA traitées par BM	22	2,54	3,88	0,2899530	Weibull	0,6552787	0,033333	0,19	2,73	2,77	0,091	0,0083	4,273	-0,989
Dr consol	VA supprimées par BM	20	2,57	2,88	0,3041052	Weibull	0,6415542	0,028364	0,1951	2,75	2,78	0,078	0,0061	4,82	-1,01
Dr consol	VA traitées par D														
Dr consol	VA supprimées par D														
ρ densité (g/cm3)	Initiale	26	1,56	2,97	0,2667179	Log logistic	0,4281677	0,136339	0,1142	1,863	1,756	0,254	0,0646	--	9,89
ρ densité (g/cm3)	VA traitées par BM	26	1,56	2,21	0,2667179	Gumbel	0,3520573	0,082334	0,0939	1,834	1,77	0,151	0,0229	5,4	1,14
ρ densité (g/cm3)	VA supprimées par BM														
ρ densité (g/cm3)	VA traitées par D	26	1,56	2,29	0,2667179	Log logistique	0,3306864	0,110870	0,0882	1,84	1,76	0,204	0,0414	Nan	5,23
ρ densité (g/cm3)	VA supprimées par D	25	1,56	2,17	0,2720000	Gumbel	0,3889706	0,071429	0,1058	1,82	1,76	0,13	0,0178	5,4	1,14
ρconsolid (g/cm3)	Initiale	12	1,73	2,85	0,3925982	Gumbel	0,5448319	0,142241	0,2139	2,088	1,95	0,297	0,0883	5,4	1,14
ρconsolid (g/cm3)	VA traitées par BM	12	1,73	2,51	0,3925982	Log logistique	0,5412659	0,128986	0,2125	2,07	1,96	0,267	0,0717	1174,29	4,185
ρconsolid (g/cm3)	VA supprimées par BM														
ρconsolid (g/cm3)	VA traitées par D														
ρconsolid (g/cm3)	VA supprimées par D														

Qc (kPa)	Initiale	1128	60	8300	0,0404934	Gamma	1,5009849	0,586547	0,06078	1294,1	848,89	759,05	576156,9025		
Qc (kPa)	VA traitées par BM	1128	60	3250	0,0404934	Gamma	1,5607478	0,567023	0,0632	1271,96	863	721,231	520174,34	1,93	1,14
Qc (kPa)	traitées par Excel							0,548264		1271,95922	1000	697,369357	486324,0196	0,72203428	-0,10397014
Qc (kPa)	VA traitées par D														
Qc (kPa)	VA supprimées par D														
fs (kPa)	Initiale	1130	8	633	0,0404576	Inv Gauss	2,6595771	0,720362	0,1076	40,32	19,71	29,045	843,612025		
fs (kPa)	VA traitées par BM	1130	8	87,5	0,0404576	Lognormale	2,6447467	0,660954	0,107	37,93	22,01	25,07	628,75	13,4	2,73
fs (kPa)	traitées par Excel							0,592421		37,6799115	25	22,3223548	498,2875235	0,91169564	-0,16886943
fs (kPa)	VA traitées par D														
fs (kPa)	VA supprimées par D														
N	Initiale	39	1	100	0,2177743	Log normale	0,7140421	1,845883	0,1555	14,21	1,53	26,23	688,08	604,796	11,83
N	VA traitées par BM	39	1	18	0,2177743	Inv Gauss	0,5638866	0,924848	0,1228	7,385	2,536	6,83	46,68	12,84	2,776
N	VA supprimées par BM	non													
N	VA traitées par D	39	1	80	0,2177743	Log normale	0,6809803	172,637944	0,1483	13,23	1,37	2284	521,62	421,53	1,032
N	VA supprimées par D	non													
Su (kPa)	Initiale	352	20	197	0,0724882	Erlang	0,8359976	0,416339	0,0606	99,27	82,06	41,33	1708,12	1,04	0,833
Su (kPa)	VA traitées par BM														
Su (kPa)	VA supprimées par BM														
Su (kPa)	VA traitées par D														
Su (kPa)	VA supprimées par D														
Sur (kPa)	Initiale	61	3	131	0,1741302	Inv Gauss	0,8373047	1,308373	0,1458	39,53	7,43	51,72	2675,34	25,68	3,93
Sur (kPa)	VA traitées par BM														
Sur (kPa)	VA supprimées par BM														
Sur (kPa)	VA traitées par D														
Sur (kPa)	VA supprimées par D														
St	Initiale	403	1	1902	0,0677464	Log normale	1,7786916	5,521664	0,1205	440,36	2,49	2431,52	5912286,24	1048484,44	18491
St	VA traitées par BM	403	1	1368,74	0,0677464	Log normale	1,7934526	5,473416	0,1215	435,41	2,527	2383,18	5679564,16	980860,2	1800,4
St	VA supprimées par BM	non													
St	VA traitées par D	403	1	1503	0,0677464	Log normale	1,7860721	5,496768	0,121	437,81	2,5	2406,54	5791416,15	1013030,65	182,57
St	VA supprimées par D	non													
Suc (kPa)	Initiale	50	7,5	245	0,1923330	Gamma	0,5251308	0,769846	0,101	78,73	32,07	60,61	3673,76	3,556	1,54
Suc (kPa)	VA traitées par BM	50	7,5	197,5	0,1923330	Erlang	0,5308500	0,755734	0,1021	77,17	33,1	58,32	3400,68	3,46	1,51
Suc(kPa)	VA supprimées par BM	48	7,5	191	0,1962991	Erlang	0,4590953	0,738498	0,09012	72,16	32,798	53,29	2840,04	3,27	1,48
Suc (kPa)	VA traitées par D														
Suc(kPa)	VA supprimées par D														
Surc(kPa)	Initiale	49	0,12	72	0,1942857	Log normale	0,5666912	2,116331	0,1101	6,705	0,523	14,19	201,417	1318,012	15,83
Surc (kPa)	VA traitées par BM	49	0,12	9,76	0,1942857	Log normale	0,4764118	1,405213	0,09256	4,22	0,824	5,93	35,16	154,134	6,98
Surc (kPa)	VA supprimées par BM	Non													
Surc (kPa)	VA traitées par D	49	0,12	25	0,1942857	Log normale	0,4601471	1,872014	0,0894	5,86	0,61	10,97	120,33	654,42	12,19
Surc(kPa)	VA supprimées par D	non													
Stc	Initiale	49	1,273	87,71	0,1942857	Log normale	0,3520588	1,072380	0,0684	29,29	9,29	31,41	986,69	52,13	4,45
Stc	VA traitées par BM	49	1,273	72,78	0,1942857	Log normale	0,3453676	1,050139	0,0671	28,72	9,42	30,16	909,51	48,38	4,31
Stc	VA supprimées par BM														

Stc	VA traitées par D														
Stc	VA supprimées par D														
Cu1 (kPa)	Initiale	38	2,8	129,52	0,2206211	Erlang	0,3462950	0,707877	0,0764	45,07	22,49	31,904	1017,877	3,01	1,41
Cu1 (kPa)	VA traitées par BM	38	2,8	99,78	0,2206211	Weibull	0,3385895	0,631713	0,0747	43,2	26,74	27,29	744,84	3,98	0,94
Cu1 (kPa)	VA supprimées par BM	Non													
Cu1 (kPa)	VA traitées par D														
Cu1 (kPa)	VA supprimées par D														
σ'p (kPa)	Initiale	43	17	775	0,2073981	Gamma	0,5728115	0,766712	0,1188	248,02	102,22	190,16	36161,12	3,53	1,53
σ'p (kPa)	VA traitées par BM	43	17	510,4	0,2073981	Erlang	0,5110945	0,706301	0,106	227,41	113,97	160,62	25798,49	2,99	1,41
σ'p (kPa)	VA supprimées par BM														
σ'p (kPa)	VA traitées par D														
σ'p (kPa)	VA supprimées par D														
σ'v0 (kPa)	Initiale	33	0,34	216	0,2367456	Weibull	0,5030716	0,774735	0,1191	77,42	27,26	59,98	3597,93	5,42	1,34
σ'v0 (kPa)	VA traitées par BM														
σ'v0 (kPa)	VA supprimées par BM														
σ'v0 (kPa)	VA traitées par D														
σ'v0 (kPa)	VA supprimées par D														
OCR	Initiale	29	0,29	50	0,2525457	Inv Gauss	0,5385165	1,650538	0,136	5,58	0,67	9,21	84,9	40,88	4,95
OCR	VA traitées par BM	29	0,29	14,85	0,2525457	Inv Gauss	0,5036713	1,386728	0,1272	4,37	0,74	6,06	36,72	28,85	4,16
OCR	VA supprimées par BM		Non												
OCR	VA traitées par D	29	0,29	19	0,2525457	Inv Gauss	0,5096108	1,421286	0,1287	4,51	0,73	6,41	41,07	30,25	4,26
OCR	VA supprimées par D	28	0,29	14,15	0,2570158	Inv Gauss	0,5081399	1,325000	0,1306	4	0,73	5,3	28,07	26,38	3,98