

Université de Sherbrooke

Faculté de génie

Département de génie civil

Étude expérimentale du comportement en cisaillement de résidus miniers épais

Mémoire de maîtrise

Spécialité : géotechnique

Jérôme LAPIERRE

Jury :

Mathieu NUTH, ing. jr., Ph. D. (directeur)

Mourad KARRAY, ing., Ph. D. (codirecteur)

Yannic ETHIER, Ph. D. (réviseur externe)

Alexandre CABRAL, ing., Ph. D. (rapporteur)

Résumé

Les résidus miniers épaissis représentent une alternative de plus en plus utilisée pour le stockage de surface. Cette technologie, développée au Canada, possède plusieurs avantages par rapport aux résidus miniers conventionnels, qui contiennent typiquement plus d'eau. Ceci permet de réduire la consommation d'eau de la mine, en plus d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau, et de réduire l'empreinte des parcs à résidus. Néanmoins, bien que ces avantages soient tous théoriquement vrais, des efforts en recherche expérimentale sont encore nécessaires afin de valider ces affirmations. Ce projet s'inscrit dans cette ligne, et se veut une étude de laboratoire du comportement en cisaillement des résidus miniers épaissis. Le contexte théorique de la résistance au cisaillement statique est tout d'abord abordé pour ce type de matériau. L'essai triaxial et la mesure des vitesses des ondes de cisaillement (V_s) sont abordés en détails, puisque des liens sont effectués entre les résultats de ces deux essais. Certains modèles de comportement en cisaillement, comme le modèle hyperbolique de Duncan et Chang, sont abordés afin de pouvoir être utilisés comme outils d'analyse. Le phénomène de la liquéfaction statique est également abordé dans le cadre du comportement volumétrique lors du cisaillement. Les positions des écoles de Harvard et de Cambridge sur ce sujet sont résumées et comparées, dans le but d'élaborer un cadre d'analyse clair pour ce projet. Au niveau expérimental, plusieurs essais triaxiaux ont été effectués afin d'évaluer la résistance au cisaillement statique d'un résidu provenant d'une mine d'or canadienne. Des essais en conditions drainées et non-drainées sont effectués et comparés aux résultats provenant d'un autre laboratoire. Cette comparaison a pour but de valider le bon fonctionnement de l'appareil triaxial ELDYN, de marque GDS, utilisé dans le cadre de ce projet. En effet, cet appareil est neuf, et une étape de prise en main et de calibration est nécessaire. Par ailleurs, une méthode de mise en place des échantillons triaxiaux par déposition hydraulique a été élaborée afin de mieux reproduire l'état des résidus sur le terrain. Des essais triaxiaux ont été effectués afin d'évaluer l'impact de la méthode de mise en place sur la résistance au cisaillement et certains autres facteurs. Des mesures de vitesses des ondes de cisaillement sont également effectuées pour 2 raisons. Tout d'abord, la technique de mesure par anneaux piézoélectriques, développée à l'Université de Sherbrooke, n'a jamais été appliquée sur ce type de matériau. Par ailleurs, des modules de cisaillement provenant des essais triaxiaux et des mesures de V_s sont comparés, afin d'établir un lien entre le domaine des petites et des grandes déformations. Lors de mesures de V_s sur le terrain, ce type de relation pourrait éventuellement permettre d'obtenir des paramètres de résistance au cisaillement à grandes déformations (φ' , c') à partir de mesures *in situ* non-destructives, effectuées à très petites déformations.

Mots-clés : *résidus miniers, triaxial, vitesses des ondes de cisaillement, laboratoire, cisaillement, mise en place*

Remerciements

Au terme de 2 ans de travail sur ce projet, je tiens à remercier le professeur Mathieu Nuth, pour son encadrement, sa grande disponibilité et son ouverture d'esprit durant toute cette période. Ce fut un réel plaisir de travailler en sa présence.

Je tiens également à remercier le professeur Mourad Karray, qui a été d'une aide précieuse par ses conseils, sa grande expérience et sa disponibilité.

Par ailleurs, je remercie les techniciens de laboratoire, Jean-Guy Lemelin et Valérie Dumoulin, pour leurs idées, leurs conseils et leur support technique qui ont permis de mener ce projet à terme. Je tiens à remercier particulièrement Jean-Guy Lemelin pour la conception du moule à vacuum utilisé dans le cadre de ce projet.

Finalement, je remercie ma compagne, Élyse Fournier, et ma famille pour leur support et leurs encouragements tout au long de ce projet.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements.....	ii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Liste de acronymes.....	x
Liste des symboles	x
1 Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.1.1 L'industrie minière au Québec	1
1.1.2 La problématique des résidus miniers conventionnels.....	1
1.1.3 Les résidus miniers épaisiss	2
1.1.4 Le besoin d'améliorer les connaissances sur la résistance au cisaillement des résidus miniers épaisiss.....	2
1.2 Définition du projet de recherche	3
1.2.1 Intérêt scientifique	3
1.2.2 Définition du projet	4
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	4
1.3.1 Objectifs principaux.....	4
1.4 Contributions originales.....	5
1.4.1 Développement d'une méthode de mise en place par déposition hydraulique lors d'essais triaxiaux sur des résidus miniers	5
1.4.2 Application de la mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement par anneaux piézoélectriques à des résidus miniers	5
1.4.3 Comparaison des modules élastiques par l'essai triaxial et la mesure des vitesses de cisaillement.....	6
1.5 Plan du document.....	6
2 Revue de littérature sur le comportement en cisaillement statique des résidus miniers épaisiss.....	8
2.1 Description du matériau à l'étude.....	8
2.2 Essais	9
2.2.1 Triaxial	9
2.2.2 La mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement	12
2.3 Modèles de comportement en cisaillement pour les sols granulaires saturés.....	15

2.3.1	Modèle des contraintes effectives de Terzaghi	15
2.3.2	Enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb.....	16
2.3.3	Modèle de Duncan et Chang.....	17
2.3.4	Modèles de comportement à très petites déformations	19
2.4	Comportement volumétrique lors du cisaillement des sols granulaires saturés.....	21
2.4.1	Sols contractants et sols dilatants.....	21
2.4.2	Comportement volumétrique et liquéfaction.....	24
2.5	Effet de certains paramètres sur l'essai triaxial	33
2.5.1	Mesure et influence du degré de saturation	33
2.5.2	Effet de la densité.....	33
2.5.3	Effet de la mise en place	34
3	Méthodologie.....	36
3.1	Hypothèses de travail	36
3.2	Appareillage et procédures d'essais.....	38
3.2.1	Triaxial GDS ELDYN	38
3.2.2	Dispositif de mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement	47
3.3	Méthodes.....	51
3.3.1	Normes	51
3.3.2	Autres méthodes (protocoles d'essais).....	51
4	Résultats.....	67
4.1	Caractérisation Préliminaire	67
4.2	Essais triaxiaux.....	69
4.2.1	Laboratoire	69
4.2.2	Modèle de Duncan et Chang.....	96
4.3	<i>Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement</i>	106
4.3.1	Courbes oedométriques.....	106
4.3.2	Modules oedométriques.....	107
4.3.3	Vitesse des ondes de cisaillement.....	108
4.3.4	Modules de cisaillement	109
5	Analyse et interprétation des résultats	112
5.1	Analyse.....	112
5.1.1	Résistance au cisaillement	112
5.1.2	Effet du type de mise en place lors d'essais triaxiaux.....	115

5.1.3	Comparaison entre les paramètres à petites et grandes déformations	117
5.2	Discussion	118
5.2.1	Utilisation des différents essais dans la pratique	118
5.2.2	De nombreux angles de friction	119
5.2.3	Utilisation du modèle de Duncan et Chang.....	120
5.2.4	Saturation au CO ₂	121
6	Conclusion	122
6.1	Sommaire	122
6.1.1	Mise en marche de l'appareil triaxial	122
6.1.2	Effet de la méthode de mise en place lors d'essais triaxiaux.....	122
6.1.3	Application du modèle hyperbolique sur des résidus miniers	123
6.1.4	Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur des résidus miniers	123
6.1.5	Comparaison entre les modules de cisaillement obtenus à petites et grandes déformations	123
6.2	Liens avec les autres travaux faits à l'Université de Sherbrooke	124
6.3	Travaux futurs	124
6.3.1	Déposition hydraulique	124
6.3.2	Simulations numériques des essais triaxiaux non-drainés.....	126
6.3.3	Mise en marche des autres modules de l'appareil triaxial	126
6.3.4	Vérification de la présence d'une fuite lors d'essais en conditions drainées ...	126
6.3.5	Développement d'une nouvelle cellule pour les mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur les sols granulaires fins	127
6.3.6	Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement in situ sur des résidus miniers	127
6.3.7	Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans un appareil de cisaillement conventionnel	127
	Annexe 1 : Sédimentométrie.....	128
	Annexe 2 : Essais triaxiaux.....	130
	Annexe 3 : Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement.....	149
	Annexe 4 : Appareillage.....	156
	Liste des références.....	169

Liste des figures

Figure 2.1 : Le matériau à l'état sec	9
Figure 2.2: Schéma de montage pour des bilames piézoélectriques [16]	13
Figure 2.3 : Schéma de l'assemblage d'un anneau piézoélectrique [16]	14
Figure 2.4 : Modèle de Mohr-Coulomb appliqué à un essai triaxial non-drainé	17
Figure 2.5 : Comparaison entre les modèles de Mohr-Coulomb et de Duncan et Chang [45].	17
Figure 2.6 : Illustration des différents domaines de déformations, d'après [4]	20
Figure 2.7 : Indice des vides critiques en cisaillement, adapté de [21]	21
Figure 2.8: <i>Steady-state line</i> , adaptée de [34]	23
Figure 2.9: <i>Critical State Line</i> [23]	24
Figure 2.10: Essais triaxiaux contractants et dilatants [46]	26
Figure 2.11 : Cheminements de contraintes pour certains essais triaxiaux [46]	27
Figure 2.12 : Essais triaxiaux contractants et dilatants [29]	27
Figure 2.13 : Cheminements de contraintes pour certains triaxiaux [29]	28
Figure 2.14 : CSL et NCL, adaptée de [21]	29
Figure 2.15: Zone d'instabilité pour des essais triaxiaux [40]	30
Figure 2.16: Essais triaxiaux de Benhamed et al. [7]	31
Figure 2.17 : Échantillon CU dilatant	32
Figure 2.18 : Microstructure d'échantillons reconstitués [7]	34
Figure 2.19: Angles de frictions pour différentes méthodes de mise en place [13]	35
Figure 3.1 : Appareil triaxial GDS ELDYN	38
Figure 3.2 : Schéma de montage de l'appareil GDS ELDYN, en mode saturé	39
Figure 3.3 : Pression cellulaire en fonction de la déformation axiale, essai CD avec fuite	40
Figure 3.4 : Déviateur en fonction de la déformation axiale, essai CD avec fuite	41
Figure 3.5 : Circulation d'eau désaérée et saturation par contre-pression	42
Figure 3.6 : Moule fendu livré avec l'appareil ELDYN de GDS	44
Figure 3.7 : Moule à vacuum, développé à l'Université de Sherbrooke	45
Figure 3.8 : Colonne de déposition hydraulique	47
Figure 3.9 : Appareil oedométrique M&L Testing utilisé pour la mesure des vitesses de cisaillement	48
Figure 3.10 : Cellule oedométrique modifiée utilisée pour la mesure des vitesses de cisaillement, avec le chapeau, contenant l'émetteur, et la base contenant le récepteur	48
Figure 3.11 : Schéma du système des mesures de vitesses de cisaillement en laboratoire [16]	49
Figure 3.12 : Obtention du E_r pour un essai CD	59
Figure 3.13 : Courbe de consolidation oedométrique provenant d'un essai V_s	65
Figure 4.1 : Cercles de Mohr pour les essais CU MT	70
Figure 4.2 : Déviateur en fonction de la déformation axiale, série CU MT	71
Figure 4.3 : Pression interstitielle en fonction de la déformation axiale, série CU MT	72
Figure 4.4 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, série CU MT	72
Figure 4.5 : Cheminements de contraintes, série CU MT	73
Figure 4.6 : CSL pour la série CU MT	74

Figure 4.7 : Déviateur en fonction de la déformation axiale pour les essais CU effectués par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke [19].	76
Figure 4.8 : Cheminements de contraintes pour les essais CU de Golder et Associés [19].	77
Figure 4.9 : Cercles de Mohr pour les essais CD MT	79
Figure 4.10 : Déviateur en fonction de la déformation axiale, série CD MT	80
Figure 4.11 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, série CD MT	81
Figure 4.12 : Déformation volumétrique en fonction de la déformation axiale, série CD MT	82
Figure 4.13 : Déviateur en fonction de la déformation axiale pour les essais CD effectués par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke [19].	83
Figure 4.14 : Rapports des contraintes principales en fonction de la déformation axiale pour les essais CD effectués par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke [19]	84
Figure 4.15 : Consolidation isotrope des échantillons MT	85
Figure 4.16 : Déviateur en fonction de la contrainte axiale, CU MT et HD	87
Figure 4.17 : Pressions interstitielles en excès en fonction de la déformation axiale, série CU MT et HD	88
Figure 4.18 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, essais CU MT et HD	88
Figure 4.19 : Cheminement de contraintes pour les essais CU MT et HD	89
Figure 4.20 : CSL et NCL pour les essais CU	91
Figure 4.21 : Déviateur en fonction de la contrainte axiale, série CD HD	93
Figure 4.22 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, série CD HD	93
Figure 4.23 : Déformations volumétriques en fonction de la déformation axiale, série CD HD	94
Figure 4.24 : NCL et CSL, séries MT et HD	95
Figure 4.25 : Consolidation isotrope des échantillons HD	96
Figure 4.26 : Lissage des modules élastiques initiaux, série CD MT	97
Figure 4.27 : Modélisation du déviateur en fonction de la contrainte axiale, série CD MT	98
Figure 4.28 : Modélisation de la consolidation isotrope, série CD MT	99
Figure 4.29 : Modélisation des déformations volumétriques lors du cisaillement, série CD MT	100
Figure 4.30 : Lissage des modules élastiques initiaux, série CD HD	102
Figure 4.31 : Modélisation du déviateur en fonction de la déformation axiale, série CD HD	103
Figure 4.32 : Modélisation de la consolidation isotrope, série CD HD	104
Figure 4.33 : Modélisation des déformations volumétriques lors du cisaillement, série CD HD	105
Figure 4.34 : Courbes oedométriques obtenues lors des mesures de V_s	107
Figure 4.35 : Modules oedométriques obtenus lors des mesures de V_s	108
Figure 4.36 : Vitesses de cisaillement normalisées en fonction de l'indice des vides	109
Figure 4.37 : Modules de cisaillement en fonction de l'indice des vides obtenus par essais triaxiaux et par mesures de V_s	110
Figure 4.38 : Angle de friction effectif en fonction de l'indice des vides, série CD MT	111
Figure 5.1 : Comparaison entre rigidité et résistance	118

Figure A1.1 : Sédimentométrie effectuée à l'Université de Sherbrooke [20]	129
Figure A2.1 : Courbe granulométrique de Golder et Associés[19]	131
Figure A2.2 : Essais triaxiaux CU de Golder et Associés[19]	132
Figure A2.3 : Essais triaxiaux CD de Golder et Associés[19]	133
Figure A2.4 : Détails de l'essai CU MT 125	134
Figure A2.5 : Détails de l'essai CU MT 250	135
Figure A2.6 : Détails de l'essai CU MT 500	136
Figure A2.7 : Détails de l'essai CD MT 125	137
Figure A2.8 : Détails de l'essai CD MT 250	138
Figure A2.9 : Détails de l'essai CD MT 500	139
Figure A2.10 : Pression interstitielles en fonction de la contrainte axiale, essai CD MT 125.	140
Figure A2.11 : Pression interstitielles en fonction de la contrainte axiale, essai CD MT 250.	140
Figure A2.12 : Pression interstitielles en fonction de la contrainte axiale, essai CD MT 500.	141
Figure A2.13 : Détails de l'essai CU 250 (HD)	142
Figure A2.14 : Détails de l'essai CU 250 (MT).....	143
Figure A2.15 : Détails de l'essai CD HD 125	144
Figure A2.16 : Détails de l'essai CD HD 250	145
Figure A2.17 : Détails de l'essai CD HD 500	146
Figure A2.18 : Résultats de la série CD HD	147
Figure A2.19 : Variations de la pression interstitielle lors du cisaillement, série HD CD.....	148
Figure A3.1 : Fiche de laboratoire, essai "td1"	150
Figure A3.2 : Chargement oedométrique, essai "td1"	151
Figure A3.3 : Fiche de laboratoire, essai "td4"	152
Figure A3.4 : Chargement oedométrique, essai "td4"	153
Figure A3.5 : Fiche de laboratoire, essai "td5"	154
Figure A3.6 : Chargement oedométrique, essai "td5"	155
Figure A4.1 : Paramètres de calibration des capteurs du triaxial GDS ELDYN	157
Figure A4.2 : Dessin du moule à vacuum	158
Figure A4.3 : Dessin de la tête du moule à vacuum	159
Figure A4.4 : Détail de la jonction entre la colonne de déposition hydraulique et le moule à vacuum	160
Figure A4.5 : Pré-consolidation de l'échantillon lors de la déposition hydraulique	161
Figure A4.6 : Échantillon mis en place par déposition hydraulique, prêt à être démoulé	162
Figure A4.7 : Consommation électrique des appareils GDS	163
Figure A4.8 : Schéma d'une nouvelle cellule permettant la mesure des V_s sur des sols granulaires fins	164
Figure A4.9 : Deux anneaux pour argile reliés ensemble, utilisés pour la mise en place M2.	165
Figure A4.10 : Échantillon mis en place selon la méthode M2	166
Figure A4.11 : Échantillon mis en place selon la méthode M1	167
Figure A4.12 : Schéma de montage de l'appareil triaxial en mode non-saturé	168

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Résultats d'essais CU sur des résidus miniers	11
Tableau 2.2 : Résultats d'essais CD sur des résidus miniers.....	12
Tableau 2.3 : V_{s1} sur des résidus miniers provenant de la littérature.....	15
Tableau 3.1 : Hypothèses et méthodes de travail.....	36
Tableau 3.2 : Écarts entre les masse volumiques visées et réelles, moule fendu	45
Tableau 3.3 : Écarts entre les masses volumiques visées et réelles, moule fendu	46
Tableau 4.1 : Programme expérimental.....	67
Tableau 4.2 : Comparaison des caractéristiques géotechniques obtenues par l'Université de Sherbrooke [20] et par Golder et Associés [19]	68
Tableau 4.4 : Paramètres d'état pour la série CU MT	74
Tableau 4.5 : Conditions d'essai pour les CU MT et HD	86
Tableau 4.6: Comparaison des densités initiales pour la série CD HD.....	92
Tableau 4.7 : Modules élastiques initiaux expérimentaux, série CD MT	97
Tableau 4.8 : Paramètres de lissage des modules élastiques initiaux, série CD MT	97
Tableau 4.9: Paramètres pour la modélisation du comportement déviatoire, série CD MT....	98
Tableau 4.10 : Paramètres de modélisation de la consolidation isotrope, série CD MT	99
Tableau 4.11 : Modules de cisaillement à grande déformation, série CD MT	101
Tableau 4.12 : Modules élastiques initiaux expérimentaux, série CD HD.....	101
Tableau 4.13 : Paramètres de lissage des modules élastiques initiaux, série CD MT	102
Tableau 4.14 : Paramètres de modélisation du comportement déviatoire, série CD HD	103
Tableau 4.15 : Paramètres de modélisation de la consolidation isotrope, série CD HD	104
Tableau 4.16 : Modules élastiques à grandes déformations, série CD HD	105
Tableau 4.17 : Paramètres de mise en place pour les essais de V_s	106
Tableau 5.1 : Comparaisons des paramètres de résistance au cisaillement pour les essais triaxiaux MT de l'Université de Sherbrooke et de Golder et Associés.....	112
Tableau 5.2 : Paramètres de résistance au cisaillement pour la série CU HD	113
Tableau 5.3 : Paramètres de résistance au cisaillement pour les essais CD HD	114

Liste de acronymes

CU : essai triaxial consolidé non-drainé

CD : essai triaxial consolidé drainé

CSL : *critical-state line*

DH : damage humide

HD : mise en place par déposition hydraulique. Vient de l'anglais *hydraulic deposition*

IC : essai de consolidation isotrope

MT : mise en place par compactage. Vient de l'anglais *moist-tamping*

NCL : *normal consolidation line*

PS : pluviation sèche

SSL : *steady-state line*

USCS : système de classification unifié des sols

Liste des symboles

Les symboles sans unités sont accompagné de l'indication (-).

c : cohésion (kPa)

C_u : coefficient d'uniformité (-)

d_r : diamètre réel (m)

D_{10} : diamètre des grains à 10% passant (mm)

D_{60} : diamètre des grains à 60% passant (mm)

e : indice des vides (-)

e_c : indice des vides critique (-)

E : module d'élasticité (kPa)

E_i : module d'élasticité initial (kPa)

E_{oed} : module oedométrique (MPa)

G : module de cisaillement à grandes déformations (MPa)

G_{max} : module de cisaillement à très petites déformations (MPa)

G_s : densité relative (-)
 h_{pp} : différence de hauteur entre la pierre poreuse et le *topcap* (m)
 h_{rc} : hauteur réelle par couche (m)
 h_{rt} : hauteur réelle totale (m)
 h_v : hauteur à vide (m)
 h_{vc} : hauteur visée par couche (m)
 k_o : coefficient des terres au repos (-), $\sigma'_{ho}/\sigma'_{vo}$
 k_{sat} : perméabilité saturée (cm/s)
 K : module de compressibilité (kPa)
 K_i : module de compressibilité initial (kPa)
 I : point d'instabilité (-)
 l_f : longueur finale (mm)
 l_i : longueur initiale (mm)
 I_p : indice de plasticité (%), $w_l - w_p$
 L_p : potentiel de liquéfaction (-)
 m_{rc} : masse réelle par couche (kg)
 m_{rt} : masse réelle totale (kg)
 m_{sf} : masse sèche finale (kg)
 m_{tv} : masse totale visée (kg)
 m_{vc} : masse visée par couche (kg)
 M : rapport des contraintes ou pente dans le plan p-q' (-), q/p'
 n : exposant adimensionnel du module (-)
 p_a : pression atmosphérique (kPa)
 p' : contrainte effective moyenne (kPa), $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$
 p'_c : contrainte effective moyenne critique (kPa)
 q : déviateur des contraintes effectives (kPa), $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$

R_f : rapport des contraintes à la rupture (-)
 s : point de solidification (-)
 v_f : volume final (mm³)
 v_i : volume initial (mm³)
 V_s : vitesse des ondes de cisaillement (m/s)
 w : teneur en eau massique (%)
 w_i : teneur en eau initiale (%)
 w_l : limite liquide (%)
 w_p : limite plastique (%)
 Γ : indice des vides de référence (-)
 $\Delta\mu$: pression interstitielles en excès (kPa)
 ε_a : déformation axiale (%), $(l_f - l_i)/l_i * 100$
 ε_u : déformation volumétrique asymptotique (%)
 ε_v : déformation volumétrique (%), $(v_f - v_i)/v_i * 100$
 ε_{ve} : déformation verticale (%)
 κ : multiplicateur adimensionnel du module (-)
 λ : pente de la CSL (-)
 μ : pression interstitielle (kPa)
 ρ_d : densité sèche (kg/m³)
 ρ_{dv} : masse volumique sèche visée (kg/m³)
 ρ_h : densité humide (kg/m³)
 ρ_r : masse volumique réelle (kg/m³)
 ρ_v : masse volumique visée, $\rho_{dv}/(1 + w_i)$ (kg/m³)
 σ : contrainte totale (kPa)
 σ_1 : contrainte principale majeure (kPa)
 σ_3 : contrainte principale mineure (kPa)

σ_m : contrainte moyenne (kPa), $(\sigma_1 - 2 \sigma_3)/3$
 σ_v : contrainte verticale (kPa)
 σ' : contrainte effective (kPa)
 σ'_{3c} : contrainte effective de consolidation (kPa)
 σ'_{3us} : contrainte effective résiduelle (kPa)
 σ'_c : contrainte effective de confinement (kPa), σ'_{3c}
 σ'_{ho} : contrainte horizontale effective in situ (kPa)
 σ'_m : contrainte effective moyenne (kPa), $(\sigma'_1 - 2 \sigma'_3)/3$
 σ'_n : contrainte effective normale (kPa), $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$
 σ'_{vo} : contrainte verticale effective in situ (kPa)
 (σ'_1 / σ'_3) : rapport des contraintes principales (kPa)
 τ : contrainte de cisaillement (kPa), $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$
 τ_f : contrainte de cisaillement à la rupture (kPa)
 φ : angle de friction en contraintes totales ($^\circ$)
 φ' : angle de friction effectif ($^\circ$)
 φ'_p : angle de friction effectif au pic ($^\circ$)
 φ'_r : angle de friction effectif résiduel ($^\circ$)
 ψ : paramètre d'état (-)

1 Introduction

Ce document rassemble les travaux effectués dans le cadre d'une maîtrise ayant comme thème *L'étude expérimentale du comportement en cisaillement de résidus miniers épaissis*. Ce projet a été réalisé à l'Université de Sherbrooke, de janvier 2012 à mai 2014.

1.1 Mise en contexte et problématique

1.1.1 L'industrie minière au Québec

L'industrie minière possède une grande importance économique au Québec, et ce depuis plusieurs décennies. Cette activité est liée au développement historique et actuel de plusieurs régions de la province, telle que l'Abitibi et la Côte-Nord. Au Canada, ce secteur emploie 306 000 personnes, représente 3,5% du PIB et compose 21% des exportations du pays [26]. Ce dynamisme à l'échelle nationale s'applique également au contexte québécois. En effet, les prochaines années verront la mise en marche de nombreux projets, suite à des initiatives tel que le Plan Nord, et à la forte demande internationale pour certains minerais présent au Québec.

Par contre, cette industrie possède également des inconvénients, notamment au niveau environnemental. De nombreux enjeux environnementaux sont reliés aux résidus miniers, qui peuvent être définis comme des particules de roche broyée finement dont les valeurs commerciales ont été extraites [9]. Ces résidus, parfois toxiques, doivent être stockés de façon adéquate, afin d'assurer la sécurité du public, et l'intégrité du milieu environnant. Tel qu'énoncé par Franks, il s'agit d'assurer la stabilité physique et chimique des résidus [17]. La stabilité physique est reliée au mode de stockage des résidus, et le sujet de cette maîtrise s'inscrit directement dans une perspective d'amélioration des connaissances à ce niveau. Au final, le concepteur de parcs à résidus doit faire face à plusieurs problématiques, et son choix de solution sera souvent un compromis tendant vers la plus grande stabilité physique, chimique et environnementale.

1.1.2 La problématique des résidus miniers conventionnels

Un des problèmes du stockage conventionnel est associé à la teneur en eau des résidus. En effet, les résidus conventionnels sont généralement des sols granulaires très fins contenant entre 25% et 45% de matières solides [9]. La mise en place d'aire de dépositions de tels résidus derrière des ouvrages en terre pose certains problèmes de sécurité. En effet, l'eau contenue dans les résidus est souvent située en hauteur. Sous l'effet de la gravité, elle cherche à sortir du parc à résidus. De plus, en cas de brèche dans le système de retenue des résidus, un déversement dans l'environnement est souvent inévitable en raison de la teneur en eau élevée du matériau. Plusieurs cas de rupture en cisaillement statique sont rapportés dans la littérature sur les résidus miniers. Un cas récent est de celui de la digue de résidus de

Merriespruit en 1994, en Afrique du Sud. La rupture de cette digue, due à un débordement, suivi d'une rupture en cisaillement et d'une liquéfaction statique du matériau, a entraîné le déversement de 600 000 m³ de matériaux vers un village voisin. Le cas d'Aberfan au Royaume-Uni, est un autre exemple de rupture dans un parc de résidus miniers, ayant causé la mort de 144 personnes. Finalement, le cas du barrage de Fort Peck, en 1934 aux États-Unis est un cas classique de rupture par cisaillement, suivie d'une liquéfaction statique. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un cas relié aux résidus miniers, ce-dernier a été fortement étudié et a marqué la pratique de la géotechnique aux États-Unis [23].

1.1.3 Les résidus miniers épaissis

Depuis quelques années, le perfectionnement des procédés de traitement a permis de produire ce que l'on appelle des résidus miniers épaissis. Il s'agit encore de roches broyées finement, sauf que leur teneur en eau est réduite en usine avant la déposition dans une aire appropriée. Les résidus épaissis possèdent habituellement une teneur en solides variant entre 50% et 75%, comparativement à 30% à 50% de solides pour les résidus conventionnels [9, 17]. Cette teneur en eau réduite confère généralement aux résidus une meilleure résistance au cisaillement et élimine les étangs de surfaces situés à l'intérieur des digues de confinement du parc à résidus [9]. Les résidus épaissis sont donc plus résistants, et moins sujets à des déversements catastrophiques. Ceci rejoint la notion de stabilité physique de Franks.

Par ailleurs, l'épaississement permet de réduire la consommation d'eau nécessaire à la production du minerai, ce qui représente un avantage au niveau environnemental. Dans un article de 2011, Vietti démontre que des économies d'eau de l'ordre de 60% seraient possibles pour le cas d'une mine de platine située en Afrique du Sud [43]. Dans les régions où l'eau est dispendieuse ou rare, l'utilisation de cette technologie permet d'économiser des coûts, puisque l'eau extraite en usine peut être recirculée dans le procédé.

1.1.4 Le besoin d'améliorer les connaissances sur la résistance au cisaillement des résidus miniers épaissis

La technologie des résidus miniers épaissis étant relativement jeune, il est encore nécessaire d'acquérir certaines connaissances afin d'assurer la sécurité du public et de l'environnement lors de son utilisation. De plus, l'épuisement des ressources traditionnelles et le développement de meilleures technologies d'extraction font en sorte que l'industrie minière se tourne actuellement vers des gisements contenant de moins en moins de minerai [30]. Ceci signifie que les projets à venir vont générer plus de résidus pour la même quantité de minerai produite. Le défi pour les concepteurs de parcs à résidus sera alors de continuer à assurer la sécurité des dépôts, tout en minimisant les coûts qui y sont associés. L'accroissement des connaissances scientifiques sur les résidus miniers épaissis est nécessaire afin de faire face à ce défi.

Ce projet s'inscrit dans cette perspective. En effet, les essais triaxiaux présentés ici permettront entre autres de connaître l'influence de la mise en place sur le potentiel de liquéfaction statique d'un échantillon. Par ailleurs, des modèles théoriques seront utilisés afin de valider les essais effectués au laboratoire sur le matériau à l'étude. Ces modèles sont simples, et l'un des objectifs de ce projet est de démontrer que l'ingénieur praticien peut les utiliser afin de vérifier les résultats de laboratoire. En effet, l'essai triaxial est assez complexe, et il existera toujours un certain pourcentage d'essais ratés [23]. De plus, il apparaît que les méthodes de mise en place couramment utilisées dans les laboratoires de géotechnique ne sont peut-être pas les plus représentatives des conditions de terrains qui prévalent pour les résidus miniers. Cet aspect sera étudié ici. Finalement, un lien sera fait entre l'essai triaxial et la mesure des vitesses des ondes de cisaillement en laboratoire. Une méthode innovatrice, développée à l'Université de Sherbrooke, sera appliquée pour la première fois à des résidus miniers. Ce projet regroupe donc plusieurs domaines de recherche, soit la résistance au cisaillement des résidus miniers, le développement de nouvelles méthodes de laboratoire relatives aux essais triaxiaux, ainsi que l'utilisation des ondes de cisaillement.

1.2 Définition du projet de recherche

1.2.1 Intérêt scientifique

La conception d'un parc à résidus miniers est un projet d'envergure. L'une des premières étapes consiste à effectuer des essais de laboratoire afin de déterminer les caractéristiques géotechniques du matériau, telles que la granulométrie, la densité relative, la perméabilité, la consolidation et la résistance au cisaillement. Pour connaître celle-ci, il est courant d'effectuer des essais triaxiaux afin de déterminer certains paramètres à grande déformation, tels que l'angle de friction, la cohésion et le module élastique. D'autres types d'essais, comme la mesure des vitesses de cisaillement, peuvent permettre d'obtenir certains paramètres à petite déformation, comme le module de cisaillement (G_{max}).

Lors des étapes subséquentes de construction et d'opération du parc, des informations sont souvent requises sur l'état du matériau en place. À ce titre, la mesure des vitesses de cisaillement est une technique intéressante, car simple et non-destructive. Par contre, avant de pouvoir utiliser cette méthode sur le terrain pour obtenir, par exemple, la densité du matériau en place, la vitesse des ondes de cisaillement doit être mesurée au laboratoire. Un des objectifs de ce projet est de démontrer qu'il est possible de le faire avec ce type de matériau.

De plus, certains paramètres à grande déformation seront comparés aux G_{max} , dans le but éventuel d'établir des corrélations entre ces deux domaines. À terme, ceci permettrait d'obtenir directement une grande quantité d'informations sur le terrain, par des méthodes non-destructives.

Finalement, un autre axe qui sera abordé est l'importance de la mise en place de ce type de résidus lors d'un essai triaxial. En effet, les échantillons triaxiaux sont généralement construits par compactage, ce qui est plus ou moins représentatif des conditions de terrains pour les résidus miniers. Ceux-ci sont généralement déposés hydrauliquement à des teneurs en eau beaucoup plus élevées que ce qui est fait en laboratoire. Il a été démontré que le type de mise en place affecte le comportement en cisaillement des sables [7, 31]. Il sera intéressant de voir si la même chose se produit pour le matériau à l'étude.

1.2.2 Définition du projet

Au niveau académique, ce projet se veut avant tout une étude de laboratoire du comportement en cisaillement de résidus miniers épaissis. En ce sens, plusieurs essais triaxiaux ont été réalisés pour être ensuite comparés aux résultats provenant des mesures de vitesse des ondes de cisaillement. Ces comparaisons ont été faites par le biais d'un paramètre important, soit le module de cisaillement (G). Par ailleurs, les essais triaxiaux ont été modélisés afin de les valider. Finalement l'effet de la méthode de mise en place des échantillons triaxiaux a été considéré, tant au niveau de la résistance au cisaillement que du comportement volumétrique lors de celui-ci.

1.3 Objectifs du projet de recherche

Ce projet de recherche comporte plusieurs objectifs. Les voici résumés, ainsi que les résultats escomptés lorsqu'applicable.

1.3.1 Objectifs principaux

1.3.1.1 Mise en marche de l'appareil triaxial ELDYN

Cet appareil, de marque GDS, a nouvellement été acheté par le laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke. Il doit donc être mis en marche et calibré avant de pouvoir être utilisé de façon routinière. De plus des protocoles doivent être écrits concernant son utilisation, et le personnel de laboratoire doit être formé à celle-ci. Finalement, son bon fonctionnement doit être validé. Pour ce faire, certains essais effectués dans le cadre de ce projet seront comparés à des essais similaires effectués dans un autre laboratoire.

1.3.1.2 Effet de la méthode de mise en place lors d'essais triaxiaux

Deux méthodes de mise en place, la compactage humide et la déposition hydraulique, seront comparées pour des essais triaxiaux drainés et non-drainés. Si le comportement des résidus à l'étude est similaire à ce qui est présent dans la littérature sur les sables, la déposition hydraulique devrait favoriser la dilatance des échantillons lors du cisaillement. Par ailleurs, une méthode de mise en place devra être développée pour le matériau à l'étude.

1.3.1.3 Application du modèle hyperbolique aux résidus miniers

Le modèle hyperbolique de Duncan et Chang sera utilisé pour modéliser un cisaillement triaxial drainé sur le matériau à l'étude. Ce modèle ayant tout d'abord été développé pour les argiles, il sera intéressant de voir s'il s'applique bien ici. Par ailleurs, il sera utilisé aussi bien pour les essais ayant été mis en place par compactage humide que par déposition hydraulique. Il est raisonnable de croire que ce modèle pourra être appliqué ici, puisqu'il a déjà été appliqué à des sols granulaires de façon réussie [37].

1.3.1.4 Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur des résidus miniers

La méthode de mesure des vitesses de cisaillement par anneaux piézoélectriques sera appliquée au matériau à l'étude. Bien qu'il s'agisse d'une première, il est raisonnable de croire que cette méthode soit applicable au matériau à l'étude, puisqu'elle a déjà été appliquée avec succès sur de nombreux types de sols granulaires et sur des argiles. Néanmoins, une méthode de mise en place particulière devra être développée.

1.3.1.5 Comparaison entre les modules de cisaillement obtenus à petites et grandes déformations

Des modules de cisaillement obtenus à partir d'essais triaxiaux (grande déformation) et à partir des vitesses des ondes de cisaillement (petites déformations) seront comparés. Il est difficile de savoir si cette comparaison sera possible, puisqu'il s'agit de comparer des modules provenant de 2 appareils différents, et obtenus dans 2 domaines de déformations différents. Néanmoins, il est possible de croire qu'il existe un lien cohérent entre les deux valeurs.

1.4 Contributions originales

Comme ce projet est l'un des premiers réalisés sur les résidus miniers effectué au laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke, plusieurs aspects abordés sont encore au stade préliminaire. Néanmoins, les contributions scientifiques les plus originales sont présentées ici.

1.4.1 Développement d'une méthode de mise en place par déposition hydraulique lors d'essais triaxiaux sur des résidus miniers

Ce type de mise en place n'est pas très courant dans les laboratoires commerciaux, bien que certaines méthodes soient décrites dans la littérature [14] [13] [25]. L'utilisation d'une telle méthode sera une première à l'Université de Sherbrooke.

1.4.2 Application de la mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement par anneaux piézoélectriques à des résidus miniers

La mesure de vitesses des ondes de cisaillement (V_s) par anneaux piézoélectriques a été développée à l'Université de Sherbrooke et a déjà été appliquée avec succès sur de

nombreux sols granulaires et cohérents. Néanmoins, elle n'a jamais été utilisée sur des résidus miniers. Par ailleurs, des mesures de V_s en laboratoire demeurent peu documentées dans la littérature pour ce type de matériau.

1.4.3 Comparaison des modules élastiques par l'essai triaxial et la mesure des vitesses de cisaillement

Finalement, la comparaison entre des modules de cisaillement obtenus lors d'essais triaxiaux et lors de mesures de V_s est également plutôt rare dans la littérature. Ce type de comparaison pourrait éventuellement permettre d'obtenir des paramètres à grandes déformations lors de mesures de V_s non-intrusives effectuées sur le terrain.

1.5 Plan du document

Ce document est divisé en 6 chapitres et 4 annexes, dans le but de faciliter la lecture et la recherche d'information.

Le premier chapitre, nommé *Introduction*, présente ce projet dans son contexte scientifique, social et économique. Par ailleurs, les objectifs principaux et les contributions originales sont abordées.

Le deuxième chapitre s'intitule *Revue de littérature sur le comportement en cisaillement statique des résidus miniers épaissis*. Le matériau à l'étude est tout d'abord décrit, puis une revue de littérature sur la résistance au cisaillement de ce type de matériau est présentée. Plusieurs aspects sont abordés, tels que les essais de laboratoire, certains modèles de comportement, l'aspect volumétrique lors du cisaillement, et l'effet de certains paramètres sur l'essai triaxial. Ce chapitre est rédigé de façon à servir de cadre d'analyse pour la suite du projet.

Le troisième chapitre, appelé *Méthodologie*, aborde les aspects plus techniques de ce projet. Les appareils de laboratoires utilisés sont présentés, ainsi que les modifications apportées le cas échéant. Viennent ensuite les méthodes de travail, qui sont divisées entre normes et méthodes originales. Ces dernières sont présentées de façon à servir de protocole pour une réutilisation future.

Le chapitre 4, *Résultats*, présente les résultats des essais de laboratoire et des simulations numériques. Les résultats des essais triaxiaux drainés et non-drainés sont présentés et comparés à ceux provenant d'essais similaires effectués dans un autre laboratoire. Ceci permet de valider le bon fonctionnement de l'appareil triaxial. Par la suite, les résultats d'essais mis en place par déposition hydraulique sont présentés afin d'évaluer l'impact de la méthode de mise en place. Les résultats des essais drainés sont ensuite comparés aux résultats obtenus selon le modèle de Duncan et Chang. Finalement, les résultats des mesures

de vitesse des ondes de cisaillement sont présentés et comparés à certains paramètres provenant des essais triaxiaux.

Le chapitre 5 se nomme *Analyse et interprétation des résultats*. Des liens sont établis entre plusieurs résultats présentés au chapitre précédent, notamment au niveau de la détermination de la résistance au cisaillement des résidus à l'étude, et de l'effet du type de mise en place des échantillons triaxiaux. Finalement une discussion sur certaines considérations pratiques abordées dans le cadre de ce projet est présentée. Puisque le chapitre 4 contient une certaine part d'analyse, le chapitre 5 se veut plutôt une réflexion sur les résultats obtenus dans le cadre de ce projet.

Le chapitre 6, nommé *Conclusion* présente un sommaire des travaux réalisés dans le cadre de ce projet, avec un retour sur les objectifs énoncés dans le chapitre 1. Les contributions originales sont résumées, et les travaux futurs sont abordés. Finalement, les annexes 1 à 4 contiennent des figures et tableaux complémentaires à ceux présentés dans le texte.

2 Revue de littérature sur le comportement en cisaillement statique des résidus miniers épaissis

Les déformations subies par les sols peuvent généralement être réparties en 2 catégories : le tassement et le comportement en cisaillement. Les études de tassement sont essentielles pour déterminer, entre autres, la séquence de rehaussement dans un parc à résidus. D'un autre côté, une bonne compréhension du comportement en cisaillement est essentielle lorsque vient le temps d'évaluer la stabilité d'une digue ou d'un dépôt de résidus. Ce projet de recherche est orienté vers l'étude de ce deuxième type de déformations.

Cette section présente un survol de la littérature concernant le comportement en cisaillement des résidus miniers épaissis. Tout d'abord, le matériau à l'étude est rapidement décrit à la section 2.1. Par la suite, les essais servant à déterminer sa résistance au cisaillement sont présentés à la section 2.2. Ensuite, le comportement en cisaillement statique est abordé de façon plus théorique aux sections 2.3 et 2.4. Finalement, certains paramètres d'influence sont présentés pour l'essai triaxial à la section 2.5.

2.1 Description du matériau à l'étude

Le matériau à l'étude est un résidu minier provenant d'une mine d'or canadienne, dont le nom ne peut être dévoilé ici pour des raisons de confidentialité. Il est pertinent de mentionner que cette mine se situe dans une zone dont le roc est très dur. Le matériau à l'étude est donc essentiellement de la poussière de roche dure.

Le matériau est arrivé au laboratoire dans des barils de 20 litres, après plusieurs heures de transport routier qui l'ont complètement remanié. À l'ouverture des barils, le résidu se présente comme un sol granulaire très fin, de granulométrie uniforme, de couleur gris foncé et contenant beaucoup d'eau. Au toucher, ce sol ne semble pas posséder de plasticité. La Figure 2.1 le présente à l'état sec.



Figure 2.1 : Le matériau à l'état sec

Une caractérisation géotechnique préliminaire, effectuée à l'Université de Sherbrooke, a permis de déterminer que le matériau à l'étude est de nature granulaire. La revue de littérature présentée ici porte donc uniquement sur les sols non-cohésifs, c'est-à-dire exempts de particules d'argile. Tel que mentionné précédemment, il s'agit d'un résidu minier épaissi, et donc mis en place à un état plus sec qu'un résidu conventionnel. Dans le parc à résidu, ce matériau sera déposé à 68% de particules solides. Le % solide est une mesure courante dans l'industrie minière, et il est relié à la teneur en eau massique (w) de la façon suivante :

$$\% \text{ solide} = 1/(1+w)*100 \quad (2.1)$$

Ainsi, pour le matériau à l'étude, la teneur en eau visée pour la déposition est de 59,5%.

2.2 Essais

Tel qu'établi, un des objectifs de ce projet est de comparer les résultats de deux types d'essais de laboratoire effectués sur le matériau à l'étude. Ces deux essais sont le triaxial et la mesure des vitesses de cisaillement. Il existe d'autres essais de cisaillement en laboratoire (cisaillement direct, cisaillement simple), néanmoins, ceux-ci ne seront pas abordés ici par soucis de concision.

2.2.1 Triaxial

De tous les essais de laboratoire visant à mesurer la résistance au cisaillement d'un sol, l'essai triaxial est l'un des plus complets. Son intérêt réside principalement dans le fait qu'il

permet un meilleur contrôle sur de nombreux paramètres, comparativement à un essai plus simple, comme le cisaillement direct. En effet, le triaxial offre la possibilité de contrôler précisément les conditions de drainage et le cheminement de contraintes lors de l'essai, ce qui permet de reproduire une plus grande variété de conditions de terrain. Comme le plan de cisaillement n'est pas imposé, il n'y a pas de rotation des contraintes lors de l'essai, et le plan de rupture est libre de se développer n'importe où dans l'échantillon [21]. Par contre, l'essai triaxial est un essai complexe, et le potentiel d'erreur lors de son exécution est plus élevé. C'est pourquoi certains auteurs proposent de prévoir, lorsque vient le temps d'établir une campagne expérimentale, qu'un essai sur dix puisse échouer [23]. Il est à noter que ce chiffre peut s'avérer plus important selon l'expérience du personnel de laboratoire, le matériau à l'étude et la fiabilité des appareils utilisés. De plus, comme tous les essais classiques de résistance au cisaillement, l'essai triaxial est effectué dans le domaine des grandes déformations, c'est-à-dire supérieures à 1×10^{-1} %. Cet aspect est développé plus en détails à la section 2.3.4.

Un aspect inhérent à la complexité de l'essai triaxial est que le moment de la rupture peut parfois devenir difficile à identifier. En effet, survient-elle au moment du déviateur maximal $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$, du rapport maximal entre les contraintes principales $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ ou lorsque l'échantillon atteint un certain pourcentage de déformation? Dans le cadre de ce projet, la rupture est généralement définie comme le moment où le rapport entre les contraintes principales est maximal. Cette condition survenant généralement pour des déformations supérieures à 10%, elle servira également à définir l'état résiduel. Il est vrai que cette condition ne correspond pas au véritable état résiduel qui survient lorsque l'échantillon se cisaille sans variations de volume ou de pression interstitielle. Néanmoins, cette approche est adoptée ici, car certains essais triaxiaux n'atteignent jamais de véritable état résiduel à l'intérieur des limites de déformation axiale permises par les appareils conventionnels. Par ailleurs, le moment où le déviateur est maximal est également intéressant, et est traité ici comme la résistance au pic.

2.2.1.1 *Types d'essais abordés*

Dans le cadre de ce projet, deux types d'essais triaxiaux sont effectués, soit l'essai consolidé-drainé (CD) et l'essai consolidé-non-drainé (CU). Dans les deux cas, l'échantillon est consolidé avant d'être cisailé, dans le but de représenter l'état d'un sol sous différentes contraintes. Ces deux essais diffèrent en fait uniquement sur les conditions de drainage lors du cisaillement. Lors d'un essai CD, l'eau interstitielle est libre d'entrer ou de sortir de l'échantillon, alors que ce drainage est empêché lors d'un essai CU. Ainsi, un échantillon saturé soumis à un chargement CD subit des changements de volume, alors que le même échantillon soumis à un chargement CU subit des changements de pression interstitielle (μ). De plus, il est à noter que ces essais ont des utilités différentes. L'essai CD sert à reproduire

des conditions de chargement lentes, aux cours desquelles les pressions interstitielles ont le temps de se relâcher. Dans le cas des résidus miniers, ceci s'applique généralement à la déposition hydraulique, à la construction par étapes de digues et aux analyses de stabilité à long terme. Les essais CU, quant à eux, sont généralement utilisés pour des conditions de construction rapide, pour les cas de chargement sismiques et pour les analyses de stabilité à court terme.

Typiquement, les essais CU sont réalisés à des vitesses de chargement plus rapides que les essais CD. En effet, lors d'essais drainés, l'eau doit pouvoir s'écouler librement sans générer de pressions interstitielles dans l'échantillon. L'essai CD peut durer plusieurs jours pour un matériau peu perméable, alors que l'essai CU prend généralement quelques heures. Par ailleurs, l'essai non-drainé sert à représenter le comportement d'un sol à court terme, alors que l'essai drainé s'applique au long terme [42].

Le Tableau 2.1 présente des résultats d'essais CU sur des résidus miniers, provenant de la littérature. L'angle de friction effectif (φ'), ainsi que la cohésion effective (c') sont indiqués, tout comme les contraintes de confinement lors des essais, et la provenance des résidus. Tous ces résultats concernent des résidus de roche dure. En termes d'angle de friction, les valeurs obtenues varient entre 30,3 degrés et 37,9 degrés, pour une moyenne de 34,7 degrés. La cohésion est nulle dans tous les cas. Le fait de présenter des paramètres en contraintes effectives signifie que l'effet de la pression interstitielle est retranché, ce qui est normalement le cas pour des essais CU. Les résultats obtenus par Golder et Associés sur des résidus similaires sont inclus à titre de référence.

Tableau 2.1 : Résultats d'essais CU sur des résidus miniers

Source	φ' (degrés)	c' (kPa)	σ'_c (kPa)	Matériau
Chang 2011 [13]	30,3 à 34,3	0	200; 400	Résidus d'or, Afrique du Sud
Contrera 2013 [14]	36,8	0	55 à 700	Résidus d'or, même région
Lara 1999 [27]	34 à 37	0	?	Résidus de cuivre, Chili
Qiu 2001 [36]	33	0	25; 50; 100	Résidus d'or, Canada
Qiu 2001 [36]	34	0	25; 50; 100	Résidus de cuivre, États-Unis
Golder et Ass. [19]	37,9	0	125; 250; 500	Mêmes résidus, un peu plus grossiers

Le Tableau 2.2 présente des résultats d'essais CD provenant de la littérature, encore une fois sur des résidus de roche dure. Cette fois-ci l'angle de friction effectif varie entre 30 et 42 degrés, pour une moyenne de 35,3 degrés. La cohésion varie entre 0 et 12 kPa. De façon générale, il faut s'attendre à ce qu'un échantillon contractant présente un angle de friction effectif plus grand dans un essai CD que dans un essai CU. Un échantillon dilatant présente au contraire une résistance supérieure lors d'un essai CU [21].

Tableau 2.2 : Résultats d'essais CD sur des résidus miniers

Source	φ' (degrés)	c' (kPa)	σ'_c (kPa)	Matériau
Bussière 2007 [9]	30 à 42	0	?	Résidus de roche dure
Golder et Ass. [19]	33,9	12	125; 250; 500	Mêmes résidus, un peu plus grossiers

Finalement, il est à noter que pour tous les essais triaxiaux effectués dans le cadre de ce projet, les changements de volume sont enregistrés lors de la phase de consolidation. Ceci permet d'obtenir de l'information sur le comportement volumétrique des échantillons en conditions de consolidation isotrope, c'est-à-dire lorsque les contraintes principales sont équivalentes. Un comportement parabolique est rapporté dans la littérature pour ce genre de chargement [37]. Ces changements de volume sont présentés sous forme de déformation volumétrique :

$$\varepsilon_v = (v_f - v_i) / v_i * 100 \quad (2.2)$$

L'équation (2.2) exprime le pourcentage de déformation volumétrique (ε_v) en fonction du volume initial (v_i) et du volume final (v_f). La convention de signe adoptée ici est qu'une diminution de volume de l'échantillon est exprimée par une déformation volumétrique négative. De façon similaire, la déformation axiale est calculée de la façon suivante :

$$\varepsilon_a = (l_i - l_f) / l_i * 100 \quad (2.3)$$

L'équation (2.3) exprime le pourcentage de déformation axiale (ε_a) en fonction de la longueur initiale (l_i) et de la longueur finale (l_f). La convention de signe adoptée ici exprime la compression axiale comme une déformation axiale positive.

2.2.2 La mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement

Les méthodes de caractérisation basées sur la propagation des ondes connaissent un essor important en géotechnique depuis quelques années. En effet, ces méthodes permettent d'obtenir des paramètres géotechniques importants, et ce directement sur le terrain et souvent de manière non-intrusive. De plus, elles permettent l'obtention de paramètres à très petites déformations, ce qui n'est pas usuel avec des appareils conventionnels comme le triaxial. Par contre, des mesures au laboratoire doivent tout d'abord être effectuées afin de relier des paramètres (l'indice des vides, par exemple) à la vitesse de propagation de certains types d'ondes. Ce projet s'attarde à cette phase de caractérisation au laboratoire.

Par ailleurs, lorsqu'un milieu poreux comme un sol est soumis à une sollicitation mécanique, plusieurs types d'ondes peuvent être générés. La méthode présentée ici repose sur la vitesse

de propagation des ondes de cisaillement (V_s). Par rapport à d'autres types d'ondes, comme les ondes de compression, les ondes de cisaillement se propagent uniquement à travers le squelette solide d'un sol, et non dans sa phase liquide. Ceci permet l'obtention de certains paramètres d'ingénierie fondamentaux [16].

2.2.2.1 La mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement au laboratoire

Il existe à l'heure actuelle différentes méthodes de mesure de V_s en laboratoire. Une des premières techniques qui a été développée est celle des colonnes de résonance. Lors de cet essai, un échantillon cylindrique est soumis à des contraintes de torsion cycliques dans le but d'atteindre un état de résonance. Bien qu'innovatrice, cette méthode est complexe à mettre en œuvre et difficile à interpréter. De plus, les déformations imposées sont parfois importantes, et les résultats sont sensibles au remaniement des parois de l'échantillon.

Ces inconvénients ont favorisé le développement d'autres méthodes. L'une des plus répandues est celle des bilames piézoélectriques, ou *bender-elements*. Un bilame, inséré à la base de l'échantillon, peut fléchir suite à l'application d'un potentiel électrique. Un autre bilame, placé à l'autre extrémité de l'échantillon, fonctionne de façon inverse. Il permet de transformer les déformations en signal électrique. La Figure 2.2 illustre le genre de montage requis pour effectuer de telles mesures au laboratoire.

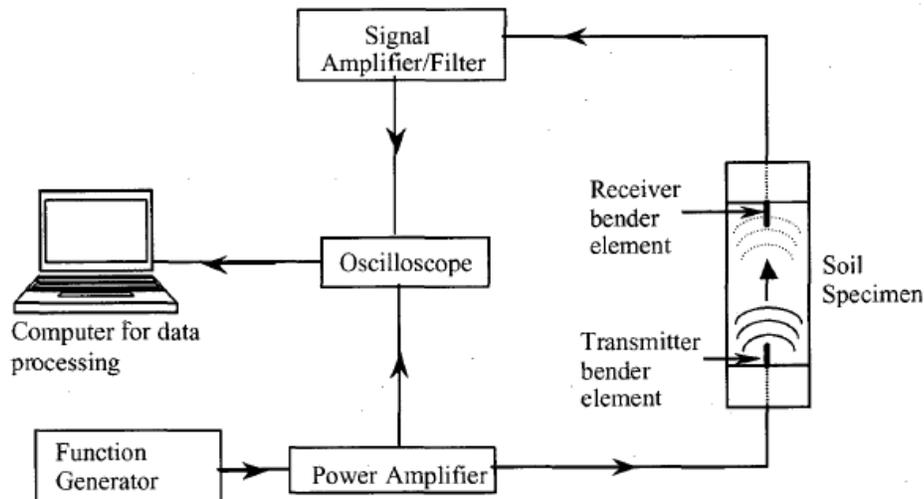


Figure 2.2: Schéma de montage pour des bilames piézoélectriques [16]

Comparativement aux colonnes de résonances, les bilames permettent un meilleur contrôle sur l'amplitude des déformations induites durant l'essai. Par contre, le bilame doit nécessairement être inséré dans l'échantillon. Outre les problèmes de remaniement qui y sont associés, cette insertion génère souvent des sollicitations mécaniques plus complexes.

Finalement, il est rapporté dans la littérature que l'interprétation des essais par bilames est souvent très complexe, ce qui se traduit parfois par des résultats incohérents [16]

Similaires aux bilames, les plaques de cisaillement présentent cependant l'avantage de ne pas pénétrer l'échantillon. En effet, celles-ci sont généralement placées à plat dans une pierre poreuse, et elles génèrent le cisaillement par friction avec l'échantillon. Une variante de cette technique utilise le même principe pour générer une torsion dans l'échantillon [38]. Bien que cette technique présente l'avantage de ne pas pénétrer l'échantillon, les problèmes d'interprétation du signal demeurent les mêmes que pour les bilames [16].

Les difficultés d'interprétation des résultats associés aux bilames et aux plaques de cisaillement restreignent l'adoption de ces techniques au niveau commercial. En effet, l'utilisateur typique de ces méthodes, qu'il soit ingénieur ou technicien en mécanique des sols, ne possède généralement pas les connaissances en traitement de signal nécessaires à une interprétation claire de ces essais. Une méthode, développée et utilisée depuis quelques années à l'Université de Sherbrooke, propose une alternative plus simple. Celle-ci se nomme *piezoelectric ring actuators technique*, et repose sur l'utilisation d'anneaux piézoélectriques. L'anneau émetteur, placé à plat dans une pierre poreuse, se contracte suite à l'émission d'un potentiel électrique. Un anneau récepteur, placé à l'autre extrémité de l'échantillon, émet un signal lorsqu'il se déforme. Ces anneaux présentent donc l'avantage de ne pas pénétrer l'échantillon, mais aussi de créer une déformation en cisaillement presque pur, ce qui simplifie l'analyse du signal. Finalement, ils sont faciles à produire, et peuvent être adaptés à plusieurs appareils géotechniques conventionnels. Cette technique s'accompagne d'une interprétation des résultats dans le domaine fréquentiel, ce qui améliore beaucoup la fiabilité de ceux-ci [16]. La Figure 2.3 illustre un anneau piézoélectrique.

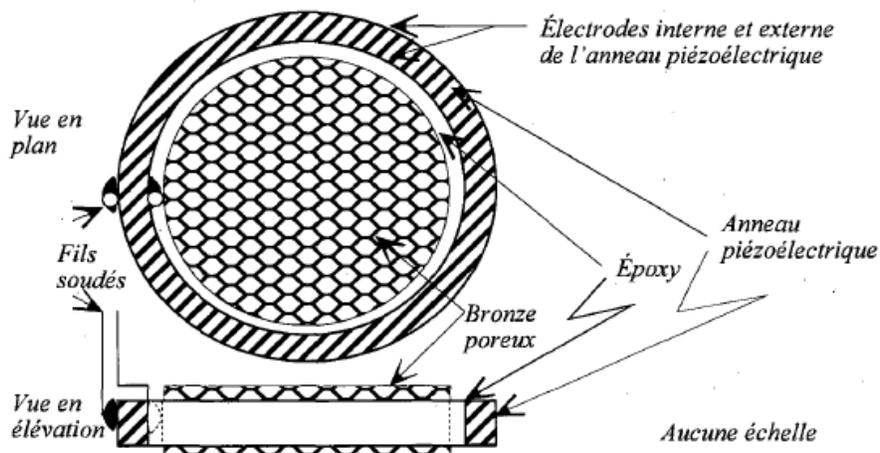


Figure 2.3 : Schéma de l'assemblage d'un anneau piézoélectrique [16]

2.2.2.2 Vitesses des ondes de cisaillement sur des résidus miniers

Le Tableau 2.3 contient des mesures de vitesses de cisaillement normalisées provenant de la littérature. Il est à noter que peu de résultats existent pour ce genre de mesures sur des résidus miniers. Néanmoins, les valeurs rapportées de V_{s1} varient entre 114 et 151 m/s pour des résidus de fer et entre 125 et 150 m/s pour des résidus d'or. Ces valeurs n'ont pas été obtenues par la méthode des anneaux piézoélectriques, néanmoins, elles sont présentées ici à titre de référence. Finalement, il est à noter que ces résultats concernent des résidus un peu plus grossiers que ceux étudiés dans le cadre de ce projet ($D_{60} = 0,021$ mm). Typiquement, les résidus miniers présentent des valeurs de V_{s1} situées entre celles des sables (125 m/s à 300 m/s) et des argiles (50 m/s à 60 m/s) [12].

Tableau 2.3 : V_{s1} sur des résidus miniers provenant de la littérature

Source	V_{s1} (m/s)	Méthode	Matériau	D_{50} (mm)
Baoshan 1983 [5]	114-151	In situ: Downhole, Crosshole	Résidus de fer, Chine	0.083
Chang 2005 [12]	125-150	Labo : Bender elements	Résidus d'or, Afrique du Sud	0.055

2.3 Modèles de comportement en cisaillement pour les sols granulaires saturés

Cette section présente des modèles décrivant le comportement en cisaillement des sols granulaires saturés. Ils seront utilisés lors de l'interprétation de certains essais de laboratoire. Ces modèles ont été retenus soit pour leur simplicité, soit pour leur pertinence dans le cadre de ce projet. Par ailleurs, ces modèles ont historiquement été développés dans le contexte de l'étude des sols granulaires naturels. Ils demeurent cependant applicables à des sols granulaires produits industriellement, tel que les résidus miniers.

Un sol est dit saturé lorsque les espaces entre ses grains solides sont totalement remplis d'eau. En géotechnique classique, les sols sont souvent traités comme parfaitement saturés, afin de simplifier les calculs relatifs à leur comportement.

2.3.1 Modèle des contraintes effectives de Terzaghi

La résistance au cisaillement des sols granulaires saturés est basée sur le concept de contrainte effective tel que défini par Terzaghi dans les années 30, soit [8] :

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (2.4)$$

Ce modèle décrit la contrainte effective (σ') affectant un sol en fonction de la contrainte verticale appliquée (σ) et de la pression d'eau (μ). Il s'agit d'une simplification se basant sur certaines hypothèses :

1. Le sol est homogène
2. Le sol est complètement saturé
3. L'eau et les grains sont incompressibles
4. La compression est unidimensionnelle
5. Les déformations sont relativement petites
6. La loi de Darcy s'applique
7. Les coefficients de perméabilité et de compression sont constants
8. Il existe une relation unique entre l'indice des vides et la contrainte effective

Plusieurs auteurs proposent des variantes plus complexes de l'équation de Terzaghi. Néanmoins, en tenant compte des hypothèses d'incompressibilité de l'eau et des grains solides, l'expression originale de Terzaghi demeure une approximation acceptable en géotechnique [32].

2.3.2 Enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb

Le développement du concept de contrainte effective a permis de mettre sur pied des modèles de résistance au cisaillement des sols granulaires. Le plus courant est sans contredit celui de Mohr-Coulomb, qui stipule que [39] :

$$\tau_f = \sigma (\tan\varphi) + c \quad (2.5)$$

Selon ce modèle, la résistance au cisaillement à la rupture (τ_f) est fonction de la cohésion (c), de la contrainte appliquée (σ) et de l'angle de friction propre au sol (φ). Il est à noter que les sols granulaires possèdent habituellement une cohésion nulle. De plus, ce modèle peut tenir compte des contraintes totales ou effectives.

L'enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb, tout comme l'équation de la contrainte effective de Terzaghi, est une simplification qui comporte des limites bien connues en géotechnique classique. Par exemple, il est établi que l'enveloppe de rupture pour un milieu poreux général n'est pas linéaire comme le veut la théorie de Mohr-Coulomb. Par contre, aux pressions de confinements atteintes dans un sol, cette simplification est acceptable [39]. De plus, l'enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb est souvent associée à des modèles de comportement de type élastique-parfaitement plastique. Ce genre de modèle, bien que facile d'utilisation, ne peut rendre compte certains modes de rupture complexes que l'on retrouve parfois dans les sols. La Figure 2.4 présente un essai triaxial non-drainé mal représenté par un modèle de Mohr-Coulomb. Le module élastique initial (E_i) semble correct, par contre le modèle de Mohr-Coulomb ne prédit pas la même résistance ultime et au pic.

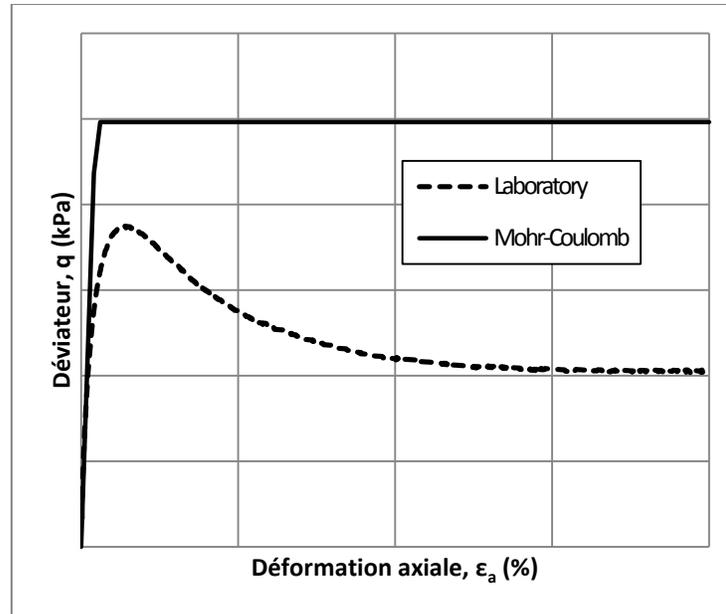


Figure 2.4 : Modèle de Mohr-Coulomb appliqué à un essai triaxial non-drainé

Il est pertinent d'ajouter que pour des conditions de compression triaxiale, φ' est relié au rapport des contraintes dans le plan $q-p'$ (M) de la façon suivante [23] :

$$M = 6 \sin \varphi' / (3 - \sin \varphi') \quad (2.6)$$

2.3.3 Modèle de Duncan et Chang

Alors que le modèle de Mohr-Coulomb est associé à un comportement élastique-parfaitement plastique, celui développé par Duncan et Chang repose sur le principe de l'élasticité non-linéaire, qui représente mieux le comportement réel d'un sol en cisaillement [15, 21]. La Figure 2.5 compare ces deux types de modèles.

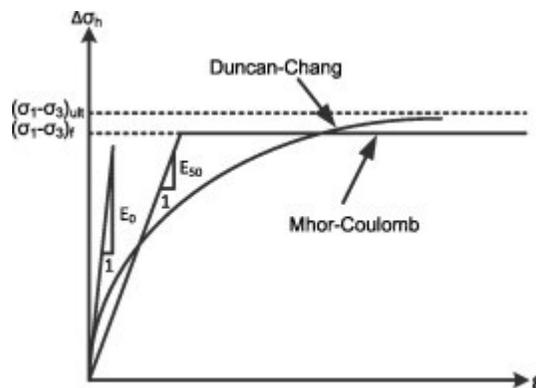


Figure 2.5 : Comparaison entre les modèles de Mohr-Coulomb et de Duncan et Chang [45]

Le modèle de Duncan et Chang a donné naissance à toute une famille de modèles dit « hyperboliques ». Parmi ceux-ci, la version de Rodriguez-Roa est intéressante, car en plus du comportement déviatoire, elle permet de rendre compte du comportement volumétrique d'un sol lors d'une compression isotrope. De façon similaire à ce qui est proposé par Duncan et Chang, le modèle de Rodriguez-Roa repose sur un module élastique (E) qui varie selon différents paramètres :

$$E = E_i \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \quad (2.7)$$

Selon l'équation (2.7), E dépend du module élastique initial (E_i), du rapport des contraintes à la rupture (R_f), des contraintes principales (σ_1 et σ_3), de l'angle de friction drainé (φ) et de la cohésion (c). Le module élastique initial provient généralement d'essais triaxiaux en laboratoire. Rodriguez-Roa propose néanmoins une fonction permettant d'extrapoler ce module pour n'importe quel niveau de confinement (σ_3) :

$$E_i = \kappa p_a \left[\frac{\sigma_3}{p_a} \right]^n \quad (2.8)$$

Dans l'équation (2.8), κ représente le multiplicateur adimensionnel du module, p_a est la pression atmosphérique, σ_3 est la pression de confinement et n est l'exposant adimensionnel du module. Pour modéliser le comportement volumétrique lors d'une compression isotrope (ou consolidation), Rodriguez-Roa se base sur un module de compressibilité variable (K_{pl}), tel que développé par Boscardin. L'expression suivante présente ce module :

$$K_{pl} = K_i \left[1 + \frac{\sigma_m}{K_i \varepsilon_u} \right]^2 \quad (2.9)$$

Selon l'équation (2.9), K_{pl} dépend du module de compressibilité initial (K_i), de la contrainte moyenne (σ_m) et de la déformation volumétrique asymptotique (ε_u) [37]. En traitant de la partie déviatoire et de la partie volumétrique de façon hyperbolique, Rodriguez-Roa fournit un portrait plus complet du comportement des sols en cisaillement que des modèles plus simples reposant sur une élasticité linéaire (voir section 2.3.2). Par contre, son modèle comporte également quelques désavantages. Premièrement, il s'agit d'un modèle plus complexe qui repose sur davantage de paramètres. Par ailleurs, ce modèle ne tient pas compte du comportement plastique de certains sols, ce qui limite son application à certains cas de rupture encore plus complexes [37]. Finalement, ce modèle n'inclut pas de couplage

hydromécanique dans la forme présentée ici, ce qui empêche son application à des cas de chargement drainés.

2.3.4 Modèles de comportement à très petites déformations

Les modèles présentés aux sections précédentes concernent le comportement mécanique des sols à grandes déformations. Il s'agit du domaine de la géotechnique classique, qui s'intéresse essentiellement à la rupture finale des ouvrages, ce qui nécessite souvent une très grande déformation du matériau. Par contre, certains cas de chargement, sismiques notamment, se produisent dans le domaine des petites, voire des très petites déformations. Mais à partir de quand peut-on parler de petites déformations? Il existe différentes approches à ce sujet dans la littérature, souvent reliées à une caractéristique géotechnique du sol, tel que sa granulométrie ou son indice de plasticité [16]. Dans le cadre de ce projet, une approche plus simple sera utilisée, basée sur le modèle de Hujeux. Les très petites déformations sont inférieures à 1×10^{-3} % de déformation en cisaillement (γ). Les grandes déformations sont supérieures à 1×10^{-1} % de déformation [22]. Une simplification sera adoptée ici, et les déformations situées entre ces deux limites seront appelées petites déformations. Tel que mentionné, ce cadre concerne les déformations en cisaillement, et donc uniquement les résultats des essais V_s . Dans le contexte de ce projet, les résultats d'essais triaxiaux seront considérés comme ayant été obtenus dans le domaine des essais conventionnels, c'est-à-dire à grandes déformations.

À ces différents domaines de déformations sont associées différentes lois de comportement pour le chargement cyclique. Hujeux propose quatre domaines de comportement pour les sols : linéaire, hystérétique stabilisé, hystérétique non-stabilisé et celui des lois incrémentales. Bien que ce cadre concerne d'abord et avant tout les chargements cycliques, l'auteur en déduit un modèle de comportement applicable aux essais triaxiaux statiques et dynamiques. Ces observations semblent donc applicables aux deux types de chargement [22]. Éthier énumère quant à lui cinq régimes : élastique linéaire, non-linéaire, grande déformation, état critique et état résiduel. Au-delà des différences de nomenclature, il apparaît dans les deux cas que le comportement à très petites déformations est élastique linéaire. Ce constat sera utilisé dans le cadre de ce projet. De plus, ces deux auteurs s'accordent pour dire qu'une fois qu'un sol se trouve dans le domaine des grandes déformations, celles-ci deviennent permanentes, et des pressions interstitielles sont générées [16, 22].

La mesure des vitesses de cisaillement s'effectuant dans les domaines des très petites déformations, elle permet l'obtention d'un paramètre particulier appelé module de cisaillement à très petites déformations (G_{max}). Pour un milieu linéaire, élastique et isotrope,

ce paramètre est relié à la vitesse des ondes de cisaillement (V_s) et à la masse volumique humide d'un sol (ρ_h) de la façon suivante [16]:

$$G_{max} = \rho_h V_s^2 \quad (2.10)$$

En dehors du domaine des très petites déformations, il est reconnu que le module de cisaillement (G) subit une dégradation. En d'autres termes, le matériau perd de la rigidité. La Figure 2.6 illustre ce phénomène, en plus de définir les domaines de déformation utilisés dans le cadre de ce projet.

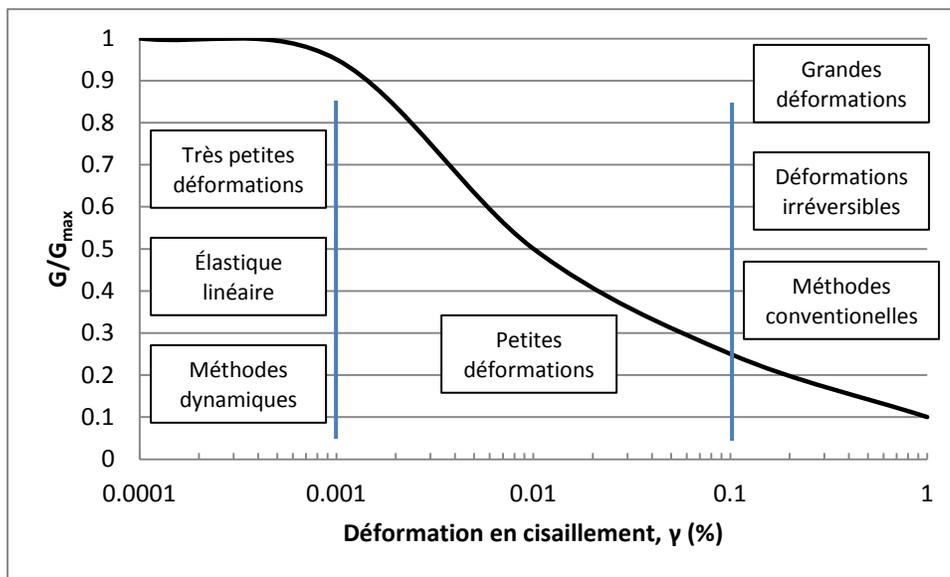


Figure 2.6 : Illustration des différents domaines de déformations, d'après [4]

La Figure 2.6 laisse par ailleurs supposer qu'il existe un lien entre le comportement à très petites déformations et celui à grandes déformations. Plusieurs auteurs se sont effectivement intéressés à ce genre de liens [16, 38]. Des lois de dégradation du G_{max} existent par ailleurs dans la littérature à ce sujet. Sans établir de loi empirique, un des objectifs de ce projet est de comparer un module de cisaillement à très petites déformations (G_{max}), obtenu par mesures de V_s , à un module de cisaillement à grande déformation (G) provenant d'essais triaxiaux.

L'établissement de courbes de G/G_{max} est utile lors d'analyses de stabilité dynamique. Il est possible d'obtenir ce type de résultats en équipant un appareil de cisaillement conventionnel (triaxial, cisaillement simple) de capteurs de V_s . Par ailleurs, il est établi que le rapport G/G_{max} est affecté par différents facteurs, tels que l'angle de friction effectif, le coefficient des terres au repos (k_o), l'indice des vides et surtout la contrainte verticale effective [16].

L'établissement de telles courbes à différents niveaux de contraintes verticales effectives en laboratoire est donc recommandé. Néanmoins, ceci dépasse le cadre de ce projet.

2.4 Comportement volumétrique lors du cisaillement des sols granulaires saturés

Un autre aspect qui est abordé dans le cadre de ce projet est le comportement volumétrique des sols granulaires lors du cisaillement. Contrairement à des matériaux comme l'acier ou le béton, les sols peuvent connaître des changements de volume importants lorsque soumis à une contrainte de cisaillement. Encore une fois, le contexte théorique présenté ici a été développé pour les sols granulaires naturels. Néanmoins, il sera considéré comme applicable aux résidus miniers.

Cette section présente les bases théoriques permettant de définir si un sol est contractant ou dilatant, en plus de relier ces notions au phénomène de liquéfaction statique. Finalement, un cadre théorique est proposé comme référence pour la suite du projet.

2.4.1 Sols contractants et sols dilatants

Un des concepts importants pour comprendre le comportement volumétrique des sols est la distinction entre un sol contractant et un sol dilatant. Casagrande, en 1936, a été le premier à décrire ce phénomène. À partir d'essais sur des sables, il en vient à la conclusion que les sables denses prennent de l'expansion lorsque soumis à une contrainte de cisaillement. À l'inverse, les sables lâches perdent du volume lorsque soumis à une contrainte similaire [10]. Tel qu'illustré à la Figure 2.7, un sol, qu'il soit dense ou lâche, va tendre vers un indice des vides critiques à grande déformation.

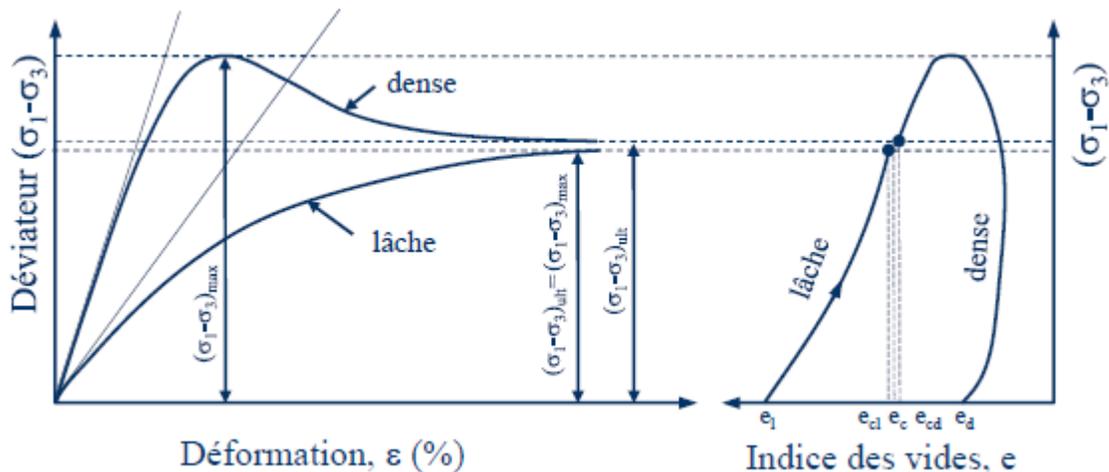


Figure 2.7 : Indice des vides critiques en cisaillement, adapté de [21]

Un échantillon drainé est dit contractant lorsqu'il diminue de volume suite à l'application d'une contrainte de cisaillement. Pour des sols saturés non-drainés, cette contraction se

traduit par une augmentation de la pression interstitielle [29]. À l'inverse, certains échantillons drainés ont tendance à prendre du volume suite à l'application d'une contrainte de cisaillement. Ces échantillons, appelés dilatants, connaissent alors une diminution de pression interstitielle en conditions non-drainées.

Il est à noter que le comportement contractant ou dilatant ne dépend pas seulement de la nature du sol, mais aussi de sa densité. En effet, les sols lâches ont plutôt tendance à se contracter, alors que les sols denses ont tendance à se dilater. De plus, il est établi que la pression de confinement appliquée sur un sol est aussi un facteur qui affecte le comportement volumétrique [44].

2.4.1.1 *Limites entre le comportement dilatant et contractant*

Suite aux travaux de Casagrande, de nombreux cadres sont proposés afin de définir si un sol se trouve dans un état dilatant ou contractant. Deux écoles de pensée sont présentées ici, soit l'école de Harvard, à laquelle appartiennent Casagrande, Castro et Poulos; et l'école de Cambridge, qui a produit, entre autres, le modèle Cam-Clay.

2.4.1.1.1 L'école de Harvard

Castro est le premier à définir une limite entre les états contractants et dilatants pour des échantillons de laboratoire soumis à des tests triaxiaux. Il appelle cette limite *steady-state line* (SSL), et avance qu'un sol se trouvant au-dessus de celle-ci est contractant, alors qu'un sol se trouvant en-dessous est dilatant. Lorsque soumis à une contrainte de cisaillement non-drainée, un sol contractant parcourt le chemin de C vers A, alors qu'un sol dilatant ira de B vers A (voir Figure 2.8).

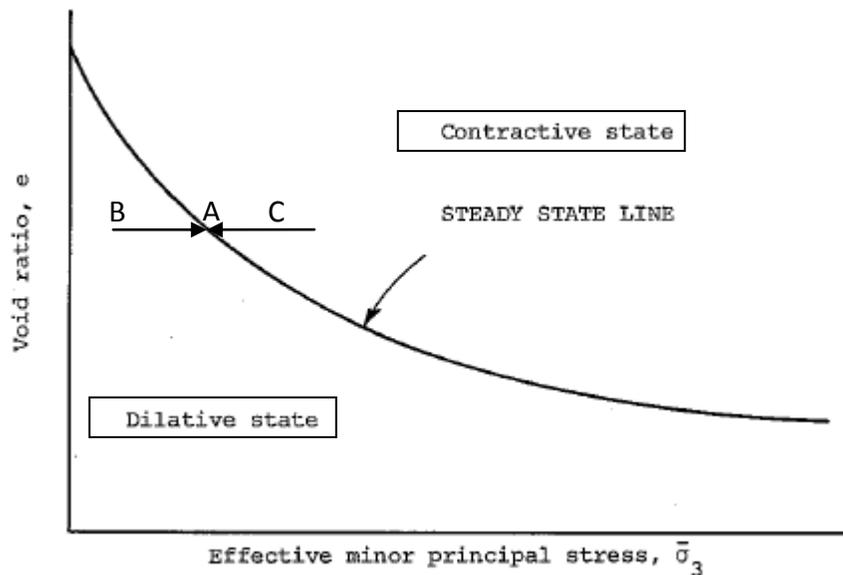


Figure 2.8: Steady-state line, adaptée de [34]

Lorsque le point A est atteint, le sol est en *steady-state*, soit un état de déformation survenant lorsqu'une masse de particules se déforme continuellement à volume constant, à contrainte effective normale constante, à contrainte de cisaillement constante et à vitesse constante. Cet état peut ressembler à l'écoulement d'un fluide. Il est à noter que la SSL est spécifique à un sol, mais indépendante de son état de contraintes, contrairement à des paramètres d'état tel que l'angle de friction [23].

2.4.1.1.2 L'école de Cambridge

L'école de Cambridge propose une limite similaire entre les états contractants et dilatants. Cette fois-ci, cette limite se nomme *critical state line* (CSL), et repose sur le principe de l'état critique, qui est atteint lorsqu'un sol continue à se déformer à contrainte et indices des vides constants [23]. Tel qu'illustré à la Figure 2.9, la CSL utilise la contrainte effective moyenne (p') en abscisse, alors que la SSL utilise plutôt la contrainte effective de confinement (σ_3). Il s'agit somme toute d'une différence mineure. Par ailleurs, la définition de la limite est identique à la précédente, c'est-à-dire qu'un sol se trouvant au-dessus de la CSL est contractant, et un sol se trouvant en-dessous est dilatant.

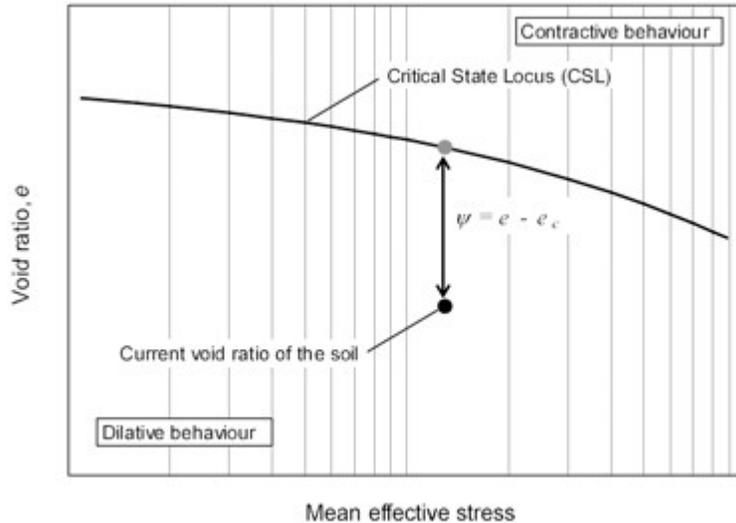


Figure 2.9: *Critical State Line* [23]

Au final, ces deux approches sont similaires, ce qui fait dire à certains auteurs que Cambridge, Massachusetts et Cambridge, Royaume-Uni ne sont pas si éloignées qu'on pourrait le croire [23]. Néanmoins, la nomenclature liée à la CSL est adoptée ici, car plus contemporaine.

2.4.2 Comportement volumétrique et liquéfaction

Tel que décrit à la section précédente, les sols granulaires saturés et lâches ont tendance à diminuer de volume lorsque soumis à une contrainte. Si le drainage est empêché, cette diminution de volume se traduit par une augmentation de la pression interstitielle. Suivant le critère de rupture de Mohr-Coulomb, ceci provoque une diminution de la résistance au cisaillement. Éventuellement, cette perte de résistance peut devenir tellement importante que le sol se comporte temporairement comme un fluide [28]. Ce phénomène est alors appelé liquéfaction statique [11].

À l'inverse, les sols granulaires saturés et denses connaissent généralement une diminution de pression interstitielle suite à l'application d'une contrainte. Toujours selon Mohr-Coulomb, ceci se traduit par une augmentation de la résistance au cisaillement. Pour cette raison, les sols saturés dilatants sont habituellement considérés comme non-liquéfiables.

2.4.2.1 Définitions des différentes formes de liquéfaction

Par ailleurs, il existe de nombreux phénomènes, rapportés dans la littérature, qui portent le nom de liquéfaction. On parle, entre autres, de « liquéfaction statique », de « liquéfaction dynamique » [11], de « mobilité cyclique » [11] et de « déformation en régime permanent » [35].

La « liquéfaction statique » survient habituellement dans les sols granulaires lâches soumis à une contrainte de cisaillement statique. Lorsqu'un sol contractant non-drainé subit un tel chargement, sa contrainte effective diminue jusqu'à atteindre un état de déformation permanente. Cette définition est similaire à la « déformation en régime permanent » de Poulos. Le phénomène de liquéfaction statique est représenté à la Figure 2.8 par le mouvement de C vers A. Le sol connaît alors une perte de résistance au cisaillement importante. Si la contrainte appliquée est plus grande que la résistance au cisaillement du sol, celui-ci s'écoule comme un fluide jusqu'à ce que la contrainte devienne inférieure à la résistance réduite [11]. Il est généralement reconnu que la liquéfaction statique survient lorsqu'un sol lâche se contracte jusqu'à atteindre son indice des vides critiques. Dans le cadre de ce projet, le terme liquéfaction est utilisé pour référer uniquement à la « liquéfaction statique ».

La « liquéfaction cyclique » survient lorsqu'un sol lâche est soumis à une contrainte de cisaillement cyclique, lors d'un séisme par exemple. Le sol est empêché de se contracter et subit une perte de résistance au cisaillement. De plus, un séisme induit généralement une contrainte de cisaillement additionnelle dans un dépôt de sol [6]. Si des déformations surviennent lors du chargement cyclique d'un sol dense, on parle de « mobilité cyclique ». La mobilité cyclique peut induire de grandes déformations dans un sol et une augmentation de la pression interstitielle, mais elle n'inclut généralement pas de perte de résistance au cisaillement [11]. Les phénomènes cycliques ne seront pas abordés dans le cadre de ce projet.

2.4.2.2 Comportement volumétrique lors du cisaillement en laboratoire

Encore aujourd'hui, de nombreux critères sont utilisés afin de déterminer le comportement volumétrique d'un échantillon lors du cisaillement. Quelques-unes de ces approches, souvent relatives à l'essai triaxial non-drainé, sont présentées ici.

2.4.2.2.1 L'école de Harvard

La première approche est celle de l'école de Harvard. De façon générale, celle-ci considère qu'une liquéfaction statique se produit lorsqu'un sol contractant atteint sa SSL suite à un cisaillement. Par contre, certains auteurs sont plus spécifiques. Youd, par exemple, en se basant sur les travaux de Castro, énonce qu'une liquéfaction statique peut avoir lieu lors d'un essai triaxial non-drainé lorsque le déviateur diminue après avoir atteint un pic. Ce type de comportement est aussi appelé *strain-softening* ou adoucissement. À la Figure 2.10, c'est le cas des essais 4-4 et 4-7, qui présentent un point d'instabilité (*I*). Youd ajoute que l'essai 4-4 subit une liquéfaction et un écoulement complet, c'est-à-dire que le déviateur continue de diminuer jusqu'à atteindre un état résiduel. L'essai 4-7 subit une liquéfaction et un écoulement partiel, qui est un adoucissement suivi d'une dilatance redonnant un caractère

solide à l'échantillon. Le début de ce phénomène correspond au point *s*, de la Figure 2.10. Finalement l'essai 4-8 ne subit ni liquéfaction ni écoulement [46].

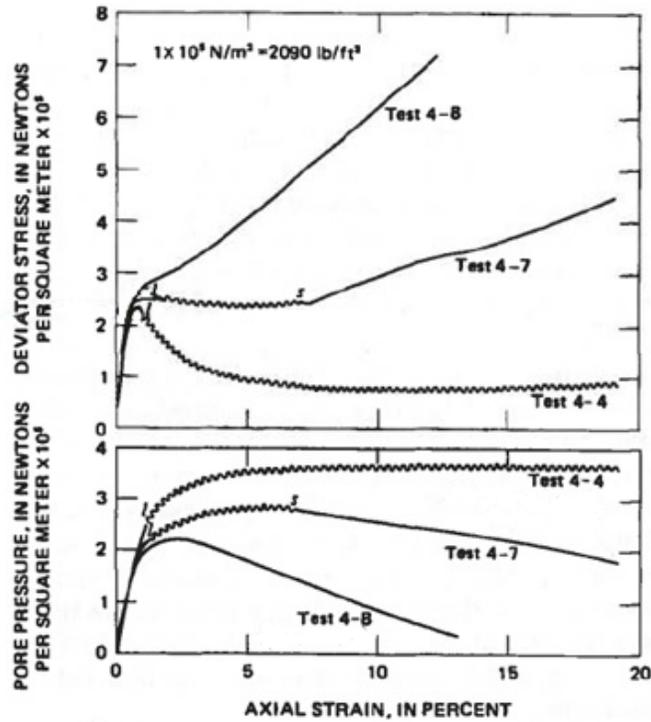


Figure 2.10: Essais triaxiaux contractants et dilatants [46]

Les cheminements de contraintes lors de ces essais sont également présentés à la Figure 2.11.

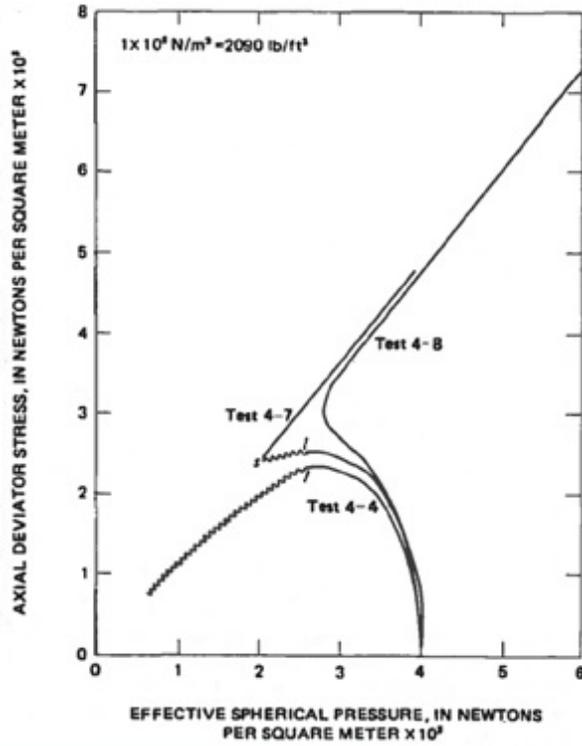


Figure 2.11 : Cheminement de contraintes pour certains essais triaxiaux [46]

Mohammad présente une analyse similaire en se basant lui aussi sur les travaux de Castro. Sa terminologie est un peu différente, alors qu’il décrit l’essai 4 de la Figure 2.12 comme contractant. Toujours à la même figure, les essais 2 et 5 sont partiellement contractants et l’essai 6 est dilatant [29].

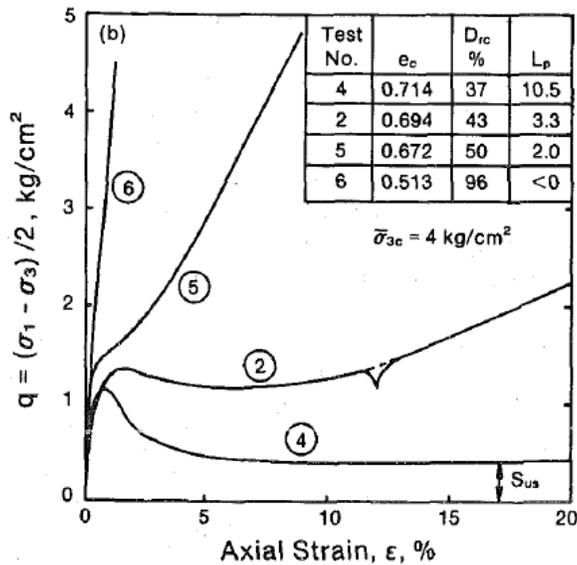


Figure 2.12 : Essais triaxiaux contractants et dilatants [29]

Un essai partiellement contractant est caractérisé par la présence d'un *elbow*, ou coude, dans le plan $p'-q$, tel qu'illustré à la Figure 2.13. Il s'agit de la principale différence entre les analyses de Mohammad et Youd, qui présente l'essai 4-8 à la Figure 2.11 comme dilatant, malgré la présence d'un coude.

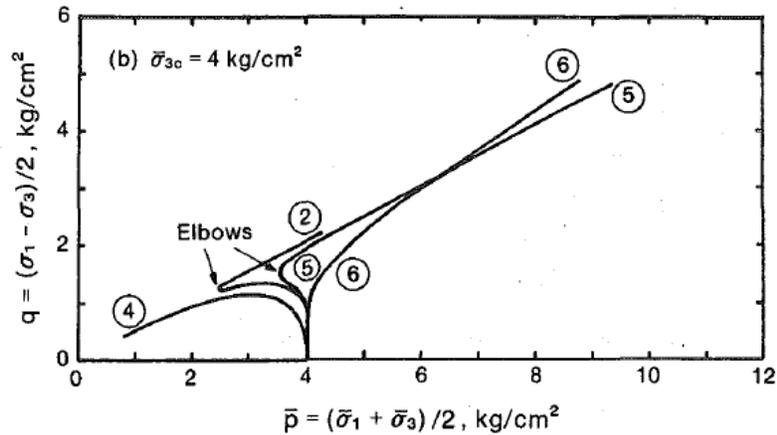


Figure 2.13 : Cheminement de contraintes pour certains triaxiaux [29]

2.4.2.2.2 L'école de Cambridge

Selon Been et Jefferies, un échantillon est contractant et liquéfiable lorsqu'il se situe au-dessus de sa CSL. À l'inverse, un échantillon est dilatant et non-liquéfiable lorsqu'il se situe en-dessous de celle-ci. Par ailleurs, les tenants de l'école de Cambridge utilisent souvent le principe du paramètre d'état (ψ) afin de quantifier l'écart par rapport à la CSL. Ce paramètre est défini comme :

$$\psi = e - e_c \quad (2.11)$$

Dans cette équation, e représente l'indice des vides actuel et e_c , l'indice des vides critiques, c'est-à-dire celui pour lequel un sol se trouve sur la CSL à une contrainte effective moyenne donnée. En théorie, un ψ positif est associé à un contractant, et un ψ négatif à un sol dilatant. Néanmoins, certains auteurs recommandent d'utiliser $\psi < -0.06$ comme limite pour un comportement clairement dilatant. Cette approche plus conservatrice vise à tenir compte de la variabilité des conditions de terrain [23].

La Figure 2.4 présente une CSL dans son cadre habituel, c'est-à-dire dans un plan reliant l'indice des vides au logarithme de la contrainte effective moyenne (p'). La ligne située à la droite de la CSL est appelée *normal consolidation line* ou NCL. Cette droite relie les états normalement consolidés d'un sol. En théorie, la CSL et la NCL sont parallèles.

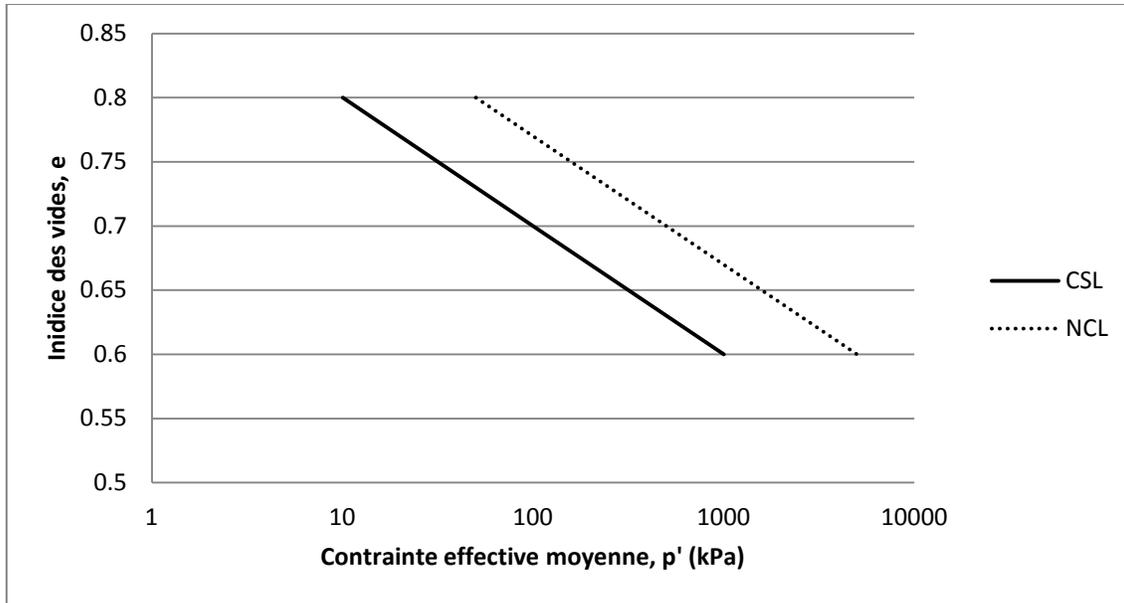


Figure 2.14 : CSL et NCL, adaptée de [21]

Mathématiquement, la CSL s'exprime de la façon suivante :

$$e_c = \Gamma - \lambda * \ln(p'_c) \quad (2.12)$$

À l'équation (2.12), l'indice des vides critiques (e_c) représente l'ensemble des points de la CSL. Il est exprimé en fonction de l'indice des vides de référence (Γ), de la pente de la CSL (λ), et du logarithme népérien de la contrainte effective moyenne critique (p'_c). L'indice des vides de référence est habituellement pris à $p' = 1\text{kPa}$ [23].

2.4.2.2.3 La ligne d'instabilité

Certains auteurs identifient une zone d'instabilité où un sol contractant commence à connaître une augmentation de pressions interstitielles, ce qui se traduit par une perte de résistance effective. Selon cette approche, un échantillon triaxial contractant est instable à partir du moment où son déviateur atteint un maximum. Il a déjà été démontré qu'à partir de cet instant, le déviateur va diminuer jusqu'à atteindre un état résiduel inférieur. Tel qu'illustré par une ligne pointillée à la Figure 2.15, la limite inférieure de la zone d'instabilité passe par l'origine et rejoint les déviateurs maximums de chaque essais, qu'ils soient contractants ou partiellement contractants. Toujours à la même figure, la limite supérieure de la zone d'instabilité est représentée par la ligne pleine qui passe aussi par l'origine et rejoint les états ultimes des différents essais. Il est à noter que cette limite supérieure correspond à l'enveloppe classique de Mohr-Coulomb [40].

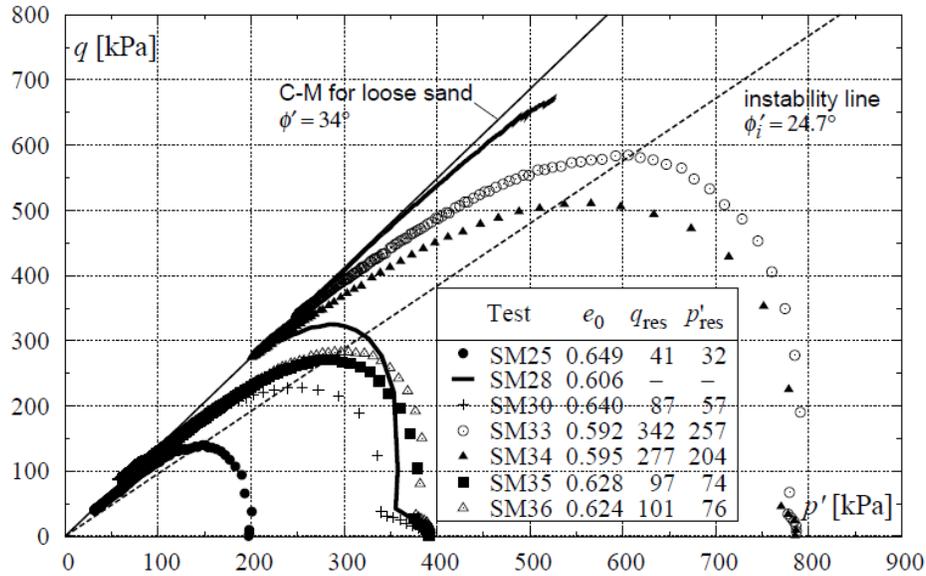


Figure 2.15: Zone d'instabilité pour des essais triaxiaux [40]

Par ailleurs, Swidzinski rapporte qu'un sol se trouve généralement en zone instable lorsque le rapport q/p' est supérieur à 1. Il est à noter que l'instabilité n'est pas une liquéfaction statique, mais bien un précurseur de celle-ci. C'est un état dans lequel un sol subit de grandes déformations même si la contrainte appliquée diminue [40].

2.4.2.2.4 L'approche de Benhamed et al.

Dans le cadre d'une étude sur l'influence de la mise en place d'essais triaxiaux, Benhamed et al. présentent eux aussi un cadre permettant d'identifier la liquéfaction statique lors d'un essai triaxial. L'essai par damage humide (DH) de la Figure 2.16 est identifié comme ayant subi une liquéfaction, car il connaît un pic de résistance à faible déformation, suivi d'un adoucissement rapide avec stabilisation du déviateur autour d'une valeur résiduelle très faible.

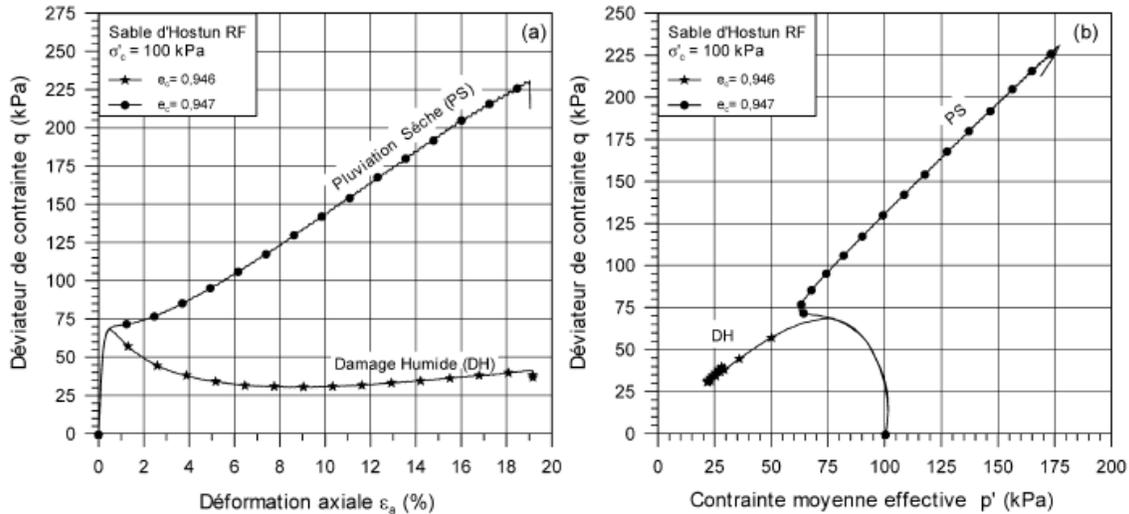


Figure 2.16: Essais triaxiaux de Benhamed et al. [7]

Cette définition de la liquéfaction ressemble donc aux postulats de l'école de Harvard, à la différence que cette dernière n'insiste pas sur le fait que la résistance résiduelle soit très faible. Toujours à la Figure 2.16, l'essai par pluviation sèche (PS) est identifié comme clairement dilatant, malgré la présence d'un coude dans le plan $q-p'$. Il s'agit là d'une différence avec la proposition de Mohammad, qui décrit plutôt ce type de comportement comme partiellement contractant. Par ailleurs, Benhamed et al. insistent sur le fait que l'échantillon PS est stable, alors que l'échantillon DH est instable. En ce sens, ils rejoignent les propos de Swidzinski sur la ligne d'instabilité. En effet, l'échantillon PS ne présente pas de pic de résistance suivi d'un adoucissement : il n'entre donc jamais dans la zone d'instabilité préalable à la liquéfaction.

Somme toutes, ces approches présentent quelques points communs. De façon générale, elles énoncent toutes que la liquéfaction statique survient lorsqu'un échantillon triaxial non-drainé connaît un pic de résistance initial, suivi d'un adoucissement et d'une stabilisation du déviateur vers un état résiduel plus faible. Par ailleurs, presque toutes considèrent qu'un échantillon qui ne présente pas ce pic initial est probablement plus stable. Mohammad est le plus sévère sur ce dernier point, lui qui considère comme dilatants les seuls échantillons qui ne présentent pas de coude dans le plan $q-p'$, ce qui est finalement le cas des échantillons très denses ou très peu confinés.

2.4.2.2.5 Cadre adopté pour le projet

Pour la suite de ce projet, un échantillon triaxial non-drainé sera considéré comme ayant subi une *liquéfaction statique* s'il présente un pic de résistance suivi d'une chute de celle-ci vers un état résiduel inférieur, comme l'échantillon « DH » à la Figure 2.16. Ce type de comportement sera également appelé *adoucissement*. Par ailleurs, un échantillon qui

présente une augmentation de résistance tout au long de l'essai, c'est-à-dire un *durcissement*, sera considéré comme *non-susceptible à la liquéfaction statique*. Il s'agit du cas de l'échantillon « PS » à la Figure 2.16. Ce cadre rassemble les idées de tous les auteurs présentés plus haut.

En ce qui concerne le comportement volumétrique lors du cisaillement non-drainé, un échantillon sera considéré comme *contractant* si les pressions interstitielles augmentent durant tout l'essai. C'est le cas de l'échantillon 4-4 à la Figure 2.10, et la littérature est claire à ce sujet. Le consensus est plus difficile pour les échantillons qui présentent une augmentation de pressions interstitielles, suivi d'une diminution de celles-ci, comme les échantillons 4-7 et 4-8, à la Figure 2.10. Un compromis sera adopté entre les positions Mohammad et de Benhamed et al., et ce type de comportement sera appelé *partiellement dilatant*. Finalement, le terme *dilatant* sera réservé aux échantillons qui subissent une baisse de pressions interstitielles durant le cisaillement, tel qu'illustré à la Figure 2.17. Dans le plan $q-p'$, ceci correspond à l'échantillon 6 de la Figure 2.13. Tel qu'énoncé plus haut, ce type de comportement est plus rare.

Pour ce qui est des essais triaxiaux en conditions drainées, un échantillon sera considéré comme *contractant* s'il subit une déformation volumétrique négative. Il sera considéré comme *partiellement dilatant* s'il subit une déformation volumétrique négative initiale, suivi d'un changement du sens de celle-ci. Finalement, il sera considéré comme *dilatant* s'il subit une déformation volumétrique positive.

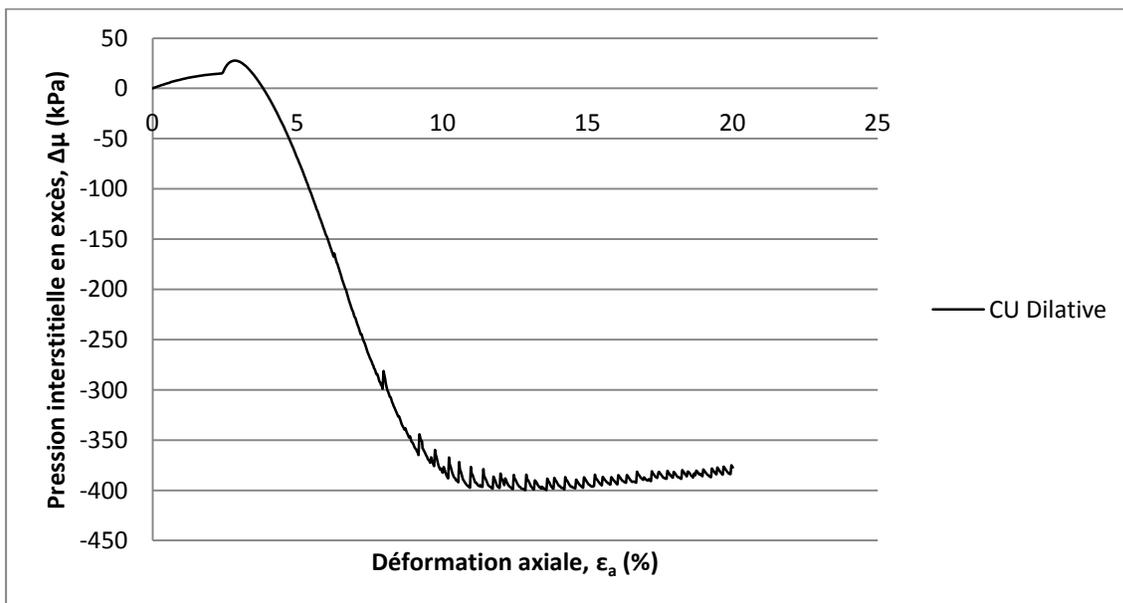


Figure 2.17 : Échantillon CU dilatant

2.5 Effet de certains paramètres sur l'essai triaxial

La dernière partie de cette revue de littérature porte sur l'effet que peuvent avoir certains paramètres de laboratoire, tel que la saturation ou la densité initiale, sur les résultats de l'essai triaxial. Ces paramètres sont présentés ici car leur influence sera discutée relativement aux résultats de certains essais effectués dans le cadre de ce projet.

2.5.1 Mesure et influence du degré de saturation

Même si cela peut paraître contradictoire, il est important de mesurer la saturation des échantillons lors d'essais triaxiaux saturés. En effet, la saturation affecte plusieurs propriétés des sols, tel que la conductivité hydraulique ou la résistance au cisaillement. De façon générale, il est reconnu qu'un sol partiellement saturé possède une meilleure résistance au cisaillement, notamment à cause de la succion qui se développe entre ses grains [33].

Le paramètre B de Skempton est fréquemment utilisé pour mesurer la pression interstitielle d'échantillons de sols au laboratoire, notamment lors de tests triaxiaux. En conditions non-drainées, le paramètre B s'exprime de la façon suivante [39]:

$$B = \Delta\mu / \Delta\sigma_3 \quad (2.13)$$

Tel que présenté à l'équation (2.13), le paramètre B est en fait le rapport entre la variation de pression interstitielle ($\Delta\mu$) et la variation de pression cellulaire ($\Delta\sigma_3$). Bien qu'il soit basé sur une mesure de pression interstitielle, le paramètre B peut servir de mesure de la saturation, et il est souvent utilisé en ce sens lors d'essais triaxiaux [2, 21]. En effet, en conditions non-drainées, si le sol est complètement saturé et que l'on considère l'eau comme incompressible, une augmentation de la pression de confinement doit se traduire par une augmentation égale de la pression interstitielle. Le paramètre B prend alors une valeur de 1. À l'inverse, une valeur inférieure à 1 indique un sol non-saturé. C'est pourquoi une valeur minimale de 0,95 pour le paramètre B est souvent visée lors de tests de laboratoire [2].

2.5.2 Effet de la densité

Une autre condition qui influence grandement les résultats triaxiaux est la densité de l'échantillon lors du cisaillement. Évidemment, un échantillon plus dense est généralement plus résistant, mais tel que démontré précédemment, la densité détermine également si un échantillon est contractant ou dilatant. Pour toutes ces raisons, certains auteurs affirment que la densité est le facteur ayant le plus d'influence sur la résistance au cisaillement des sols granulaires [21]. Malheureusement, celle-ci peut s'avérer difficile à mesurer au laboratoire [23]. C'est pourquoi une grande attention est portée à ce type de mesure dans le cadre de ce projet. Tel que démontré plus loin, l'équipement et la méthode de mise en place des échantillons jouent souvent un rôle important dans l'évaluation de ce paramètre.

2.5.3 Effet de la mise en place

Une des difficultés inhérente au travail de laboratoire sur les sols granulaires est l'utilisation d'échantillons remaniés. En effet, ces sols non-cohésifs vont généralement perdre leur structure lors de l'échantillonnage et du transport subséquent, à moins d'avoir recours à des méthodes complexes telle que la congélation. Dans la pratique, il est plus courant de reconstituer les conditions de terrain au laboratoire, par diverses méthodes de mise en place. Dans le cas du triaxial, la méthode la plus populaire est sans contredit celle du *moist-tamping* (MT) ou compactage humide. Par contre, plusieurs auteurs s'entendent pour dire que cette méthode produit une microstructure hétérogène qui affecte le comportement mécanique des échantillons [7, 13, 25]. C'est pourquoi certains proposent des méthodes de mise en place alternatives permettant de mieux répliquer la structure originale des dépôts. Celles-ci visent généralement une déposition par pluviation à sec, ou sous forme de boue. Des analyses au microscope à balayage électronique (MEB) confirment que les échantillons reconstitués par compactage possèdent une microstructure plus hétérogène, tel qu'illustré à la Figure 2.18 [7, 13]. L'image de gauche provient d'un échantillon compacté, alors que l'image de droite provient d'une pluviation à sec. La structure est plus régulière dans le dernier cas.

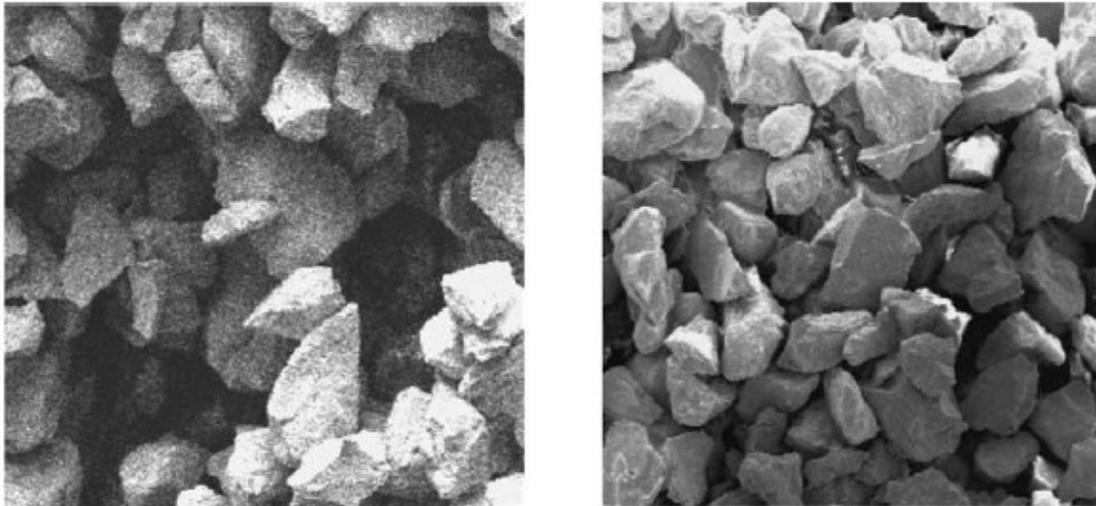


Figure 2.18 : Microstructure d'échantillons reconstitués [7]

L'impact sur le comportement en cisaillement est intéressant. En effet, plusieurs publications révèlent que la méthode de compactage favorise le comportement contractant des échantillons lors d'essais triaxiaux non-drainés, c'est-à-dire la liquéfaction statique [7, 41]. La Figure 2.16, présentée plus haut, montre clairement que l'échantillon obtenu par compactage est contractant. Un échantillon de même densité obtenu par pluviation à sec est quant à lui dilatant ou partiellement dilatant selon les définitions. Dans tous les cas, le

premier ne connaît pas de pic de résistance initial, caractéristique de la liquéfaction statique. Chang va encore plus loin, et démontre que l'angle de friction non-drainé de résidus miniers provenant d'une mine d'or est affecté par la méthode de mise en place. Tel qu'illustré à la Figure 2.19, les échantillons compactés (*moist-tamped*) possèdent un angle de friction inférieur d'environ 3% aux échantillons déposés hydrauliquement (*slurry*). Il est à noter que les échantillons mis en place par déposition hydraulique diffèrent quand même des échantillons intacts, et ce à plusieurs niveaux [13].

Table 4. Critical state parameter M and friction angles for gold tailings

	Pond		Middle beach		Upper beach	
	M	ϕ'	M	ϕ'	M	ϕ'
Undisturbed	1.69	32.7	1.73	32.9	1.61	31.2
Moist tamped	1.51	30.3	1.73	NA	1.53	30.7
Slurry	1.68	31.6	1.87	34.3	1.56	31.4
Average	1.62	31.5	1.78	33.6	1.56	31.1

Figure 2.19: Angles de frictions pour différentes méthodes de mise en place [13]

Il semble que ces constats soient encore plus pertinents dans le cas des résidus miniers, qui sont déposés hydrauliquement sur le terrain. Pour ce type de matériau, certains auteurs proposent une déposition sous forme de *slurry*, c'est-à-dire très proche de l'état de terrain [13, 14]. Suivant cette approche, une méthode de déposition hydraulique (HD) est explorée dans le cadre de ce projet.

3 Méthodologie

Ce chapitre regroupe les aspects relatifs aux méthodes de travail et aux appareils de laboratoire utilisés dans le cadre de ce projet. Tout d'abord, les hypothèses utilisées dans le cadre de ce projet sont abordées, ainsi que les méthodes de travail qui en découlent. Par la suite, viennent les appareils utilisés, soit l'appareil triaxial GDS et le dispositif de mesure des vitesses de cisaillement. De plus, les méthodes sont présentées, tant au niveau des normes que des protocoles développés à l'Université de Sherbrooke. Finalement, les méthodes de modélisation sont abordées.

3.1 Hypothèses de travail

Plusieurs hypothèses de travail sont utilisées dans le cadre de ce projet. Elles sont énumérées au Tableau 3.1, en plus des méthodes de travail qui en découlent, lorsqu'applicable.

Tableau 3.1 : Hypothèses et méthodes de travail

Numéro d'hypothèse	Hypothèse	Méthode de travail
Hypothèse 1	Les échantillons testés au laboratoire sont considérés comme complètement saturés, à moins d'indication contraire.	Cette simplification, courante en géotechnique classique, permet de considérer que les échantillons à l'étude contiennent une phase liquide et solide, mais pas de phase gazeuse.
Hypothèse 2	Les grains solides sont considérés comme incompressibles.	Encore une fois, il s'agit d'une simplification courante en géotechnique, qui permet de négliger les déformations dues à la compressibilité des grains.
Hypothèse 3	Un échantillon humide saturé dans l'appareil triaxial ne subit pas de gonflement ou d'effondrement lors de la phase de saturation.	L'indice des vides calculé lors de la mise en place est le même après la saturation.
Hypothèse 4	La consolidation isotrope dans l'appareil triaxial fournit une représentation acceptable des conditions de terrain visées. Les travaux de Garga révèlent que la liquéfaction de résidus miniers est influencée par l'anisotropie de consolidation [18]. Par contre, l'influence de la consolidation anisotrope dépasse le cadre de ce projet.	Des conditions de consolidation isotrope seront utilisées lors des essais triaxiaux.
Hypothèse 5	L'enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb est applicable pour la plage de	La forme linéaire de l'enveloppe de Mohr-Coulomb, telle que décrite à

	<p>contraintes étudiée. En effet, il est rapporté dans la littérature que pour certains matériaux très rigides soumis à de fortes contraintes, l'enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb n'est plus linéaire [39]. Pour ces matériaux comme du roc ou du béton, l'enveloppe de rupture décrite par l'équation (2.5) ne serait pas applicable. Par contre, cette équation demeure utile pour décrire la rupture de la plupart des sols [39].</p>	<p>l'équation (2.5) sera utilisée pour décrire la rupture des sols à l'étude.</p>
Hypothèse 6	<p>Le comportement déviatoire et volumétrique d'échantillons triaxiaux peut être représenté par un modèle hyperbolique. De façon similaire, le comportement volumétrique lors d'une consolidation isotrope dans l'appareil triaxial peut être représenté par le même type de modèle.</p>	<p>Un modèle hyperbolique sera utilisé afin de représenter les résultats des essais triaxiaux drainés, ainsi que les phases de consolidation isotrope effectuées dans le même appareil.</p>
Hypothèse 7	<p>Les très petites déformations sont inférieures à 1×10^{-3} % de déformation en cisaillement (γ). Les grandes déformations sont supérieures à 1×10^{-1} % de déformation, et les déformations situées entre ces deux limites seront appelées petites déformations. De plus, ces ordres de grandeur seront également appliqués aux déformations axiales.</p>	<p>Les limites des domaines de déformations seront les mêmes pour les résultats provenant du triaxial ou de la mesure des vitesses de cisaillement. Par ailleurs, tous les résultats provenant d'essais triaxiaux seront considérés comme ayant été obtenus à grande déformations.</p>
Hypothèse 8	<p>Les modèles de comportement décrits au chapitre 2, bien qu'élaborés sur des sols granulaires naturels, sont applicables aux résidus miniers.</p>	<p>Des modèles de comportement développés pour les sols granulaires naturels seront appliqués aux résidus miniers épais.</p>
Hypothèse 9	<p>La déposition hydraulique (HD) représente mieux les conditions de déposition réelles des résidus miniers à l'étude que la compactage humide (MT).</p>	<p>Les échantillons mis en place par déposition hydraulique seront considérés comme plus représentatifs des conditions de terrains que ceux mis en place par compactage humide. Idéalement, des échantillons intacts auraient fournis une base de comparaison encore plus intéressante, mais de tels échantillons ne sont pas disponibles.</p>

3.2 Appareillage et procédures d'essais

Cette section présente les différents appareils utilisés dans le cadre de ce projet, ainsi que les modifications apportées, le cas échéant.

3.2.1 Triaxial GDS ELDYN

Tous les tests triaxiaux effectués lors de ce projet le sont dans un appareil ELDYN de marque GDS (voir Figure 3.1). Cet appareil permet d'effectuer des tests triaxiaux statiques et dynamiques sur des échantillons de sols. L'appareil est également équipé d'un module permettant d'effectuer des tests statiques sur des échantillons partiellement saturés.



Figure 3.1 : Appareil triaxial GDS ELDYN

Un schéma de montage de l'appareil triaxial en mode saturé, comprenant les connexions hydrauliques et électriques est présenté à la Figure 3.2.

3.2.1.1 Difficultés rencontrées et recommandations pour les essais CD et CU

La mise en route de l'appareil triaxial utilisé pour ce projet a été marquée par certains accros qui sont résumés ici. Ce genre de difficultés est normal et fait partie du processus de mise en route.

3.2.1.1.1 Contrôle de la masse volumique initiale

Un des premiers obstacles rencontrés dans le cadre de ce projet a été d'obtenir de façon précise les masses volumiques visées lors de la mise en place par compactage humide. En effet, la masse volumique de mise en place est un facteur qui affecte grandement le comportement du sol. Afin de mieux contrôler la masse volumique initiale, un moule particulier a été développé à l'Université de Sherbrooke. Ce moule à vacuum permet une mesure plus précise des dimensions initiales de l'échantillon. L'efficacité de ce nouveau moule est démontrée à la section 3.2.1.2.1.

3.2.1.1.2 Fuite de pression cellulaire

Certains essais triaxiaux CD de la série CD MT ont présentés des comportements inhabituels au niveau de la pression cellulaire durant le cisaillement. En effet, en conditions drainées, celle-ci devrait être stable tout au long de l'essai. Plusieurs essais, surtout à fort confinement (500 kPa), ont cependant connus des variations de cette pression. La Figure 3.3 présente ce genre de comportement.

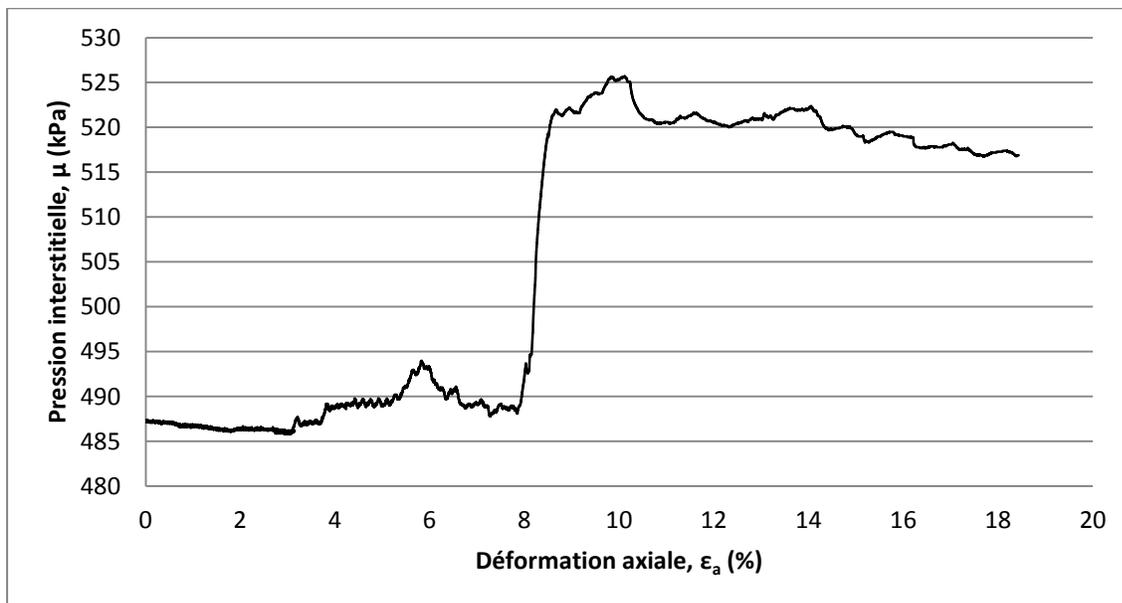


Figure 3.3 : Pression cellulaire en fonction de la déformation axiale, essai CD avec fuite

Comme le démontre la Figure 3.4, la résistance des échantillons est également affectée. En effet, le déviateur ne semble jamais atteindre d'état résiduel, même à grandes déformations.

Par opposition, les résultats rapportés à la section 4.2.1.2 présentent un déviateur qui ne varie presque plus à grandes déformations.

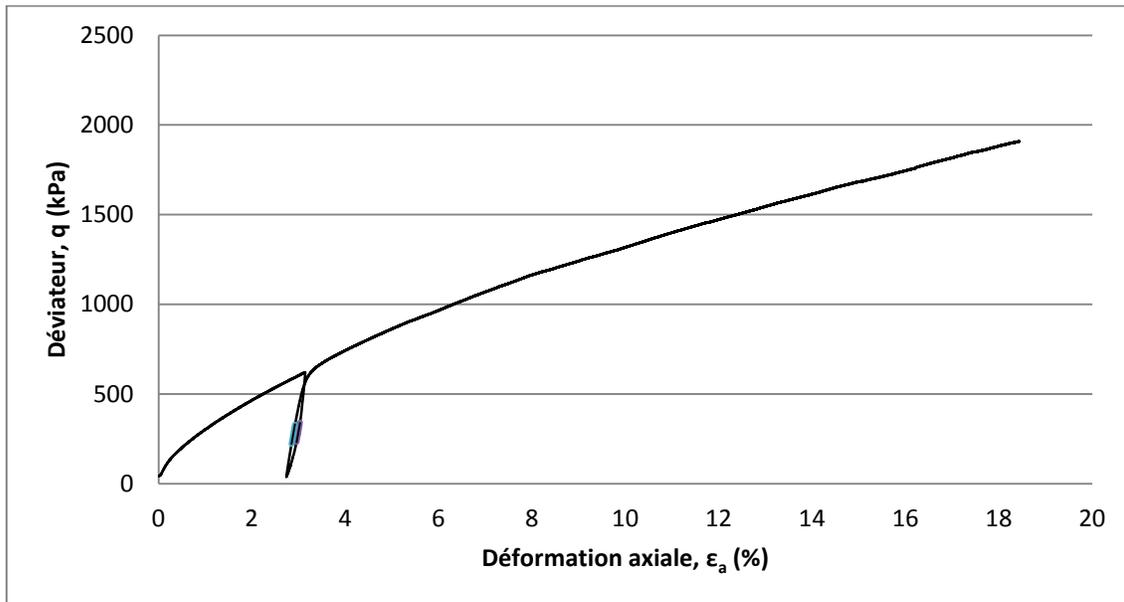


Figure 3.4 : Déviateur en fonction de la déformation axiale, essai CD avec fuite

Suite à la réparation d'un joint d'étanchéité, les essais ont été repris avec succès. Néanmoins, tel que décrit à la section 4.2.1.2.2, certains essais CD MT présentaient des irrégularités au niveau des déformations volumétriques. Celles-ci sont probablement attribuables à une fuite minimale de pression cellulaire, avant la réparation. Les essais CD HD, réalisés après la réparation du joint, ne présentaient pas ces irrégularités. Il est également possible que la mise en place par compactage favorisait le fluage lors d'essais de longue durée. Il serait pertinent de vérifier cette hypothèse en effectuant des essais CD de 14 jours sur des sables non-susceptibles au fluage. Ce dernier point dépasse cependant l'étendue de ce projet.

3.2.1.1.3 Saturation

De part sa nature très fine, le matériau à l'étude s'avère parfois difficile à saturer dans l'appareil triaxial. Lors des premiers essais, il apparaît que la procédure de saturation par contre-pression de GDSLAB n'est pas suffisante pour atteindre des valeurs du paramètre B satisfaisantes. La méthode de circulation d'eau désaérée a alors été utilisée (voir section 3.3.2.1.3), ce qui a permis d'obtenir des B de l'ordre de 0,88. Ceci fut alors jugé suffisant, bien que les normes de l'ASTM recommandent des valeurs minimales de 0,95. En effet, ces normes stipulent également que si B cesse d'augmenter suite à une hausse de la contre-pression, sa valeur maximale est probablement atteinte [2, 3]. La Figure 3.5 illustre la différence entre la circulation d'eau désaérée et la saturation par contre-pression. Dans le schéma de gauche, une pression cellulaire de 50 kPa permet de faire circuler de l'eau désaérée avec une pression de 40 kPa. Dans le schéma de droite, une pression cellulaire de

500 kPa permet d'imposer une contre-pression de 490 kPa. Dans ce dernier cas, il n'y a pas de circulation d'eau vers l'extérieur de l'échantillon.

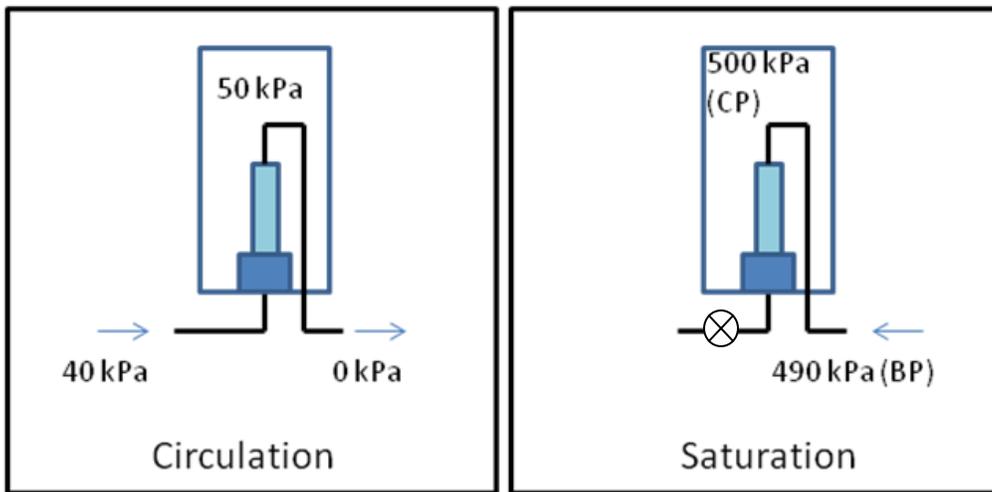


Figure 3.5 : Circulation d'eau désaérée et saturation par contre-pression

Néanmoins, diverses sources dans la littérature recommandent une saturation au CO_2 pour les sols granulaires fins [24, 33]. Cette technique, décrite à la section 3.3.2.1.4, a été utilisée lors des essais CD MT, qui ont atteint une valeur moyenne de B de l'ordre de 0,95. Il est donc recommandé d'utiliser cette procédure pour les échantillons granulaires fins mis en place par compactage humide. La saturation au CO_2 n'a toutefois pas été utilisée avec les échantillons mis en place par dépôt hydraulique, afin de ne pas altérer la microstructure propre à celle-ci.

3.2.1.1.4 Pannes électriques

Le mois de juillet 2013 a été marqué par une dizaine d'interruptions de courant à l'Université de Sherbrooke. Cette fréquence de panne est inhabituelle, et elle a retardé les essais triaxiaux en cours durant cette période. En effet, tous les modules de l'appareil ELDYN, ainsi que le PC servant à l'acquisition et au contrôle, sont branchés sur les prises ordinaires de la faculté. Une interruption de courant, même de quelques secondes, peut-être fatale à un essai triaxial. Lorsque ceux-ci durent 10 jours (essais CD), il devient primordial d'avoir une source de courant fiable.

Suite à des discussions avec le Service des immeubles, il a été établi que la meilleure façon de se protéger contre les pannes électriques est de brancher l'ELDYN sur un système d'alimentation sans interruption (ASI, ou UPS en anglais), lui-même branché sur le système de prise d'urgence de la faculté. Ces prises d'urgence, de couleur orange, sont reliées à des génératrices qui s'activent en cas de panne. Néanmoins, un délai de 30 secondes peut être nécessaire au démarrage de celles-ci. L'utilisation d'un ASI permettrait donc de maintenir les

appareils en fonction durant cet intervalle. Par la suite, les génératrices fourniraient le courant.

Selon les données de consommation électriques fournies par GDS (voir Figure A4.7, à l'Annexe 4), une puissance de 700 W est requise pour maintenir en fonction le PC, l'ELDCS, l'ELDPC et le contrôleur pneumatique. Ceci exclu le cadre triaxial (ELDYN 10kN), qui consomme à lui seul 3600 W. Néanmoins, il a été déterminé en laboratoire que le système GDS maintient les pressions nécessaires même si le cadre n'est plus alimenté. Il n'est donc pas nécessaire de brancher celui-ci sur le système d'urgence, ce qui réduit beaucoup la puissance requise. Un ASI de 1500 VA devrait donc suffire. Les appareils nommés plus haut seraient alors branchés dans l'ASI, qui serait lui-même branché sur une prise d'urgence. Ceci devrait protéger le système contre la possibilité d'une interruption de courant. Par ailleurs, il est à noter que le cadre ELDYN nécessite une tension de 220 V. Ceci devrait être pris en considération dans l'éventualité où celui-ci se verrait relié au système d'urgence.

3.2.1.2 Modifications

En cours de projet, certaines modifications sont apportées à l'appareil triaxial, au niveau de l'équipement de mise en place. Cette section les présente.

3.2.1.2.1 Moule à vacuum

Une des premières difficultés rencontrée dans le cadre de ce projet est de bien mesurer la densité initiale des échantillons triaxiaux mis en place par compactage. Il s'agit d'un paramètre important qui affecte la résistance au cisaillement. À l'origine, l'appareil triaxial de GDS est livré avec un moule fendu standard, illustré à la Figure 3.6.



Figure 3.6 : Moule fendu livré avec l'appareil ELDYN de GDS

Néanmoins, il apparaît rapidement que cette pièce d'équipement peut être améliorée. Un moule permettant une mise en place plus précise (voir Figure 3.7) est alors conçu au laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke. Puisque cet appareil utilise une pompe à vacuum afin de tendre la membrane triaxiale, il est appelé moule à vacuum. Par ailleurs, les dessins de cette pièce sont inclus à l'Annexe 4, aux Figure A4.2 et Figure A4.3.



Figure 3.7 : Moule à vacuum, développé à l'Université de Sherbrooke

Le Tableau 3.2 présente l'écart entre la masse volumique visée et la masse volumique réelle pour 5 essais mis en places à l'aide du moule fendu. Il apparaît que la moyenne des écarts s'élève à 3.3%.

Tableau 3.2 : Écarts entre les masse volumiques visées et réelles, moule fendu

Essai	ρ_{dv} (kg/m ³)	ρ_{dr} (kg/m ³)	Écart (%)
CU 125 test 4	1515	1493	1,47
CU 125 test 5	1515	1614	6,13
CU 125 test 6	1440	1412	1,98
CU 125 test 7	1550	1542	0,52
CU 125 test 9	1440	1538	6,37
Moyenne			3,30

Le Tableau 3.3 présente l'écart entre les mêmes paramètres pour 5 essais mis en place à l'aide du moule à vacuum. La moyenne des écarts est de 0.8%, ce qui est environ 4 fois mieux que ce qui est possible avec la moule fendu. Le moule à vacuum est un appareil précis qui permet un meilleur contrôle sur la masse volumique des échantillons triaxiaux. Pour cette raison, il a été utilisé lors de tous les essais mis en place par compactage.

Tableau 3.3 : Écarts entre les masses volumiques visées et réelles, moule fendu

Essai	ρ_{dv} (kg/m ³)	ρ_{dr} (kg/m ³)	écart (%)
CU 125	1500	1477	1,56
CU 250	1515	1517	0,13
CU 500	1515	1504	0,73
sat-con 3	1500	1518	1,19
air flush	1515	1508	0,46
Moyenne			0,81

3.2.1.2.2 Colonne de déposition hydraulique

Malgré les résultats satisfaisants obtenus à l'aide du moule à vacuum, une autre méthode de déposition est explorée dans le cadre de ce projet, dans le but de mieux reproduire la méthode de déposition des résidus miniers. En effet, ceux-ci sont généralement pompés vers le parc à résidus, puis déposés hydrauliquement, c'est-à-dire comme une boue qui se déverse.

Il a été démontré à la section 2.5.3 que la mise en place par compactage produit une microstructure différente de la déposition hydraulique, et que ceci peut affecter le comportement du sol. Une méthode de mise en place par déposition hydraulique a donc été développée afin d'évaluer l'effet de la mise en place sur le matériau à l'étude. Il est à noter qu'il s'agit seulement d'une première ébauche de procédure, à améliorer. Les résultats présentés à la section 4.2.1.4 soutiennent néanmoins l'hypothèse voulant que le type de mise en place puisse affecter le comportement du sol.

La Figure 3.8 illustre le montage mis au point pour la déposition hydraulique. Celui-ci se compose essentiellement d'un tube de plexiglas maintenu au-dessus du moule à vacuum par une pince de laboratoire. Le diamètre intérieur du tube est le même que celui du moule à vacuum, soit 38mm. Le tube fait environ 800 mm de haut, et des marques rouges indiquent des hauteurs de 300 mm, 600 mm et 700 mm à partir de sa base. Il est important que la jonction avec le moule à vacuum soit étanche. Pour ce faire de la graisse à vacuum est appliquée, suivie d'un ruban en téflon et de ruban électrique. La méthode de mise en place est décrite à la section 3.3.2.1.2.



Figure 3.8 : Colonne de déposition hydraulique

3.2.2 Dispositif de mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement

La méthode de mesure de vitesse de propagation des ondes de cisaillement en laboratoire, par anneaux piézo-électriques, a été développée à l'Université de Sherbrooke [16]. Celle-ci s'effectue dans un appareil oedométrique standard, fabriqué par M&L Testing (voir Figure 3.9).



Figure 3.9 : Appareil oedométrique M&L Testing utilisé pour la mesure des vitesses de cisaillement

Une cellule oedométrique modifiée, équipée d’anneaux piézo-électriques, est utilisée pour mesurer la propagation des ondes de cisaillement dans l’échantillon. Cette cellule est visible à la Figure 3.9. Par ailleurs, la Figure 3.10 présente un gros plan de la cellule, ainsi que l’emplacement des anneaux piézo-électriques.

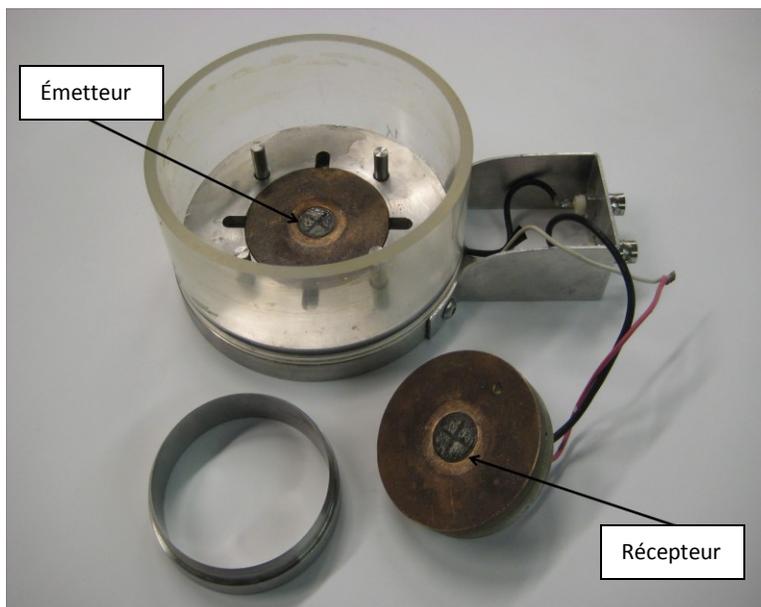


Figure 3.10 : Cellule oedométrique modifiée utilisée pour la mesure des vitesses de cisaillement, avec le chapeau, contenant l’émetteur, et la base contenant le récepteur

Finalement, le système de mesure des vitesses de cisaillement est complété par un ordinateur de type PC, un générateur de signal, un amplificateur de puissance, un amplificateur de signal et un oscilloscope. Le schéma du montage est présenté à la Figure 3.11.

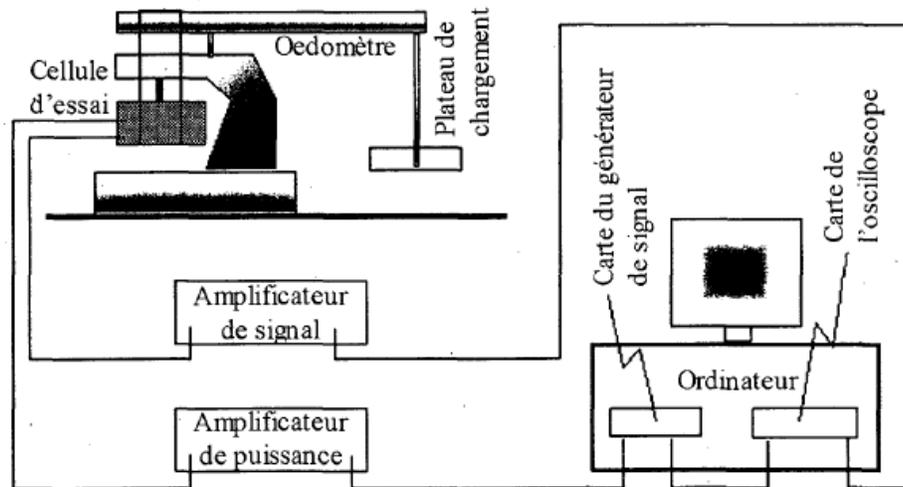


Figure 3.11 : Schéma du système des mesures de vitesses de cisaillement en laboratoire [16]

3.2.2.1 Difficultés rencontrées et recommandations

Le système présenté à la section précédente n'avait jamais été utilisé pour mesurer des vitesses de cisaillement sur des résidus miniers. Certaines difficultés ont été rencontrées, qui sont exposées ici.

3.2.2.1.1 Faible capacité portante du matériau à l'état lâche

Tel que mentionné, le matériau à l'étude sera déposé à 68% solide dans le parc à résidus. Dans le but de le saturer, et de s'approcher le plus possible des conditions de terrain, des échantillons sont mis en place à des teneurs en eau de 35% (74% solide). Dans cet état, le résidu est essentiellement une boue ayant une capacité portante presque nulle. Une fois mise en place dans la cellule oedométrique, cette boue n'est pas capable de supporter le poids (1 kPa) de la tête métallique utilisée pour la mesure des V_s (voir Figure 3.10). Celle-ci s'enfonce alors dans le matériau, rendant l'essai impraticable. La solution envisagée est d'imposer une pré-consolidation au matériau, afin de lui donner la résistance nécessaire pour supporter la tête métallique. La méthode de mise en place M1, décrite à la section 3.3.2.3.1.1 tente de répondre à cette difficulté.

3.2.2.1.2 Contrôle de la densité initiale

La difficulté majeure rencontrée lors de cette série d'essais concerne le contrôle de la densité initiale des échantillons. Tel que mentionné à la section 4.3 tous les essais effectués sur ce matériau se retrouvent dans une plage assez serrée d'indice des vides initial (entre 0,65 et

0,7), malgré des charges de pré-consolidation différentes. Ceci est alors attribué au remaniement associé à la méthode de mise en place M1. Une autre méthode (M2) est élaborée afin de minimiser ce remaniement, mais les résultats sont similaires.

Le problème est le suivant : le poids du chapeau utilisé pour les mesures de V_s empêche la mise en place à des états lâches, et nécessite un échantillon pré-consolidé. À cause de la forme de la cellule (voir Figure 3.10), les échantillons doivent être pré-consolidés dans une autre cellule, puis extraits et transférés. Ce processus implique inévitablement un certain remaniement des échantillons, ce qui fait en sorte que la densité visée est difficile à atteindre. En la modifiant, il serait possible de pré-consolider le matériau dans la même cellule qui est utilisée pour les mesures de V_s , et de réduire ainsi le remaniement. Néanmoins, des états lâches seraient toujours difficiles à atteindre, car l'échantillon doit avoir une certaine densité pour supporter le poids du chapeau. La solution envisagée consiste donc à construire une nouvelle cellule, qui serait capable de supporter le poids de celui-ci. L'échantillon pourrait alors être mis en place à des états très lâches, sans qu'une pré-consolidation soit nécessaire. Celle-ci pourrait également être effectuée directement dans la nouvelle cellule, afin d'atteindre des états plus denses. Cette cellule est décrite à la section 3.2.2.2.

3.2.2.1.3 Imprécisions dans la mesure de la densité initiale

Les problèmes décrits plus haut, reliés au contrôle de la densité initiale, sont également accompagnés d'imprécisions dans la mesure de celle-ci. En effet, les méthodes M1 et M2 s'appuient sur une mesure de la hauteur initiale de l'échantillon afin d'établir sa densité initiale. Cette hauteur est mesurée au laboratoire à l'aide d'un déflectomètre juste avant de mettre la cellule en place dans l'appareil oedométrique. Puisque l'échantillon se déforme rapidement sous le poids du chapeau, sa hauteur initiale est difficile à mesurer avec précision. Tel que rapporté à la section 4.3, il existe certaines irrégularités au niveau du comportement oedométrique des échantillons étudiés. La construction d'une nouvelle cellule devrait permettre d'améliorer la précision des mesures de la hauteur initiale.

Par ailleurs, le fait de ne pas remanier l'échantillon, et de le pré-consolider dans une seule cellule devrait réduire les risques de désaturation de celui-ci. En effet, il est possible que les irrégularités observées au laboratoire soient dues à la présence de succion dans certains échantillons.

3.2.2.2 Modifications

La cellule oedométrique utilisée lors de cette série d'essais présente quelques inconvénients, exposés plus haut. Suite à plusieurs tentatives infructueuses visant à pallier à ceux-ci, il apparaît que la meilleure solution est probablement de construire une nouvelle cellule, mieux adaptée aux sols granulaires très fins. La Figure A4.8, à l'Annexe 4, présente une

ébauche de cette cellule. L'intérêt principal de celle-ci est que le poids du chapeau servant aux mesures de V_s est retenu par un cadre, ce qui permet de mettre en place des échantillons sans pré-consolidation. Par ailleurs, un système de mesure précis de la hauteur initiale devrait être prévu. Finalement, l'ajout d'un dispositif permettant de détecter le moment où le chapeau entre en contact avec l'échantillon devrait permettre des mesures précises de la densité initiale. Un capteur de force ou de pression pourrait être utilisé en ce sens.

3.3 Méthodes

Cette section présente les normes et protocoles utilisés dans ce projet. La section 3.3.1 contient les normes de l'ASTM utilisées lors des essais triaxiaux. La section 3.3.2 contient les protocoles, développés à l'Université de Sherbrooke, relativement aux essais triaxiaux, aux modèles numériques et aux mesures de vitesses de cisaillement. Les protocoles sont utilisés en complément aux normes de l'ASTM, et viennent souvent apporter des précisions quant à certaines des méthodes relatives à ce projet.

3.3.1 Normes

Les normes utilisées dans le cadre de ce projet sont les suivantes, la norme ASTM D4767-11 pour les essais triaxiaux consolidés non-drainés, et la norme ASTM D7181-11 pour les essais triaxiaux consolidés drainés. Plus d'informations relatives à celles-ci sont disponible dans la liste des références, à la fin de ce document.

Ces normes ont été choisies, car il s'agit de références souvent utilisées dans l'industrie. Par ailleurs, elles abordent tous les aspects des essais triaxiaux, soit la mise en place de l'échantillon, la saturation, la consolidation, le cisaillement et les calculs subséquents. Certains aspects des essais triaxiaux effectués dans le cadre de ce projet ont nécessité l'élaboration de méthodes particulières. Celles-ci sont présentées à la section suivante.

3.3.2 Autres méthodes (protocoles d'essais)

Cette section présente les méthodes non-normées qui sont utilisées au niveau des essais triaxiaux, des modélisations numériques et des mesures de vitesses de cisaillement. Elles sont présentées ici afin d'éclairer le lecteur sur la façon dont ces manipulations et ces calculs sont faits.

3.3.2.1 Triaxial

Plusieurs types d'essais triaxiaux sont effectués dans le cadre de ce projet (CU MT, CD MT, CU HD, CD HD). Certaines méthodes sont développées spécifiquement pour le matériau et les appareils utilisés. Cette section les présente.

3.3.2.1.1 Mise en place par compactage humide

Ce protocole concerne la mise en place à l'aide du moule à vacuum. Cet appareil est décrit à la section 3.2.1.2.1. Il s'applique aussi bien aux essais non-drainés qu'aux essais drainés (CU MT et CD MT).

Calculs préliminaires

- Obtenir la teneur en eau (w_i) du matériau.
- Établir une masse volumique sèche visée (ρ_{dv}).
- Calculer la masse volumique visée (ρ_v).
- Calculer la masse totale visée (m_{tv}) à partir du volume du moule. Le diamètre nominal est de 0,038 m (38mm) et la hauteur nominale de 0.076 m (76mm), ce qui correspond à un volume nominal de $8,6193 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.
- Calculer la masse visée de matériau par couche (m_{vc}) en divisant m_{tv} par 6. En effet, la norme D4767-11 de l'ASTM recommande d'utiliser au moins 6 couches lors de la mise en place par compactage [2]

Préparation du moule

- Vérifier que les faces intérieures du moule contiennent une fine couche de graisse à vacuum. En appliquer si nécessaire.
- Saturer la base de la cellule triaxiale en appliquant une légère pression (50 kPa) dans ses conduites, à l'aide du contrôleur de pression (ELDPC).
- Placer une pierre poreuse saturée et un papier filtre humide sur le piédestal de la cellule triaxiale. Le papier filtre doit se situer entre la pierre poreuse et l'échantillon.
- Appliquer de la graisse à vacuum sur le pourtour du piédestal, à l'endroit qui sera en contact avec la membrane.
- Mettre la membrane en place sur le piédestal à l'aide d'un moule permettant l'aspiration. 2 joints toriques doivent être placés à la base de la membrane.
- Mettre en place le moule à vacuum autour de la membrane, sans la pincer. Visser les 4 vis de ce-dernier. Insérer 2 joints toriques autour du dessus du moule. Replier la membrane sur le dessus du moule.
- Appliquer un vacuum à l'aide d'une pompe à vide. La membrane devrait adhérer aux parois du moule.
- Mettre en place la tête du moule. Mesure la hauteur à vide (h_v). Retirer la tête.

Mise en place du matériau

- Placer la masse d'une couche de matériau (m_{vc}) dans un petit bol de céramique blanc. L'utilisation de ce type de bol permet de s'assurer que presque toute la masse pesée est effectivement mise en place.
- Noter la masse réelle par couche (m_{rc}).
- S'il y a présence de mottes, les briser avec une petite spatule de laboratoire.
- Mettre l'échantillon en place dans la membrane de caoutchouc. L'utilisation d'une petite spatule de laboratoire pour déposer l'échantillon semble un bon moyen de limiter les pertes de sol lors de cette étape.
- Compacter légèrement à l'aide d'un pilon.
- Mettre en place la tête et mesurer la hauteur de la couche. Compacter jusqu'à atteindre la hauteur visée pour chaque couche (h_{vc}). Pour 6 couches, h_{vc} est d'environ 12,7 mm, soit 76/6.
- Noter la hauteur réelle de la couche (h_{rc}).
- Retirer la tête et scarifier la couche qui vient d'être mise en place.
- Recommencer pour chaque couche.

Fin de la mise en place

- Placer un papier filtre humide et une pierre poreuse saturée sur le dessus de la dernière couche.
- Enduire le pourtour du *topcap* de graisse à vacuum et le mettre en place sur la pierre poreuse.
- Replier la membrane sur le *topcap* et mettre en place les 2 joints toriques.
- Arrêter la pompe à vide et retirer le moule à vacuum.
- Mesurer le diamètre réel (d_r) en faisant la moyenne de 3 mesures prises à différents endroits sur l'échantillon puis en soustrayant le double de l'épaisseur nominale de la membrane.
- La densité réelle (ρ_r) peut maintenant être calculée à partir des informations suivantes :
 - Masse réelle totale (m_{rt}) : c'est la somme des m_{rc}
 - Hauteur réelle totale (h_{rt}) : c'est la somme h_{rc}
 - Diamètre réel (d_r)

3.3.2.1.2 Mise en place par déposition hydraulique

Ce protocole concerne la mise en place à l'aide de la colonne de déposition hydraulique, présentée à la section 3.2.1.2.2.

Préparation du moule

- Vérifier que les faces intérieures du moule à vacuum contiennent une fine couche de graisse à vacuum. En appliquer si nécessaire.
- Saturer la base de la cellule triaxiale en appliquant une légère pression (50 kPa) dans ses conduites, à l'aide du contrôleur de pression (ELDPC).
- Forcer la lecture de pression interstitielle à 0 dans GDSLAB.
- Placer une pierre poreuse saturée et un papier filtre humide sur le piédestal de la cellule triaxiale. Le papier filtre doit se situer entre la pierre poreuse et l'échantillon.
- Appliquer de la graisse à vacuum sur le pourtour du piédestal, à l'endroit qui sera en contact avec la membrane.
- Mettre la membrane en place sur le piédestal à l'aide d'un moule permettant l'aspiration. 2 joints toriques doivent être placés à la base de la membrane.
- Mettre en place le moule à vacuum autour de la membrane, sans la pincer. Visser les 4 vis de ce dernier. Insérer 2 joints toriques autour du dessus du moule. Replier la membrane sur le dessus du moule.
- Appliquer un vacuum à l'aide d'une pompe à vide. La membrane devrait adhérer aux parois du moule.
- Mettre en place la tête du moule. Mesurer la hauteur à vide (h_v). Retirer la tête.

Préparation du matériau

- Préparer 2,5 kg de matériau à 40% de teneur en eau. Ces quantités peuvent varier en fonction du matériau à l'étude. L'utilisation du malaxeur mécanique pendant 10 minutes donne généralement un mélange homogène.
- Mesure la teneur en eau réelle du mélange.

Mise en place du matériau

- Appliquer de la graisse à vacuum sur le bord de la membrane qui sera en contact avec la colonne de déposition.
- Déposer la colonne sur le dessus du moule. Maintenir en place à l'aide d'une pince de laboratoire (voir Figure 3.8). S'assurer que la colonne soit droite à l'aide d'un niveau.
- Appliquer de la graisse à vacuum à l'interface entre la membrane et la colonne. Recouvrir ce joint de ruban de téflon. Recouvrir le tout de ruban électrique (voir Figure A4.4).
- Ouvrir la valve permettant le drainage de la base de la cellule triaxiale.
- Déposer le matériau à partir du haut de la colonne avec une cuillère et un entonnoir. Remplir la colonne jusqu'à environ 15 cm du rebord. Brasser le matériau avec une tige de plastique.
- Ajouter environ 10 cm d'eau au dessus du matériau.

- Attendre 5 minutes, puis mesurer la hauteur de matériau au-dessus de la ligne de 60 cm.
- Attendre une nuit, et mesurer la hauteur du matériau au-dessus de la ligne de 60 cm. Démouler lorsque la variation de hauteur tend vers 0. La déformation axiale peut-être calculée à partir de l'équation (2.3). Pour le matériau à l'étude, des ε_a légèrement supérieures à 11% étaient atteintes après une nuit.
- Pour une mise en place plus dense, taper à quelques reprises les bords de la colonne avec un outil. Ceci viendra densifier le matériau.

Pré-consolidation

- Fermer la valve de drainage.
- Retirer le ruban reliant la colonne de déposition au moule. Cisailer le matériau à l'aide d'une lame mince et rigide.
- Retirer la colonne en récupérant le matériau dans une tare.
- Effectuer une teneur en eau sur le matériau le plus proche du moule.
- Enlever une couche de 1 ou 2 mm dans le moule.
- Placer un papier filtre humide et une pierre poreuse saturée sur le dessus de l'échantillon.
- Placer un papier cellophane sur le dessus du moule, maintenu en place par un élastique.
- Ouvrir la valve de drainage.
- Placer 1 poids de 100 g sur le dessus de l'échantillon (voir Figure A4.5). Ajouter 100 g par 30 minutes, jusqu'à atteindre 300g. Encore une fois, cette valeur peut varier selon le matériau. L'objectif est d'annuler le remaniement qui a inévitablement eut lieu lorsque la colonne a été retirée. Par contre, il ne faut pas trop charger le matériau, car la densité du dessus de l'échantillon serait alors supérieure à l'ensemble.

Mise en place dans l'appareil triaxial

- Fermer la valve de drainage.
- Retirer les poids et le papier cellophane.
- Arrêter la pompe à vacuum.
- Placer la base de la cellule triaxiale à sa place dans la presse triaxiale.
- Saturer la conduite du *topcap* à l'aide du ELDPC.
- Appliquer de la graisse à vacuum sur les rebords du *topcap* et le mettre en place sur le dessus de l'échantillon. Placer les 2 joints toriques autour du *topcap*.
- Replacer les poids (300g) sur le dessus du *topcap* et ouvrir la valve de drainage (voir Figure A4.6).

- Attendre 5 minutes. Quelques gouttes d'eau devraient s'écouler de la valve de drainage.
- Brancher l'ELDPC à la valve de drainage et appliquer une pression de -20 kPa pendant 1 heure.
- Mesurer la hauteur entre le dessus de la pierre poreuse du haut et le rebord du moule à vacuum (h_{pp}). La hauteur totale réelle de l'échantillon (h_{rt}) correspond à 82mm plus h_{pp} , dans le cas où des pierres poreuses de 6 mm sont utilisées.
- Retire le moule à vacuum.
- Mesurer le diamètre réel (d_r) en faisant la moyenne de 3 mesures prises à différents endroits sur l'échantillon puis en soustrayant le double de l'épaisseur nominale de la membrane.
- Placer la cellule triaxiale sur sa base et la remplir d'eau désaérée.
- Fermer la valve de drainage.
- Débrancher l'ELDPC de la valve de drainage et le purger d'air.
- Brancher l'ELDPC à la valve de contre-pression.
- Appliquer une pression cellulaire de 30kPa.
- Régler l'ELDPC à 0 kPa, puis ouvrir la valve de contre-pression.
- Calculer le volume de l'échantillon à partir de h_{rt} et d_r .

Il est important d'ajouter que lors de ce type de mise en place, la masse initiale de l'échantillon est inconnue. Le calcul de la densité initiale se fait à partir de la masse sèche finale (m_{sf}) de l'échantillon, récupéré après l'essai. Si cette étape est omise, la densité initiale de l'échantillon ne pourra pas être évaluée.

3.3.2.1.3 Circulation d'eau désaérée

Cette méthode est utilisée afin de remplir les pores d'un échantillon d'eau désaérée suite à sa mise en place. L'échantillon doit donc être en place dans la cellule triaxiale et celle-ci doit être remplie d'eau désaérée et placée dans la presse triaxiale. Cette technique est utilisée lors de tous les essais réalisés dans le cadre de ce projet.

- Fermer la valve reliant le capteur de pression interstitielle à l'échantillon.
- Purger d'air l'ELDPC et le remplir d'eau désaérée.
- Brancher l'ELDPC à la valve de drainage située à l'arrière de la cellule. L'objectif est de faire circuler de l'eau du bas vers le haut de l'échantillon.
- Appliquer une pression cellulaire de 30 kPa.
- Appliquer une pression de 10 kPa avec l'ELDPC. Ouvrir la valve de drainage et la valve de contre-pression. L'eau désaérée devrait entrer par le bas de l'échantillon, remplir ses pores, puis ressortir par le *topcap* et finalement la valve de contre-pression.

- Un bol peut-être placé sous la valve de contre-pression afin de récupérer l'eau qui en sort. Ceci peut prendre plusieurs minutes.
- Augmenter la pression cellulaire à 50 kPa.
- Régler la pression de l'ELDPC à 40 kPa pour les échantillons mis en place par compactage humide. Pour les échantillons mis en place par déposition hydraulique, régler l'ELDPC à 30 kPa afin de maintenir une pression effective de 20 kPa.
- Une fois que des gouttes sortent de la valve de contre-pression, la refermer et attendre environ 20 minutes.
- Ouvrir la valve de contre-pression et attendre quelques minutes. Si l'écoulement est régulier et exempt de bulles d'air, passez à l'étape suivante. Sinon répéter l'étape précédente.
- Refermer la valve de contre-pression et noter le volume de l'ELDPC. Lorsque le changement de volume tend vers 0, passez à l'étape suivante.
- Fermer la valve de drainage arrière et débrancher l'ELDPC. Rebrancher ce dernier sur la valve de contre-pression.
- Ouvrir la valve de contre-pression et la valve reliant le capteur de pression à l'échantillon.

Normalement, la prochaine étape consiste à effectuer une saturation par contre-pression selon la procédure de GDSLAB.

3.3.2.1.4 Circulation de CO₂

La circulation de CO₂ est une technique rapportée dans la littérature qui permet de saturer plus facilement des échantillons granulaires fins [24, 33]. L'objectif est de remplacer l'air contenu dans les pores de l'échantillon par du CO₂, beaucoup plus soluble dans l'eau. L'échantillon doit être en place dans la cellule triaxiale et celle-ci doit être remplie d'eau désaérée et placée dans la presse triaxiale.

- Appliquer une contre-pression de 50 kPa.
- Brancher la bonbonne de CO₂ à la valve de drainage. L'objectif est de faire circuler du CO₂ du bas vers le haut de l'échantillon.
- Brancher un tube à la valve de contre-pression et placer l'extrémité libre de celui-ci dans l'eau.
- Régler la manodétendeur de la bonbonne de CO₂ à 6 psi, soit environ 42 kPa. Ouvrir la valve de drainage, ainsi que la valve de contre-pression.
- De bulles de gaz devrait s'échapper de l'extrémité du tube placée dans l'eau. Cette méthode permet de « voir » le CO₂.
- Faire circuler pendant 30 minutes.
- Fermer les valves et débrancher la bonbonne de CO₂.

Cette étape est normalement suivie d'une circulation d'eau désaérée telle que décrite à la section 3.3.2.1.3. Dans ce cas, maintenir la pression cellulaire à 50 kPa, et appliquer directement la contre-pression voulue (30 kPa ou 40 kPa).

3.3.2.1.5 Calibration triaxial

Cette section décrit la procédure à suivre pour récupérer les fichiers de calibration de l'appareil triaxial GDS ELDYN. En temps normal, ces fichiers sont situés sur le PC attribué à cet appareil, sous `c:\gdsrab\Calibration Files`

- Insérer le CD « back-up triaxial ».
- Ouvrir le fichier « GDSLAB », et copier le dossier « Calibration files » et les fichiers « ELDYN_ELDPC » et « ELDYN_ELDPC_HKUST » dans le fichier « GDSLAB » situé sur le `c:\`.
- Ouvrir GDSLAB, créer une station et aller dans management >>> object display >>> read.
- GDSLAB renvoie un message disant que les calibrations ont été changées. Cliquer sur Ok.
- Vérifier que les capteurs répondent de façon normale. Nul besoin d'une précision élevée, mais plutôt un ordre de grandeur. Par exemple, un capteur qui renvoie 21 kPa au lieu de 20 kPa est acceptable. Un capteur qui renvoie 50 kPa au lieu de 20 kPa n'est pas acceptable. Voici des directives afin de vérifier les différents capteurs.
 - *Load Cell* : Mettre un poids sur le capteur et vérifier la lecture à l'écran en kilo newtons ($1\text{Kn} = 1\text{kg} \cdot 9,81/1000$).
 - *Pore Pressure* : Faire un zéro à pression atmosphérique. Saturer les deux lignes à la base de la cellule. Forcer la contre-pression à zéro à pression atmosphérique. Brancher sur la valve de drainage arrière, à l'opposé de la *Pore Pressure*. Normalement, la contre-pression et la pression cellulaire devraient être égales, au kPa près.
 - *Displacement* : Tendre une ficelle juste au-dessus du piston et forcer le déplacement à zéro. Demander un déplacement du piston de 10mm (par exemple), et vérifier que celui-ci a effectivement bougé d'environ 10 mm par rapport à la ficelle.
 - *Cell Pressure* : Placer la cellule sur sa base, sans échantillon, et remplir d'environ 15 cm d'eau. Visser les vis de sûreté. Mettre le capteur de pression cellulaire à zéro à pression atmosphérique, puis le brancher sur la cellule. Imposer une pression cellulaire (ex : 20kPa). Normalement, la pression cellulaire, la contre-pression et la pression interstitielle devraient donner la même lecture.

- *Back Volume* et *Back Pressure* : La calibration des capteurs du contrôleur de pression n'est pas située dans le PC. Elle ne devrait pas être affectée en cas de problème avec ce-dernier.

Il est également possible de refaire la calibration manuellement à partir des certificats de calibration fournis pas GDS. Les informations concernant chaque capteur sont présentées à la Figure A4.1 de l'Annexe 4.

3.3.2.2 Utilisation du modèle de Duncan et Chang

Dans le cadre de ce projet, le modèle de Duncan et Chang est utilisé afin de modéliser les essais triaxiaux drainés effectués au laboratoire. Les aspects théoriques de ce modèle, incluant les équations, ont été présentés à la section 2.3.3. L'application de ce modèle dans le contexte de ce projet est détaillée à la section 4.2.2. La section en cours présente plutôt un résumé rapide des différentes étapes à effectuer lors de ce genre de modélisation.

Le modèle de Duncan et Chang fait varier le module élastique de façon hyperbolique par rapport aux déformations lors d'un cisaillement triaxial drainé, selon l'équation (2.7). Dans cette équation, le module élastique initial est obtenu par lissage des E_i provenant des essais de laboratoire. Ceux-ci correspondent à la pente initiale du déviateur en fonction de la déformation axiale lors du cisaillement drainé. La Figure 3.12 présente en bleu l'endroit où est pris le module initial lors de l'essai CD HD 125. La ligne pointillée est une prolongation de la pente de ce module, dont l'équation est incluse sur le graphique. Le lissage des E_i de laboratoire est obtenu en utilisant l'équation (2.8) et la méthode des moindres carrés. Les déformations peuvent ensuite être calculées selon la loi de Hooke.

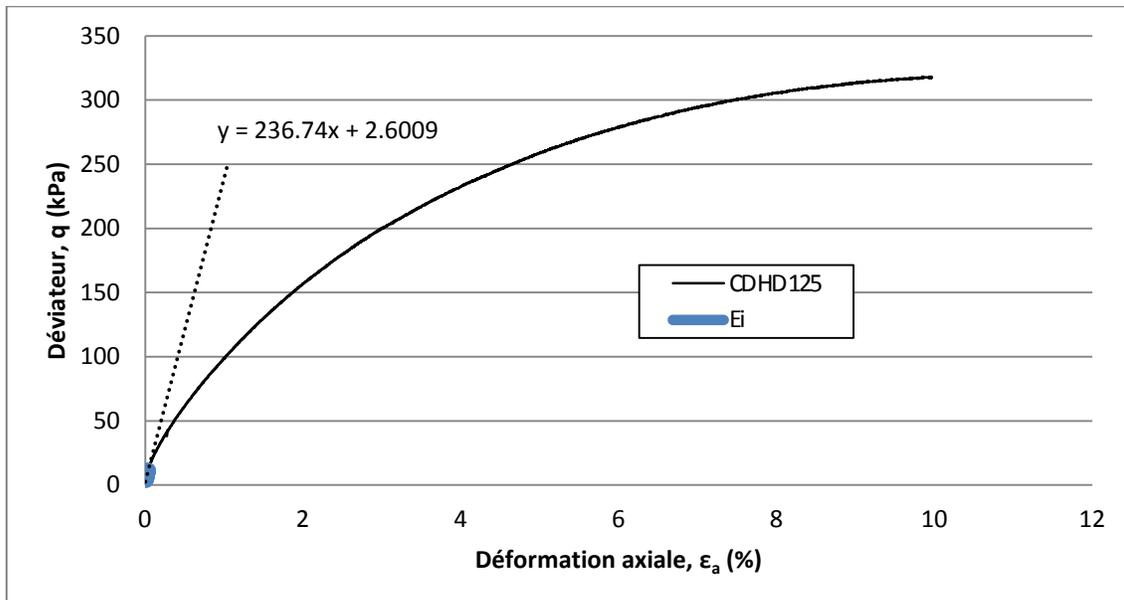


Figure 3.12 : Obtention du E_i pour un essai CD

Par la suite, des modules de compressibilité sont obtenus à partir des courbes de consolidation isotrope. Tel que présenté aux sections 4.2.1.3 et 4.2.1.6, ces courbes ont été obtenues lors des phases de consolidation de tous les essais triaxiaux effectués dans ce projet. De façon similaire à ce qui est fait pour le module élastique (E), le modèle de Duncan et Chang fait varier de façon hyperbolique le module de compressibilité initiale (K_i) en fonction de la contrainte appliquée. Cette variation est exprimée par l'équation (2.9). Les déformations sont ensuite calculées selon la loi de Hooke.

Par ailleurs, des modules de cisaillement à grandes déformations (G) sont obtenus à partir de l'équation suivante :

$$G = (3 * K_{pl} * E_i) / (9 * K_{pl} * E_i) \quad (3.1)$$

À l'équation (3.1), le module de cisaillement (G) est relié au module de compressibilité (K_{pl}) et au module élastique initial (E_i). L'utilisation du module initial, au lieu du module élastique (E), permet d'aller chercher l'information aux plus petites déformations qu'il est possible d'enregistrer avec l'appareil triaxial utilisé ici. Tous ces modules ont été calculés à des déformations axiales variant entre 0.001% et 0.01%.

Finalement, le modèle de Duncan et Chang est utilisé pour calculer les déformations volumétriques lors du cisaillement drainé. Les déformations sont calculées de la même façon que lors de la consolidation isotrope, sauf que la pression de confinement pour chaque essai est utilisée comme contrainte moyenne effective (p') de référence. Les déformations volumétriques ainsi calculées sont reliées à des déformations axiales par le biais du p' .

3.3.2.3 Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement

Cette section présente les méthodes relatives aux essais de mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement. Tout d'abord, deux méthodes de mise en place sont présentées, suivies du protocole pour la réalisation de l'essai en laboratoire. Finalement, la méthode d'analyse utilisée dans le cadre de ce projet est abordée.

3.3.2.3.1 Mise en place

Un des premiers défis rencontrés dans le cadre de la série de mesures de V_s a été d'élaborer une méthode de mise en place du matériau à l'état saturé dans la cellule oedométrique modifiée utilisée pour les mesures de V_s (Figure 3.10). Les deux méthodes présentées ici relèvent de cette nécessité.

3.3.2.3.1.1 Méthode 1 (M1)

Cette méthode a été utilisée lors des essais « td1 » et « td4 ». Elle a permis une mise en place correcte, mais elle comporte néanmoins quelques inconvénients, qui seront abordés à la fin de cette section.

Mise en place dans le moule de 4 pouces

- Saturer les pierres poreuses d'une cellule oedométrique de 100 mm de diamètre, munies d'un système de drainage à la base (voir Figure A4.11).
- Préparer un papier filtre de 100 mm de diamètre et le déposer au fond de la cellule.
- Laisser la valve de drainage ouverte.
- Préparer environ 850 g de matériau à une teneur en eau de 35%. Ceci correspond à 630 g de matériau sec et 220 g d'eau.
- Verser le matériau dans la cellule oedométrique de 100 mm.
- Attendre quelques minutes que le matériau se consolide sous son propre poids, puis ajouter une pierre poreuse sur le dessus du matériau.
- Attendre quelques minutes que le matériau se consolide sous le poids de la pierre poreuse.
- Par la suite, des poids peuvent être ajoutés sur la pierre poreuse afin d'atteindre l'état de pré-consolidation voulu. 600 g ont été ajoutés pour l'essai « td1 », et 1kg pour l'essai « td4 ». Il est recommandé d'ajouter ces poids par paliers, en laissant le matériau se consolider entre chaque chargement. Des intervalles d'une heure ont été utilisés ici.
- Recouvrir de cellophane et laisser reposer une nuit (voir Figure A4.11).

Démoulage

- Retirer le cellophane, les poids et la pierre poreuse.
- Extraire le matériau de la cellule de 100 mm, en le remaniant le moins possible. La technique utilisée ici consistait à renverser la cellule sur une plaque de plexiglas, le matériau s'y déposant par gravité.
- Peser un anneau à argile de 63,5 mm.
- Placer la plaque de plexiglas dans un échantillonneur à argile, muni de l'anneau de 63,5 mm. Il s'agit du diamètre interne de la cellule utilisée pour la mesure des V_s .
- Échantillonner dans le matériau.
- Retirer le matériau en trop et en conserver une partie pour mesurer sa teneur en eau.
- Araser et nettoyer l'anneau de 63,5 mm contenant le matériau.
- Peser une petite plaque de verre.
- Déposer l'anneau sur cette plaque et peser le tout.

Mise en place dans la cellule oedométrique

- Mesurer la hauteur à vide de la cellule oedométrique modifiée à l'aide d'un déflectomètre.
- Une fois le matériau pesé, mettre l'anneau de 63,5 mm en place dans la cellule oedométrique modifiée.
- Mesurer la hauteur avec l'échantillon en place et soustraire la hauteur à vide pour obtenir la hauteur initiale de l'échantillon.
- Mettre rapidement la cellule oedométrique en place dans l'appareil oedométrique et noter la lecture initiale du déflectomètre de ce dernier.
- La densité de mise en place peut-être calculée à partir de la hauteur initiale, du diamètre de l'anneau, du poids et de la teneur en eau de l'échantillon.

Cette méthode permet de mettre en place des échantillons qui supportent le poids du chapeau métallique, ce qui était l'objectif premier derrière son élaboration. Elle a donc permis d'effectuer des mesures de V_s sur des résidus miniers. Néanmoins, il existe 3 inconvénients relatifs à cette méthode de mise en place.

Premièrement, l'échantillon se trouve inévitablement remanié lors du transfert du moule de 100 mm vers la cellule oedométrique, ce qui rend l'atteinte d'une densité visée difficile. Tel qu'énoncé à la section 4.3, ceci va contribuer au fait que les échantillons, malgré des charges de pré-consolidation différentes, se retrouvent finalement mis en place à des densités similaires.

Deuxièmement, la saturation totale de l'échantillon est incertaine, car celui-ci n'est pas submergé. Tel que décrit à la section 4.3, certains résultats obtenus au laboratoire pourraient témoigner d'une saturation incomplète.

Finalement, l'évaluation de cette densité manque de précision, car l'échantillon a tendance à se consolider très rapidement sous le poids du chapeau. La mesure externe prise au déflectomètre ne correspond souvent plus à la lecture initiale prise sur le déflectomètre de l'appareil oedométrique.

3.3.2.3.1.2 Méthode 2 (M2)

La deuxième méthode élaborée dans le cadre de ce projet vise à améliorer certains aspects relatifs à la M1, soit le remaniement de l'échantillon et le risque de saturation incomplète. Elle a été utilisée pour l'essai « td5 ».

Mise en place dans l'anneau de 63,5 mm

- Peser un anneau à argile de 63,5 mm.

- Fixer un cylindre de plexiglas de bon diamètre (ex : 254 mm) sur une plaque, à l'aide de silicone.
- Placer une pierre poreuse saturée de 100 mm sur cette plaque.
- Relier l'anneau de 63,5 mm à un autre anneau identique. Relier ensemble avec du ruban électrique (voir Figure A4.9) et placer sur la pierre poreuse.
- Préparer environ 900 g de matériau à une teneur en eau de 40%. Ceci correspond à 643 g de matériau sec et 257 g d'eau.
- Déposer le matériau dans les anneaux. Attendre 10 minutes que le matériau se consolide sous son poids.
- Déposer une pierre poreuse saturée sur le dessus du matériau.
- Remplir le cylindre de plexiglas d'eau.
- Ajouter les poids voulus sur la pierre poreuse, par paliers, puis laisser reposer une nuit (voir Figure A4.10).

Démoulage

- Peser une plaque de verre
- Retirer l'eau du cylindre de plexiglas, puis détacher celui-ci de sa base.
- Placer la pierre poreuse ainsi que les 2 anneaux contenant le matériau dans une tare.
- Retirer le ruban électrique reliant les 2 anneaux et cisailer le matériau à l'interface de ceux-ci avec une feuille de plastique rigide.
- Conserver le matériau contenu dans l'anneau du haut pour effectuer une teneur en eau.
- Nettoyer et araser l'anneau du bas.
- Placer cet anneau sur la plaque de verre, et peser le tout. Le poids de l'échantillon correspond au poids total, moins celui de l'anneau et de la plaque de verre.

Mise en place dans la cellule oedométrique

- Mesurer la hauteur à vide de la cellule oedométrique modifiée à l'aide d'un déflectomètre.
- Mettre l'anneau de 2,5 pouces en place dans la cellule oedométrique modifiée.
- Mesurer la hauteur avec l'échantillon en place et soustraire la hauteur à vide pour obtenir la hauteur initiale de l'échantillon.
- Mettre rapidement la cellule oedométrique en place dans l'appareil oedométrique et noter la lecture initiale du déflectomètre de ce dernier.
- La densité de mise en place peut-être calculée à partir de la hauteur initiale, du diamètre de l'anneau, du poids et de la teneur en eau de l'échantillon.

Par rapport à la M1, la méthode présentée ici assure une meilleure saturation de l'échantillon. Néanmoins, les problèmes de remaniement, de contrôle de la densité initiale et de précision dans la mesure de celle-ci sont encore présents. En effet, l'essai « td5 » a été lui aussi mis en place à une densité très similaire aux autres essais, malgré l'utilisation d'une technique différente. Tel qu'il sera démontré plus loin, une nouvelle cellule oedométrique devra être construite afin de régler les problèmes de mise en place relatifs à ce type de matériau.

3.3.2.3.2 Essais

Les mesures de vitesses de cisaillement sont effectuées à la fin de chaque palier de chargement dans l'appareil oedométrique, décrit à la section 3.2.2. Comme le matériau à l'étude est un sol fin, des intervalles de 24h sont initialement appliqués entre chaque palier. Par la suite, ce temps est réduit à environ 12h afin d'accélérer le déroulement des essais. Pour chaque palier, 4 types d'ondes sont envoyés à travers l'échantillon. Lors de l'essai, le voltage émis est amplifié à l'aide de l'amplificateur de puissance et peut atteindre 200V. Le voltage reçu varie entre 200 mV et 1V. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 1MHz.

3.3.2.3.3 Analyse

Cette section présente les calculs effectués à partir des vitesses de cisaillement. Tel que mentionné précédemment, la mesure des V_s au laboratoire est effectuée à chaque paliers de chargement dans l'appareil oedométrique. Ceci permet d'obtenir deux types d'informations : des courbes oedométriques et les mesures de vitesses de cisaillement. La façon de traiter ces résultats sera présentée ici.

Les courbes de consolidation oedométriques sont obtenues en traçant la contrainte verticale appliquée (σ_v) en fonction de la déformation axiale (ϵ_{ve}) provenant du déflectomètre. Un module oedométrique (E_{oed}) est ensuite obtenu en calculant la pente de chaque palier de chargement, tel qu'illustré à la Figure 3.13. Ceci permet également de tracer des courbes reliant E_{oed} à l'indice des vides.

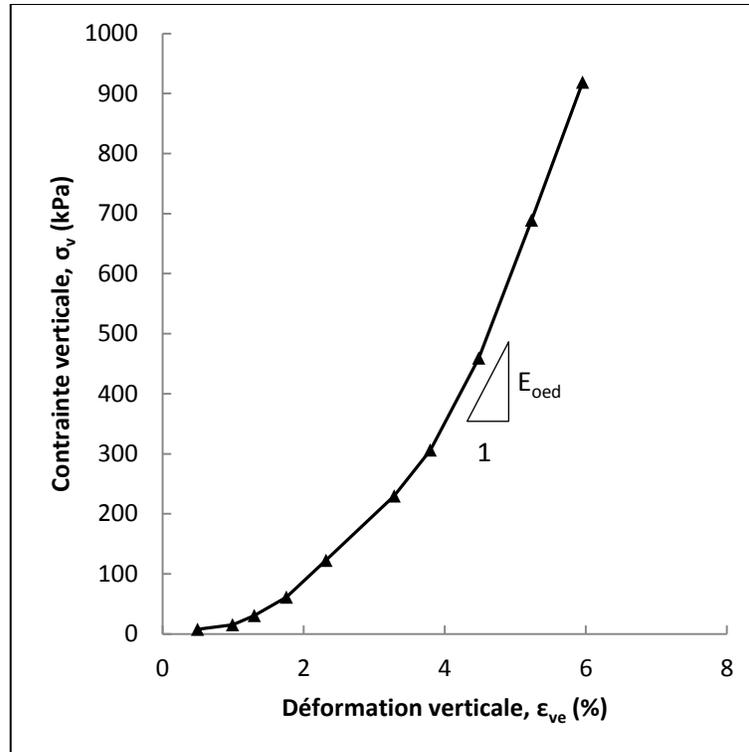


Figure 3.13 : Courbe de consolidation oedométrique provenant d'un essai V_s

La suite de l'analyse s'intéresse aux V_s enregistrées lors des différents paliers de chargement. L'indice des vides est alors utilisé comme paramètre exprimant l'état de l'échantillon. En effet, les déflexions enregistrées lors de l'essai oedométrique peuvent être converties en variation de l'indice des vides. Il devient alors possible de tracer la mesure des vitesses de cisaillement normalisée, en utilisant l'équation suivante ([16]) :

$$V_{s1} = V_s * (100/\sigma_v)^{0.25} \quad (3.2)$$

L'équation (3.2) relie la vitesse de cisaillement normalisée (V_{s1}) à la vitesse de cisaillement mesurée (V_s) et à la contrainte verticale (σ_v). Une pression de référence de 100 kPa est utilisée. Cette normalisation permet d'isoler l'effet de la contrainte verticale sur la vitesse de cisaillement mesurée. Par la suite, le module de cisaillement à petites déformations (G_{max}) est calculé à partir de l'expression suivante ([16]) :

$$G_{max} = \rho * V_s^2 \quad (3.3)$$

L'équation (3.3) relie G_{max} à la masse volumique de l'échantillon (ρ) et à la vitesse de cisaillement (V_s). Finalement, le module de cisaillement à petites déformations est normalisé selon la formule suivante ([16]) :

$$G_{maxn} = G_{max} * (100/\sigma_v)^{0.5} \quad (3.4)$$

À l'équation (3.4), le module de cisaillement à petites déformations normalisé (G_{maxn}) est calculé à partir du module de cisaillement à petites déformations (G_{max}) et de la contrainte verticale (σ_v). Une pression de référence des 100 kPa est utilisée.

4 Résultats

Ce chapitre regroupe les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce projet. La section 4.1 présente les résultats d'une caractérisation géotechnique préliminaire. La section 4.2 regroupe les résultats des essais de laboratoire effectués dans l'appareil triaxial, ainsi que les modélisations qui y sont associées. Par la suite, la section 4.3 regroupe les résultats des mesures de vitesses de cisaillement effectuées au laboratoire.

Le Tableau 4.1 résume le programme expérimental du projet. La première colonne présente les essais effectués. Les abréviations « MT » et « HD » font références à la méthode de mise en place, et signifient respectivement *moist-tamping* et *hydraulic deposition*. Les chiffres entre parenthèses indiquent les pressions de consolidation utilisées lors des différents essais triaxiaux. La deuxième colonne du tableau indique quels essais ont été modélisés, et avec quel modèle.

Tableau 4.1 : Programme expérimental

Essai	Modèle
Triaxial	
Consolidation isotrope	Hyperbolique
CU MT (125, 250, 500)	Aucun
CD MT (125, 250, 500)	Hyperbolique
CU HD (250)	Aucun
CD HD (125, 250, 500)	Hyperbolique
V_s	
3 essais oedométriques avec mesure des V_s	Aucun

MT : *moist-tamping*
HD : *hydraulic deposition*

4.1 Caractérisation Préliminaire

Cette section présente les résultats d'une caractérisation géotechnique préliminaire effectuée à l'Université de Sherbrooke préalablement à ce projet [20]. Cet exercice a permis d'obtenir certains paramètres géotechniques importants, qui sont présentés ici. Par la suite, ces résultats sont comparés à ceux obtenus par Golder et Associés lors d'une campagne d'essais similaire.

Tel que mentionné, le matériau est arrivé au laboratoire dans des contenants de 20 litres, après plusieurs heures de transport routier qui l'ont complètement remanié. À l'ouverture des barils, le résidu se présente comme un sol granulaire très fin, de granulométrie uniforme, de couleur gris foncé et contenant beaucoup d'eau. Au toucher, ce sol ne semble pas posséder de plasticité.

Une caractérisation géotechnique conventionnelle a été effectuée à l'Université de Sherbrooke, ainsi que par Golder et Associés. Le Tableau 4.2 compare les résultats obtenus

par les 2 laboratoires. L'observation de ce tableau révèle que les échantillons testés par Golder et Associés sont légèrement plus grossiers que ceux testés à l'Université de Sherbrooke. Il est à noter qu'un matériau plus grossier sera généralement plus perméable.

Tableau 4.2 : Comparaison des caractéristiques géotechniques obtenues par l'Université de Sherbrooke [20] et par Golder et Associés [19]

Paramètres géotechniques	Université de Sherbrooke	Golder et Associés
G_s	2,76	2,71
W_L (%)	29	-
W_p (%)	25	-
I_p (%)	4	-
Sable >75 μ m (%)	8	15
Silt (%)	81	78,5
Particules de taille argile <2 μ m (%)	11	6,5
D_{10} (mm)	0,0018	0,004
D_{60} (mm)	0,021	0,031
C_u	12	7,3
USCS	ML	-

Une sédimentométrie effectuée à l'Université de Sherbrooke (voir Figure A1.1 de l'Annexe 1), révèle que le matériau à l'étude est un silt peu plastique, avec traces de sable et un peu de particules de la taille de l'argile. Il s'agit donc d'un silt argileux peu plastique (ML), selon la classification USCS. Puisque ce résidu provient de roche dure broyée, il est acceptable de supposer que les particules de la taille d'une argile sont en fait de nature granulaire. Finalement, la conductivité hydraulique (k_{sat}) a été mesurée à $4,99 \times 10^{-6}$ cm/s pour un indice des vides de 0,65. Il s'agit d'une perméabilité relativement élevée pour un matériau aussi fin.

Une courbe granulométrique réalisée par Golder et Associés est présentée à la Figure A2.1 de l'Annexe 2. Elle révèle que ce sol est composé de 15% de sable de fin, de 78,5% de silt et de 6,5% de particules de la taille des argiles [19]. Il s'agit donc d'un silt avec un peu de sable et traces de particules de la taille d'une argile. Au niveau de la perméabilité, Golder et Associés présentent une valeur de k_{sat} de $1,9 \times 10^{-5}$ cm/s suite à un essai de perméabilité en cellule triaxiale, pour un indice des vides de 0,67. Il s'agit donc d'un matériau légèrement plus perméable que celui testé à l'Université de Sherbrooke, ce qui peut être expliqué par une granulométrie plus grossière.

Golder et Associés ont également effectué des triaxiaux consolidés non-drainés (CU) à une densité de 1515 kg/m³. Ces essais, présentés à la Figure A2.2 de l'Annexe 2, révèlent une cohésion de 0 kPa, et un angle de frottement effectif de 37,9 degrés [19]. Des essais

consolidés drainés (CD), effectués à la même densité par le même laboratoire sont présentés à la Figure A2.3 de l'Annexe 2. Ces essais révèlent une cohésion de 12 kPa, et un angle de frottement de 33,9 degrés [19].

4.2 Essais triaxiaux

La présente section concerne les résultats obtenus suite aux essais effectués dans l'appareil triaxial. La section 4.2.1 concerne les résultats de laboratoire, alors que la section 4.2.2 regroupe les modélisations effectuées dans le but de reproduire et interpréter certains essais en utilisant le modèle hyperbolique de Duncan et Chang.

4.2.1 Laboratoire

Cette section présente l'ensemble des résultats de laboratoire obtenus dans l'appareil triaxial dans le cadre de ce projet. L'ordre de présentation correspond sommairement à l'ordre chronologique dans lequel ces essais ont été effectués.

4.2.1.1 *Essais triaxiaux consolidés non-drainés, mise en place par compactage (CU MT)*

Les essais présentés ici sont des essais triaxiaux non-drainés sur des échantillons mis en place par compactage. Ces essais ont été effectués selon la norme ASTM D4767-11 [2].

Trois essais sont présentés ici, à des pressions de confinement de 125, 250 et 500 kPa. Ces pressions ont été choisies, car Golder et Associés ont effectués des essais identiques. Pour les mêmes raisons, une densité initiale de 1515 kg/m³ a été choisie [19]. L'idée est de pouvoir comparer les résultats avec ceux de Golder et Associés afin de valider les méthodes utilisées. Cette comparaison est présentée plus loin. Le matériau a été mis en place à une teneur en eau de 16%, en six couches compactées au pilon, selon la méthode décrite à la section 3.3.2.1.1. Le moule à vacuum développé à l'université de Sherbrooke a été utilisé dans tous les cas.

Cette série a subi une saturation en deux étapes. Premièrement en faisant circuler de l'eau désaérée du bas vers le haut de l'échantillon, avec une contre-pression de 40 kPa et une pression cellulaire de 50 kPa. Par la suite, la procédure de saturation par contre-pression de GDSLAB a été appliquée, en soumettant l'échantillon à une contre-pression de 490 kPa et une pression cellulaire de 500 kPa durant une nuit. Ces différentes étapes ont permis d'obtenir une valeur de B moyenne de 0,88 pour cette série.

Après la saturation, les échantillons ont été consolidés selon la procédure de GDSLAB, avec arrêt automatique lorsque le changement de volume est inférieur à 5 mm³ pendant 5 minutes. Les échantillons ont ensuite été cisailés à une vitesse de 0,1 mm/min, encore une fois dans le but de reproduire les essais de Golder et Associés. Les Figure A2.4 à Figure A2.6,

à l'Annexe 2, contiennent plus de détails relatifs à la mise en place et à la rupture de ces échantillons.

4.2.1.1.1 Cercles de Mohr

La Figure 4.1 présente les cercles de Mohr associés aux trois essais CU MT, avec la contrainte de cisaillement (τ) en abscisse et la contrainte effective (σ') en ordonnée. Ils ont été tracés au moment où le rapport σ'_1/σ'_3 atteint son maximum pour chaque essai. Un angle de friction effectif résiduel de 29,5 degrés a été obtenu à partir de cette représentation, sans aucune cohésion. Cet angle correspond à la moyenne de trois angles calculés selon l'équation (4.1), au point marqué par une croix sur la Figure 4.1.

$$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{res} = \tan^2 (45^\circ + \phi'_{res}/2) \quad (4.1)$$

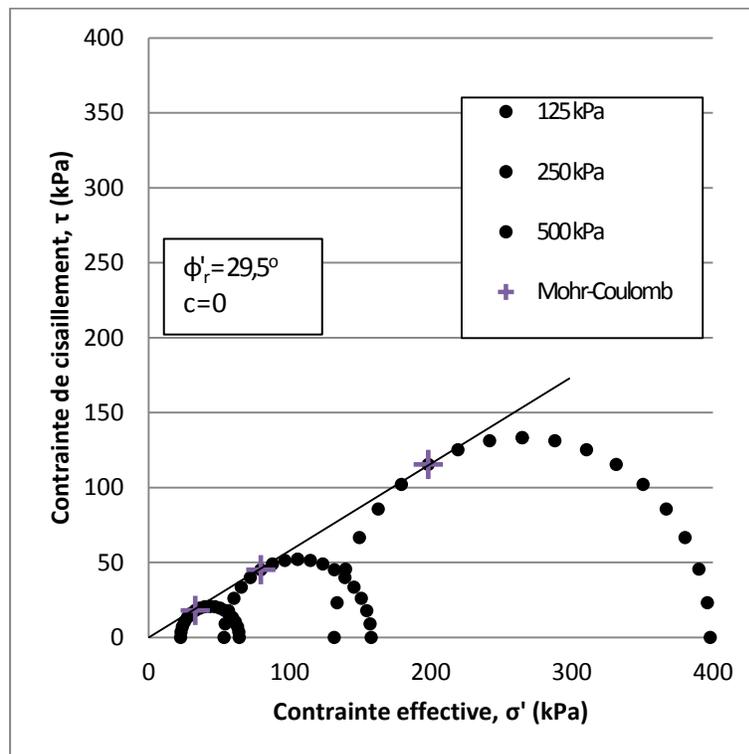


Figure 4.1 : Cercles de Mohr pour les essais CU MT

Tel que présenté au Tableau 2.1, des angles de frictions effectifs de 30,3 à 37,9 degrés sont rapportés dans la littérature pour des essais CU sur des résidus miniers de roches dures. L'angle de 29,5 degrés obtenu ici est inférieur à la valeur moyenne provenant de la littérature (34,7 degrés). Par ailleurs, il se situe tout juste à l'extérieur de la limite inférieure de valeurs provenant de la littérature (voir section 2.2.1.1). Il est à noter que dans le cas d'un essai non-drainé, le fait d'utiliser un angle de friction effectif signifie que l'effet de la pression interstitielle est retranchée du calcul.

4.2.1.1.2 Synthèse de la série

Les figures présentées dans cette section regroupent les résultats de toute la série de manière à pouvoir les comparer entre eux.

La Figure 4.2 illustre l'évolution du déviateur ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) en fonction de la déformation axiale (ϵ_a), obtenue à partir de l'équation (2.3). Les trois essais présentent un comportement conséquent, c'est-à-dire que la résistance augmente avec le niveau de confinement. Par ailleurs, tous trois possèdent un pic initial, suivi d'une chute du déviateur jusqu'à un niveau résiduel inférieur. Il s'agit donc d'un comportement d'adoucissement, tel que décrit à la section 2.4.2.2.5.

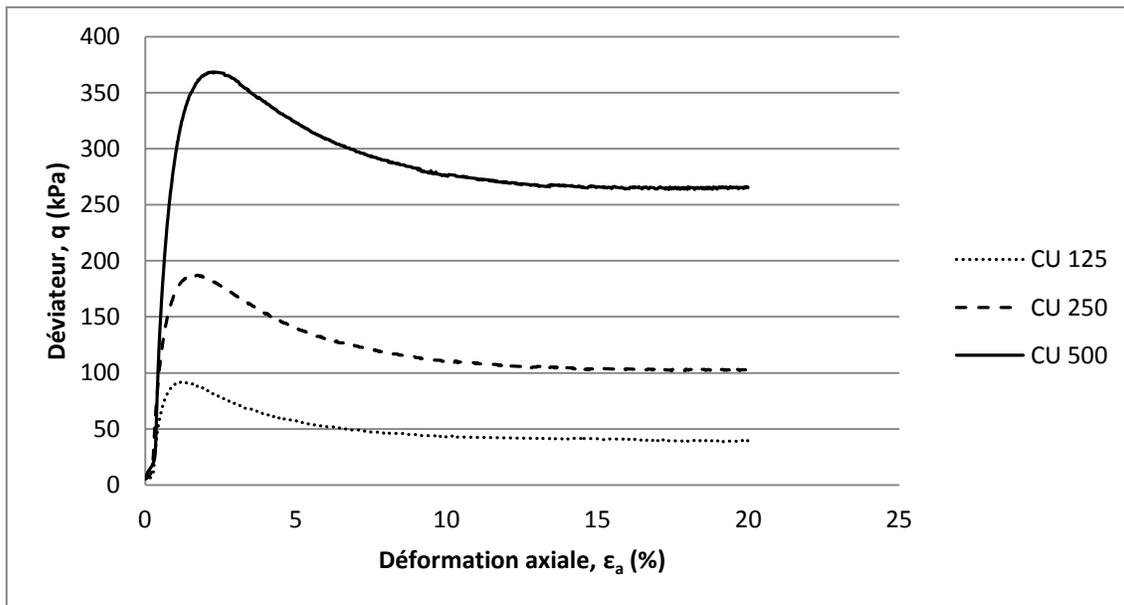


Figure 4.2 : Déviateur en fonction de la déformation axiale, série CU MT

Par ailleurs, l'observation de la Figure 4.3 confirme le caractère contractant. En effet, les pressions interstitielles en excès ($\Delta\mu$) augmentent tout au long de l'essai, ce qui est caractéristique de la contractante en conditions non-drainées.

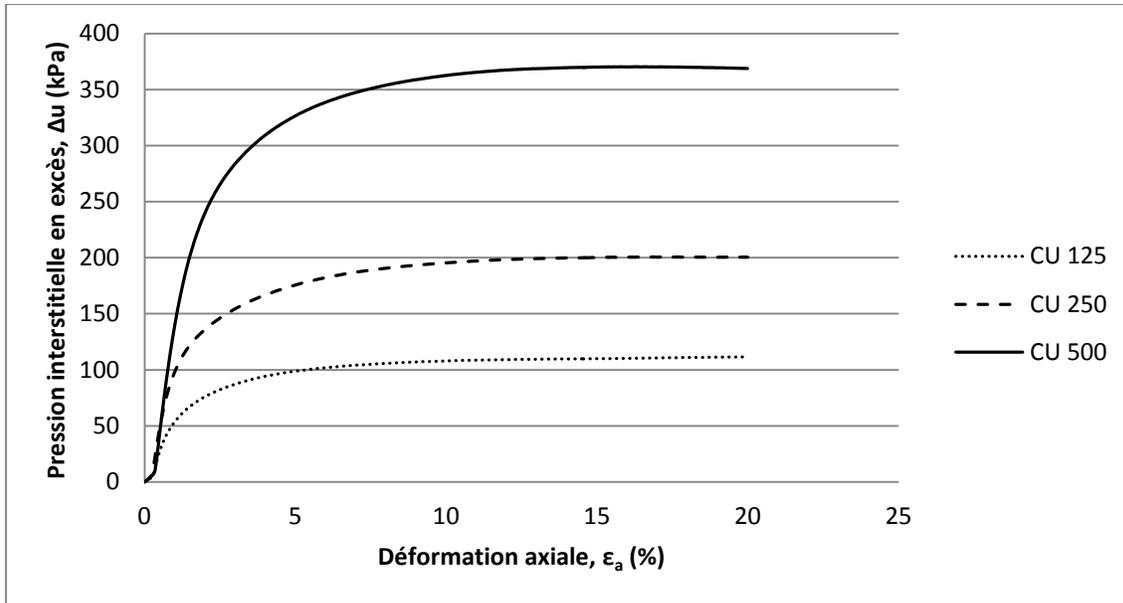


Figure 4.3 : Pression interstitielle en fonction de la déformation axiale, série CU MT

Finalement, la figure Figure 4.4 présente le rapport des contraintes principales (σ'_1 / σ'_3). À grande déformation, ce rapport est presque le même (2,88), ce qui devrait théoriquement être le cas pour des essais effectués à la même densité. Ceci vient confirmer que les essais sont cohérents entre eux. Évidemment, ce rapport n'est pas identique dans les trois cas, mais cette variation est acceptable et probablement due aux légères différences de densité initiale (voir Figure A2.4 à Figure A2.6 de l'Annexe 2).

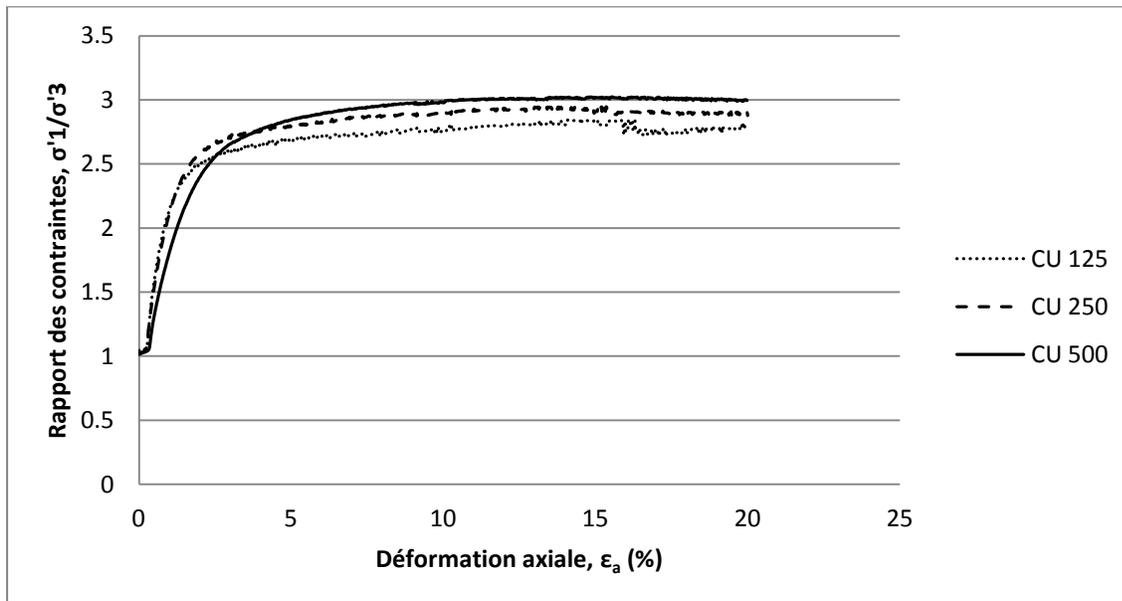


Figure 4.4 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, série CU MT

Il est également intéressant de porter attention au cheminement de contraintes produit lors de ces essais. La Figure 4.5 les représente dans le plan déviateur (q) – contrainte effective moyenne (p'). Il apparaît clairement que ces essais s’alignent sur une même droite à grande déformation. Ceci est une autre indication que ces essais sont cohérents entre eux, et probablement réalisés à des densités initiales similaires. Par ailleurs, ces trois essais sont contractants, comme le montre leur courbure vers la gauche dans le plan q - p' .

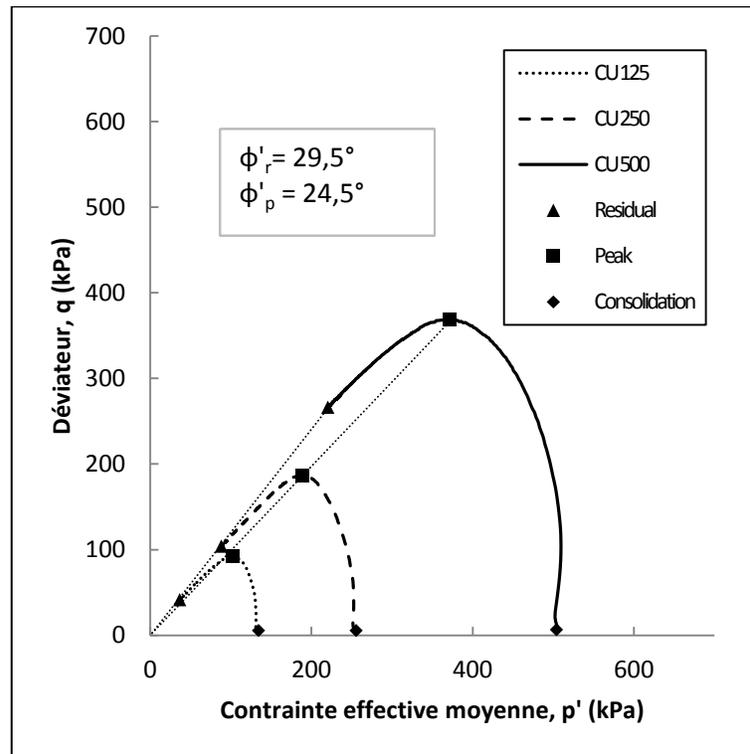


Figure 4.5 : Cheminements de contraintes, série CU MT

De plus, le plan q - p' permet d’approximer l’angle de friction au pic ($24,5^\circ$), en faisant la moyenne des angles obtenus par l’équation (4.1), au moment où le déviateur atteint son maximum pour chaque essai. Cet angle au pic peut également être vu comme la limite inférieure d’une d’instabilité préalable à la liquéfaction [40].

La Figure 4.6 présente l’évolution de l’indice des vides (e) en fonction de la contrainte effective moyenne (p'). Ce plan permet de tracer la ligne d’état critique (CSL), qui est représentée par une ligne pleine dans cette figure. Les lignes pointillées témoignent de l’évolution de l’indice des vides durant la phase de cisaillement pour chaque essai. En conditions non-drainées, ces lignes sont horizontales, car l’échantillon ne subit pas de changement de volume. Par ailleurs, les formes noires sur la Figure 4.6 représentent divers moment au cours des essais, qui se retrouvent également sur la Figure 4.5. Les losanges représentent la fin de la consolidation, c’est-à-dire l’état de l’échantillon avant l’application

d'une contrainte de cisaillement. Les carrés représentent le moment où le déviateur atteint son maximum durant le cisaillement. Il s'agit du *peak* illustré à la Figure 4.5. Finalement, les triangles illustrent l'état résiduel, qui est pris ici comme le moment où (σ'_1/σ'_3) atteint son maximum. Ceci correspond aux points *residual* à la Figure 4.5, mais le terme *critical state* est employé ici afin de respecter la nomenclature liée à la CSL.

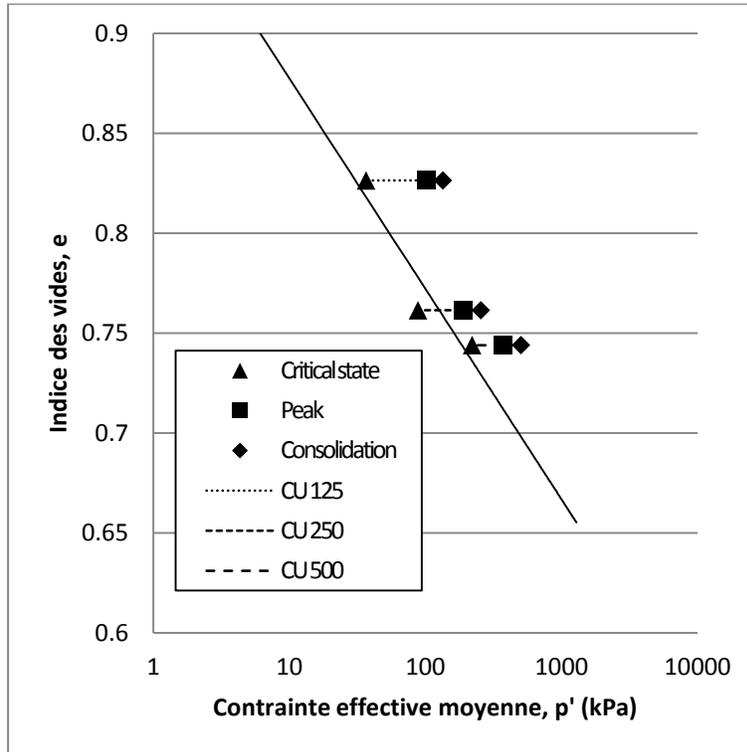


Figure 4.6 : CSL pour la série CU MT

Le Tableau 4.3 présente les paramètres d'état associés aux essais de la série CU MT. Les trois échantillons présentent des valeurs positives, caractéristiques des échantillons contractants.

Tableau 4.3 : Paramètres d'état pour la série CU MT

Essai	ψ
CU 125	0,068
CU 250	0,032
CU 500	0,045

Par ailleurs, la CSL présentée à la Figure 4.6 s'exprime mathématiquement de la façon suivante :

$$e_c = 0,978 - 0,045 * \ln(p'_c) \quad (4.2)$$

4.2.1.1.3 Comparaison avec les résultats de Golder et Associés

Les résultats obtenus par Golder et Associés lors de la caractérisation préliminaire sont assez différents de ceux obtenus à l'Université de Sherbrooke, en dépit du fait que les mêmes paramètres ont été utilisés lors des deux séries d'essais CU (densité initiale, teneur en eau initiale, vitesse de chargement, etc.).

Tout d'abord, l'angle de friction résiduel obtenu par Golder et Associés est de 37,9 degrés (voir Figure A2.2 de l'Annexe 2), alors que celui obtenu ici est de 29,5 degrés. Les échantillons testés par Golder et Associés étaient un peu plus grossiers, et cette différence de granulométrie peut affecter le comportement en cisaillement. Par contre, la différence entre les deux angles de friction semble grande pour être attribuable uniquement à un léger écart de granulométrie.

L'observation de la Figure 4.7 révèle de grandes différences au niveau du comportement déviatoire entre les deux séries d'essais. Tel que mentionné précédemment, les essais effectués à Sherbrooke sont tous de type adoucissants. Par contre, les essais réalisés par Golder et Associés présentent des comportements qui varient selon la contrainte de confinement appliquée. L'essai à 125 kPa est de type adoucissant, tout comme les essais faits à l'Université de Sherbrooke. Par contre, l'essai à 250 kPa est plutôt neutre, puisque le déviateur atteint un plateau suite à la rupture initiale. Finalement, l'essai à 500 kPa présente un caractère durcissant. Il a été énoncé précédemment que le comportement volumétrique des sols granulaires est affecté par la contrainte de confinement. Par contre, il est établi qu'un échantillon de même densité sera plus contractant lorsque soumis à une contrainte de confinement supérieure [21]. Le comportement contraire est observé ici, ce qui porte à croire que les échantillons testés par Golder et Associés n'étaient peut-être pas tous à la même densité. Cette hypothèse est la plus probable, car il est souvent difficile d'obtenir une bonne mesure de la densité initiale en utilisant un moule traditionnel. Ce point a été abordé à la section 3.2.1.2.1.

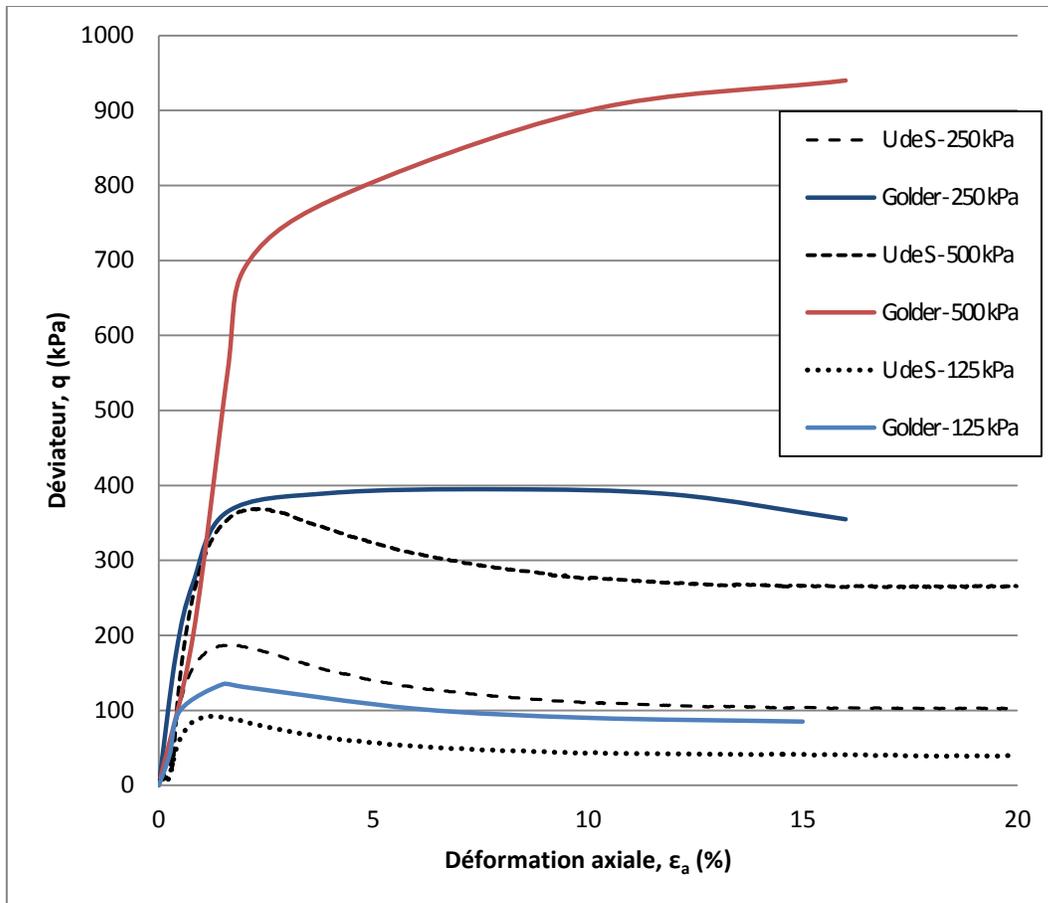


Figure 4.7 : Déviateur en fonction de la déformation axiale pour les essais CU effectués par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke [19].

La Figure 4.8 présente également certaines irrégularités. En effet, dans le plan p - q' , une série d'essai doit théoriquement rejoindre une ligne unique à grande déformation, tel qu'illustré à la Figure 4.5. Ce n'est pas le cas pour les résultats de Golder et Associés, présentés à la Figure 4.8.

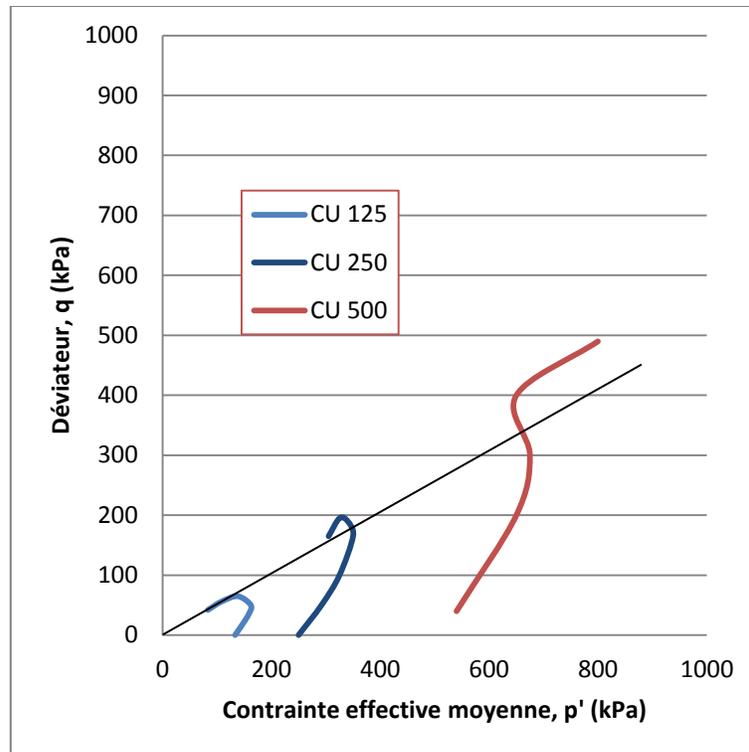


Figure 4.8 : Cheminement de contraintes pour les essais CU de Golder et Associés [19].

Un des objectifs de cette série d'essais était de valider le bon fonctionnement de l'appareil triaxial de l'Université de Sherbrooke. Pour ce faire, des essais CU ont été réalisés avec les mêmes paramètres que ceux effectués par Golder et Associés. Malheureusement, l'examen des résultats obtenus par cette firme révèle des essais dont le comportement est variable, ce qui rend la comparaison difficile. Les essais réalisés à l'Université de Sherbrooke semblent cohérents entre eux, ce qui permet de qualifier les manipulations de fiables.

4.2.1.2 Essais triaxiaux consolidés drainés, mise en place par compactage (CD MT)

Les essais présentés ici sont des essais triaxiaux drainés sur des échantillons mis en place par compactage. Ces essais ont été effectués selon la norme ASTM D7181-11 [3].

Trois essais sont présentés ici, à des pressions de confinement de 125, 250 et 500 kPa, encore une fois dans le but de reproduire les essais réalisés par Golder et Associés. De façon similaire, une densité initiale de 1515 kg/m^3 a été choisie [19]. Comme pour la série CU MT, le matériau a été mis en place à une teneur en eau de 16%, selon la méthode décrite à la section 3.3.2.1.1. Le moule à vacuum développé à l'université de Sherbrooke a été utilisé dans tous les cas.

Contrairement à la série précédente, la série CD MT a subi une saturation en trois étapes. Une phase initiale de circulation de CO_2 gazeux a été ajoutée, afin de voir si de meilleures valeurs de B pouvaient être atteintes. Le CO_2 a circulé du bas vers le haut de l'échantillon

durant 1 heure, à une pression d'environ 40 kPa, tout en maintenant une pression cellulaire de 50 kPa. Par la suite, une circulation d'eau désaérée a été effectuée, aux mêmes pressions. Finalement, la procédure de saturation par contre-pression a été appliquée, en soumettant l'échantillon à une contre-pression de 490 kPa et une pression cellulaire de 500 kPa durant une nuit. Ces différentes étapes ont permis d'obtenir une valeur de B moyenne de 0,95 pour cette série, ce qui est supérieur à la valeur de 0,88 atteinte sans circulation de CO_2 . Il est par ailleurs recommandé dans la littérature d'utiliser cette méthode pour saturer les sols granulaires fins [24, 33].

Après la saturation, une phase de consolidation a été appliquée, comme pour les essais CU MT. Les échantillons ont ensuite été cisailés à une vitesse de 0,003 mm/min, encore une fois dans le but de reproduire les essais de Golder et Associés. Tel que mentionné précédemment, les essais triaxiaux CD sur des sols fins sont généralement effectués à des vitesses de chargement très lentes. Ceci permet d'éviter le développement de pressions interstitielles lors du cisaillement et d'assurer des conditions complètement drainées. Les Figure A2.7 à Figure A2.9 à l'Annexe 2, contiennent plus de détails relatifs à la mise en place et à la rupture de ces échantillons.

4.2.1.2.1 Cercles de Mohr

La Figure 4.9 présente les cercles de Mohr associés aux trois essais CD MT, avec la contrainte de cisaillement (τ) en abscisse et la contrainte effective (σ) en ordonnée. Ils ont été tracés au moment où le rapport σ'_1 / σ'_3 atteint son maximum pour chaque essai. Un angle de friction effectif résiduel de 32,9 degrés a été obtenu à partir de cette représentation, sans aucune cohésion. Cet angle correspond à la moyenne de trois angles calculés selon l'équation (4.1), au point marqué par une croix sur la Figure 4.9.

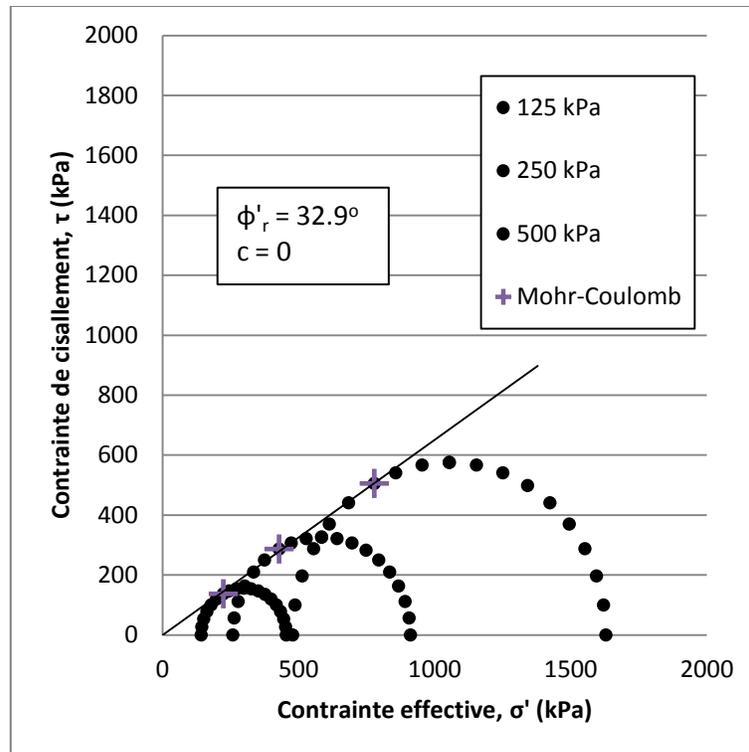


Figure 4.9 : Cercles de Mohr pour les essais CD MT

Tel qu'exposé au Tableau 2.2, des angles de frictions de 30 à 42 degrés sont rapportés dans la littérature pour des essais CD sur des résidus de roches dures, avec une moyenne de 35,3 degrés. L'angle de 32,9 degrés obtenu ici s'inscrit donc la portion inférieure de cette plage. Par ailleurs, cet angle est supérieur à l'angle obtenu pour les essais CU, ce qui devrait théoriquement être le cas pour des échantillons contractants [21].

4.2.1.2.2 Synthèse de la série

Les figures présentées dans cette section regroupent les résultats de toute la série de manière à pouvoir les comparer entre eux.

La Figure 4.10 illustre l'évolution du déviateur ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) en fonction de la déformation axiale (ϵ_a). Les trois essais présentent un comportement conséquent, c'est-à-dire que la résistance augmente avec le niveau de confinement. Par ailleurs, tous trois possèdent une forme similaire, sans pic initial de résistance. Il est à noter qu'un cycle de rechargement a été effectué pour l'essai à 125 kPa de confinement.

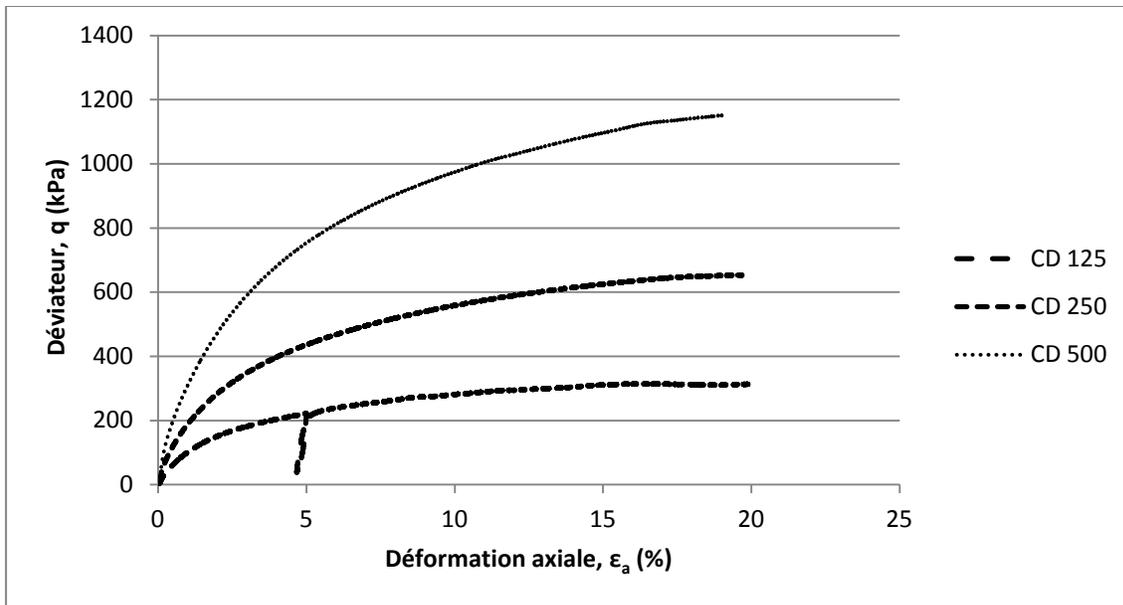


Figure 4.10 : Déviateur en fonction de la déformation axiale, série CD MT

La Figure 4.11 présente le rapport des contraintes principales effectives (σ'_1/σ'_3) en fonction de la déformation axiale (ϵ_a). Il est à noter que dans le cas de ces essais drainés, le déviateur maximum et le rapport σ'_1/σ'_3 maximum surviennent presque en même temps, c'est-à-dire à grande déformation. Ceci n'était pas le cas pour la série d'essai non-drainés, au cours de laquelle le déviateur maximum est survenu très tôt dans l'essai, alors que le rapport σ'_1/σ'_3 maximum est apparu à grande déformation. Finalement, il est pertinent d'ajouter que l'essai CD 125 présente un rapport σ'_1/σ'_3 résiduel (3.21) légèrement inférieur aux 2 autres essais (3,45). Le rapport obtenu pour les deux derniers essais est probablement plus représentatif de la réalité pour cette série. En effet, au moment de l'essai à 125 kPa, l'appareil présentait une fuite minimale de pression cellulaire qui pourrait avoir affecté les résultats à grandes déformations. Un angle de friction effectif légèrement supérieur ($33,5^\circ$) pourrait alors être considéré comme réaliste.

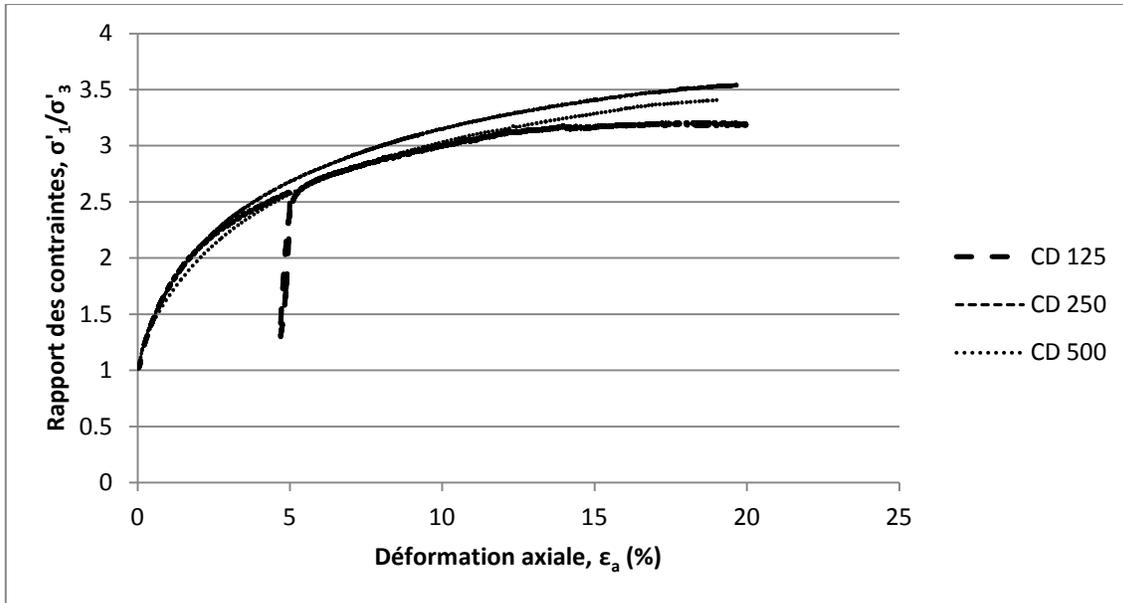


Figure 4.11 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, série CD MT

La Figure 4.12 présente la déformation volumétrique (ϵ_v) en fonction de la déformation axiale (ϵ_a) pour cette série. La déformation volumétrique a été obtenue à partir de l'équation (2.2). Tous les essais de cette série ont connu une déformation volumétrique négative, et sont donc tous contractants.

Les courbes de la Figure 4.12 présentent certaines irrégularités en ce sens que l'essai à 250 kPa de confinement semble se déformer presque autant que l'essai à 500 kPa. Il aurait été plus logique d'obtenir une déformation volumétrique à mi-chemin entre l'essai à 125 kPa et celui à 500 kPa. Au cours de cette série d'essais, il a été constaté que l'appareil triaxial utilisé au laboratoire présentait une fuite minime de pression cellulaire vers l'intérieur de l'échantillon. Ce problème a par la suite été réglé, mais il paraît avoir affecté les résultats présentés ici. Heureusement, seul le comportement volumétrique semble avoir été concerné, probablement car la fuite était somme toute minime. Il a donc été décidé de ne pas reprendre ces essais, mais d'interpréter la déformation volumétrique de l'essai à 250 kPa avec précaution.

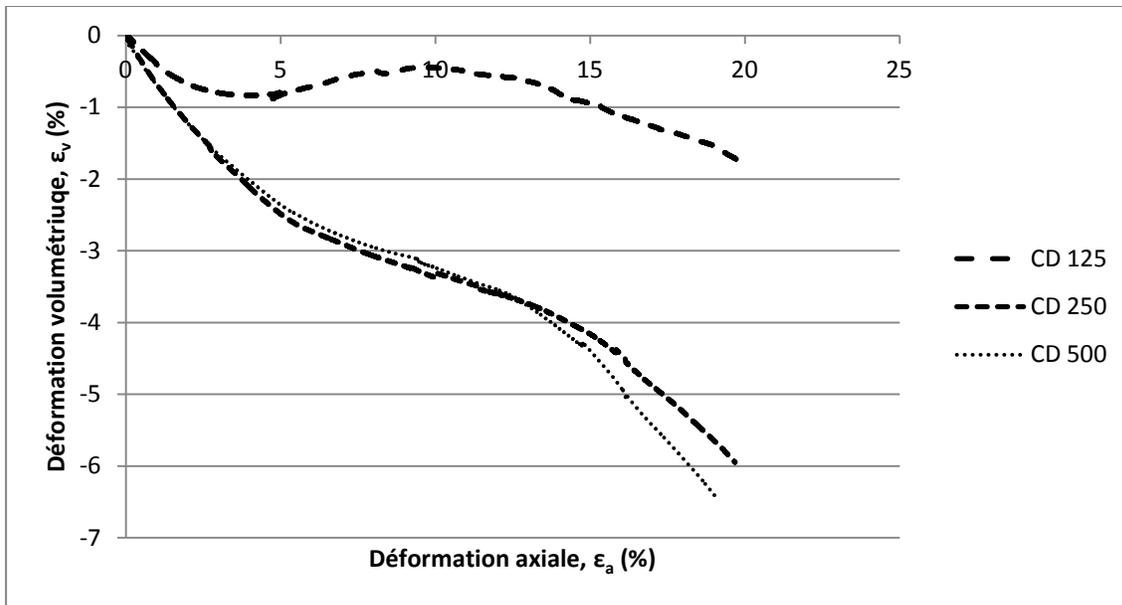


Figure 4.12 : Déformation volumétrique en fonction de la déformation axiale, série CD MT

Les Figure A2.10 à Figure A2.12, situées à l'Annexe 2, présentent l'évolution de la pression interstitielle lors de cette série d'essais CD. Celle-ci était mesurée au bas de l'échantillon, à l'aide du capteur de pression équipant l'appareil triaxial. L'observation de ces figures révèle de très légères variations de pressions interstitielles, ce qui permet d'affirmer que ces essais se sont malgré tout déroulés en conditions drainées.

La CSL n'est pas présentée pour cette série d'essais, car l'état critique n'a pas été atteint lors du cisaillement. En effet, la Figure 4.12 révèle que les trois échantillons subissaient encore des changements de volume à la fin de l'essai, soit autour de 20% de déformation axiale. Il est reconnu que certains sols granulaires nécessitent parfois de très grandes déformations avant d'atteindre leur état critique en conditions drainées [23]. Par ailleurs, il a déjà été établi que les déformations volumétriques enregistrées lors de cette série d'essais présentent des irrégularités. Comme l'obtention de la CSL en conditions drainées passe par les déformations volumétriques, il a été choisi de ne pas la tracer.

4.2.1.2.3 Comparaison avec les résultats de Golder et Associés

Les résultats obtenus par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke sont relativement similaires concernant la série d'essais CD. Tout d'abord, au niveau de l'angle de friction, Golder et Associés ont obtenu un angle de 33,9 degrés et une cohésion de 12 kPa. Des essais semblables effectués à l'Université de Sherbrooke ont révélés un angle de friction de 32,9 degrés et une cohésion nulle. Cet écart au niveau de l'angle de friction peut s'expliquer par le fait que Golder et Associés avaient accès à des échantillons plus grossiers.

La Figure 4.13 présente le déviateur en fonction de la déformation axiale pour les essais effectués par les deux laboratoires. De façon générale, les essais effectués par Golder et Associés semblent plus rigides à petites déformations. Par contre, le déviateur résiduel ainsi que la forme générale des courbes sont assez similaires.

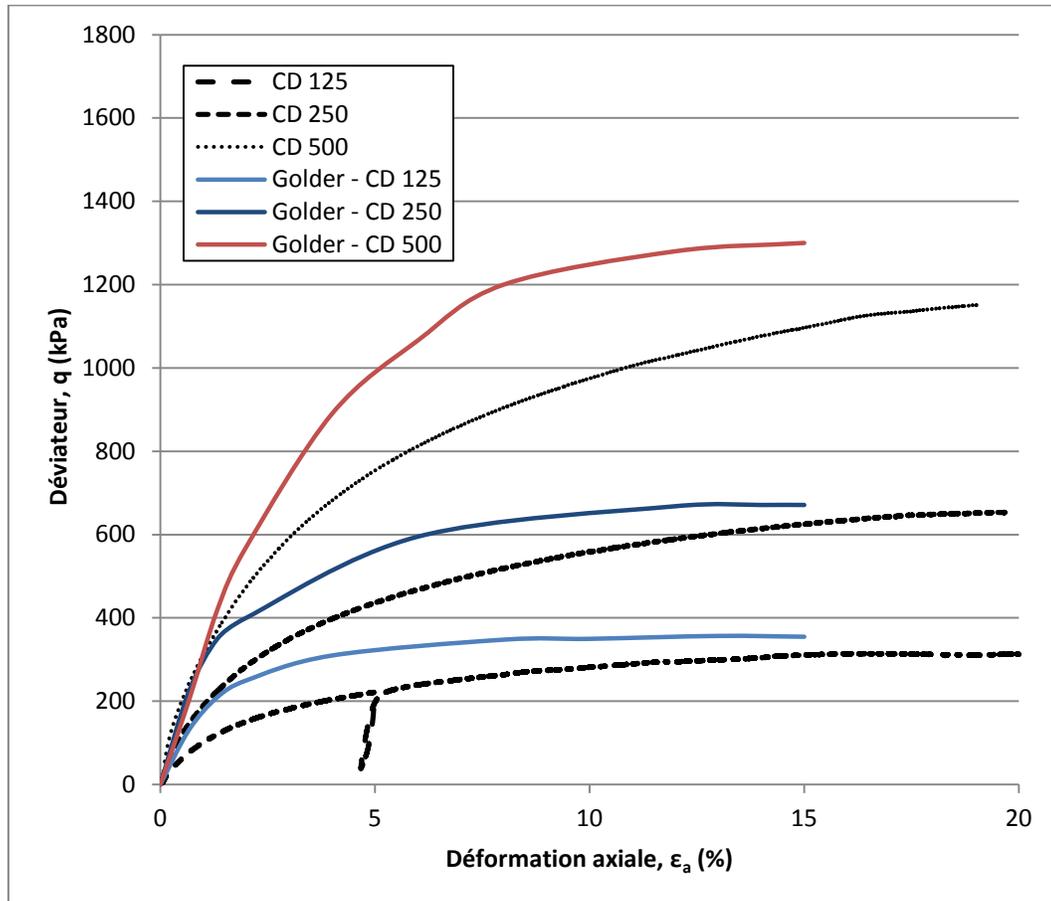


Figure 4.13 : Déviateur en fonction de la déformation axiale pour les essais CD effectués par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke [19]

La Figure 4.14 compare les rapports de contraintes principales en fonction de la déformation axiale obtenus par les deux laboratoires. Les courbes colorées représentent les essais de Golder et Associés. Il est intéressant de noter que le rapport σ'_1/σ'_3 diminue inversement à la contrainte de confinement, ce qui devrait théoriquement être le cas. Cette tendance n'avait pas été observée lors des essais CU effectués dans les deux laboratoires. Le même phénomène est présent pour les essais à 250 et 500 kPa de l'Université de Sherbrooke. Il est logique de croire que l'essai à 125 kPa aurait présenté un rapport σ'_1/σ'_3 supérieur n'eut été de la fuite décrite précédemment. Les rapports σ'_1/σ'_3 résiduels moyens sont assez similaires entre Golder et Associés (3,74) et l'Université de Sherbrooke (3,38). Au final, les résultats des essais CD effectués aux deux laboratoires sont plus semblables que ce qui avait été obtenu lors de la série CU.

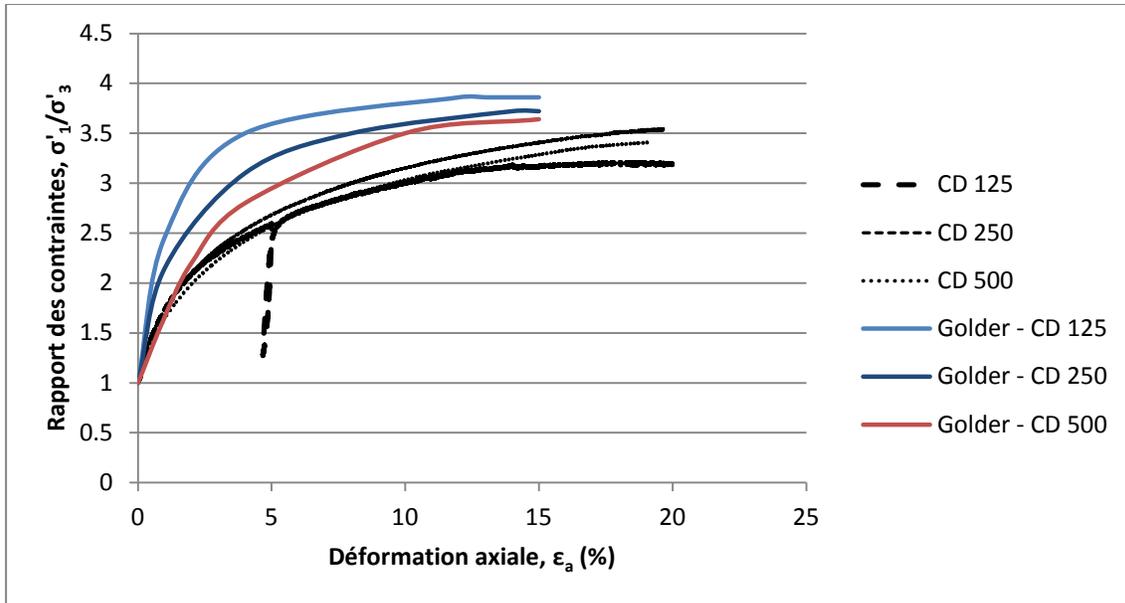


Figure 4.14 : Rapports des contraintes principales en fonction de la déformation axiale pour les essais CD effectués par Golder et Associés et l'Université de Sherbrooke [19]

4.2.1.3 Consolidation isotrope, mise en place par compactage (IC MT)

Les résultats présentés ici concernent la phase de consolidation isotrope effectuée avant tous les essais triaxiaux mis en place par compactage, ainsi qu'un essai de consolidation effectué dans des conditions similaires. Ces résultats s'appuient sur les mesures de changement de volume des échantillons lors de la phase de consolidation dans l'appareil triaxial. Ces mesures sont possibles, car cet appareil est équipé d'un contrôleur de volume (ELDPC) offrant une bonne précision (1 mm^3).

Ceci permet d'établir la courbe présentée à la Figure 4.15, qui présente la contrainte effective moyenne (σ'_m) en fonction de la contrainte volumétrique (ϵ_v). Les points marqués « IC » représentent la déformation volumétrique lors de la phase de consolidation isotrope (IC) de 10 essais CU et CD, mis en place par compactage. Une courbe de tendance exponentielle a été insérée afin de mieux représenter l'allure de cette distribution. La série « sat-con 3 » représente les mêmes déformations obtenues lors d'un essai contenant uniquement une phase de consolidation isotrope. Il apparaît clairement que l'échantillon « sat-con 3 » se comporte de façon similaire aux échantillons ayant subi le cisaillement, ce qui valide l'utilisation de ceux-ci comme indicateurs du comportement de consolidation isotrope. Par ailleurs, l'allure parabolique de cette distribution est similaire aux résultats usuels obtenus lors de chargements semblables sur des sols granulaires, notamment ceux de Rodriguez-Roa [37].

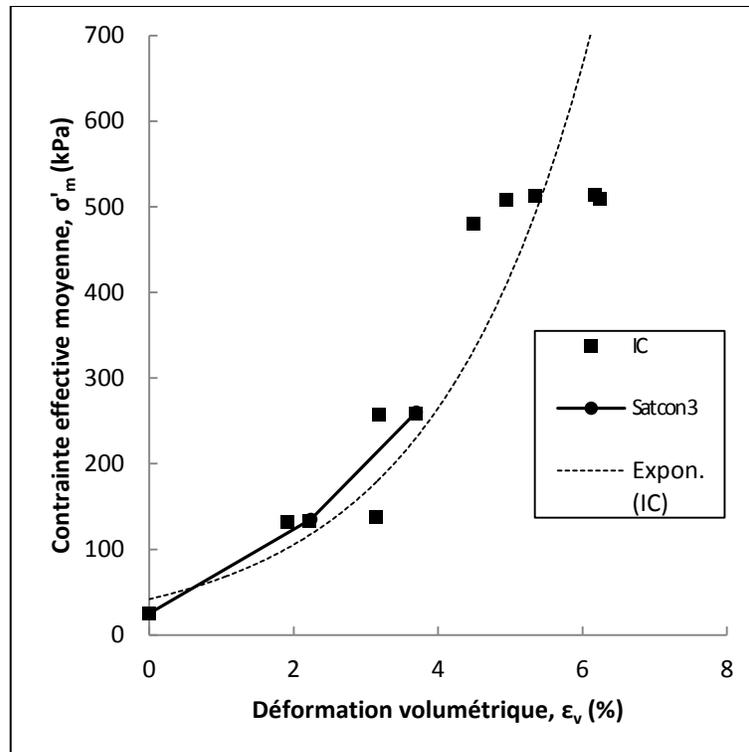


Figure 4.15 : Consolidation isotrope des échantillons MT

4.2.1.4 Essais triaxiaux consolidés non-drainés, mise en place par déposition hydraulique (CU HD)

Cette section compare les résultats de deux essais CU dont les échantillons ont été mis en place de façon différente, afin d'évaluer l'impact de celle-ci. Le premier échantillon a été mis en place par déposition hydraulique (HD), tel que décrit à la section 3.3.2.1.2. Le deuxième a été mis en place en utilisant la méthode de la compactage humide (MT), décrite à la section 3.3.2.1.1.

Le Tableau 4.4 présente certains paramètres importants relatifs à la mise en place et au chargement lors de ces deux essais. Par ailleurs, la Figure A2.13 et la Figure A2.14, à l'Annexe 2, contiennent plus d'informations à ce sujet. Il est important de souligner que les deux échantillons ont été mis en place à des densités initiales les plus similaires possibles. L'essai par déposition hydraulique a été effectué en premier, car la compactage humide permet un meilleur contrôle sur la densité initiale visée. Au final, l'échantillon MT a été mis en place à une masse volumique sèche (ρ_d) de 1545 kg/m³, et l'échantillon HD a atteint 1554 kg/m³. Par ailleurs, l'échantillon MT a été mis en place à 86,1 % solides, comparativement à 77,2% pour l'échantillon HD. Ce-dernier s'approche un peu plus du pourcentage de solides visé sur le terrain, soit 68%.

La méthode de saturation n'a pas été la même pour ces deux essais. L'échantillon MT a subi une saturation en 3 étapes, similaires en ce sens aux essais CD MT, avec circulation de CO₂. Ceci a permis d'obtenir un *B* de 0,95 après saturation. De son côté, l'échantillon HD a subi une saturation en 2 étapes, sans utilisation de CO₂. Ceci a permis d'obtenir un *B* de 0,9, ce qui est acceptable. Il a été choisi de ne pas faire circuler de CO₂ afin de ne pas altérer la microstructure de l'échantillon, toujours dans l'optique d'imiter le mieux possible les conditions de terrain. Finalement, la vitesse de chargement est identique dans les 2 cas.

Tableau 4.4 : Conditions d'essai pour les CU MT et HD

Paramètres	CU 250 MT	CU 250 HD
e_i	0,786	0,776
ρ_{di} (kg/m ³)	1545	1554
w_i (%)	0,162	0,296
% solides (%)	0,861	0,772
Saturation	3 étapes	2 étapes
<i>B</i>	0,95	0,9
Vitesse chargement (mm/min)	0,1	0,1

La Figure 4.16 présente l'évolution du déviateur en fonction de la déformation axiale pour les deux essais mentionnés plus haut. Son observation révèle une différence de comportement majeure : l'essai MT connaît un adoucissement, alors que l'essai HD présente un durcissement. En effet, le premier présente un pic de résistance (208 kPa), suivi par une diminution de celle-ci jusqu'à atteindre un état résiduel inférieur (140 kPa). À l'inverse, la résistance de l'essai HD ne cesse d'augmenter, bien qu'un changement de pente soit observable lorsque le déviateur dépasse environ 110 kPa. Donc, selon le cadre adopté à la section 2.4.2.2.5, l'échantillon MT est susceptible à la liquéfaction statique, alors que l'échantillon HD ne l'est pas. Il est à noter que les pentes initiales sont semblables pour les deux essais.

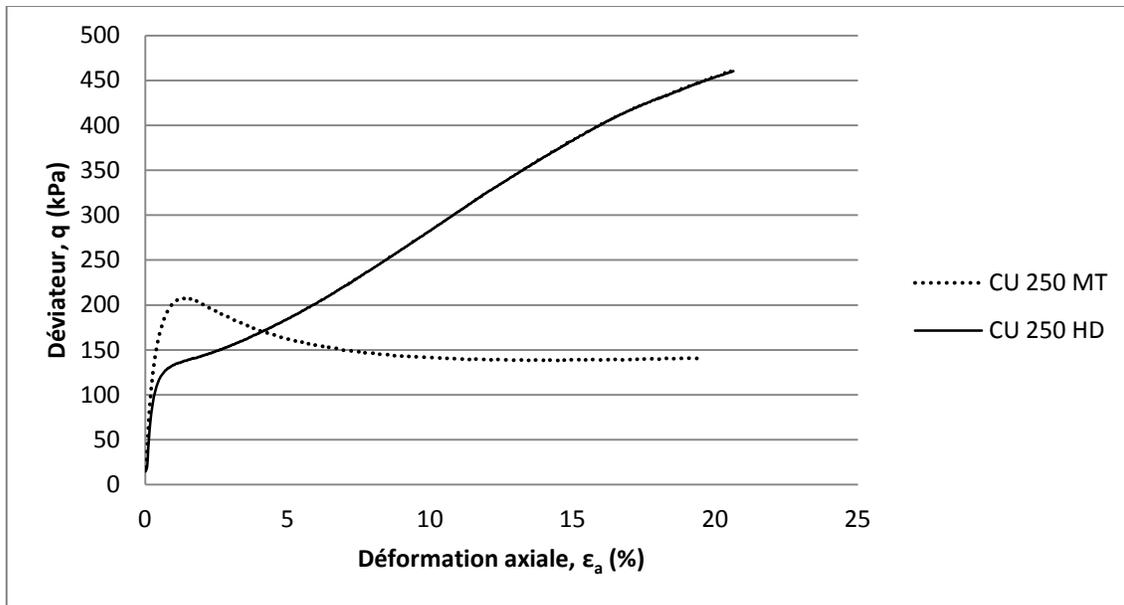


Figure 4.16 : Déviateur en fonction de la contrainte axiale, CU MT et HD

Par ailleurs, le comportement déviatoire exposé à la figure précédente est très semblable à ce qui est rapporté par Benhamed et al. à la Figure 2.16. C'est donc dire que pour les essais CU effectués ici, la mise en place a un effet similaire à ce qui est rapporté dans la littérature sur les sables.

La Figure 4.17 présente l'évolution des pressions interstitielles en excès en fonction de la déformation axiale. Son observation révèle que l'échantillon MT subit une augmentation de pression interstitielle durant tout l'essai. Il s'agit d'un comportement clairement contractant. Quant à l'échantillon HD, il présente une augmentation initiale de pression interstitielle, suivie par une diminution de celle-ci à grandes déformations. Ce type de comportement est partiellement dilatant.

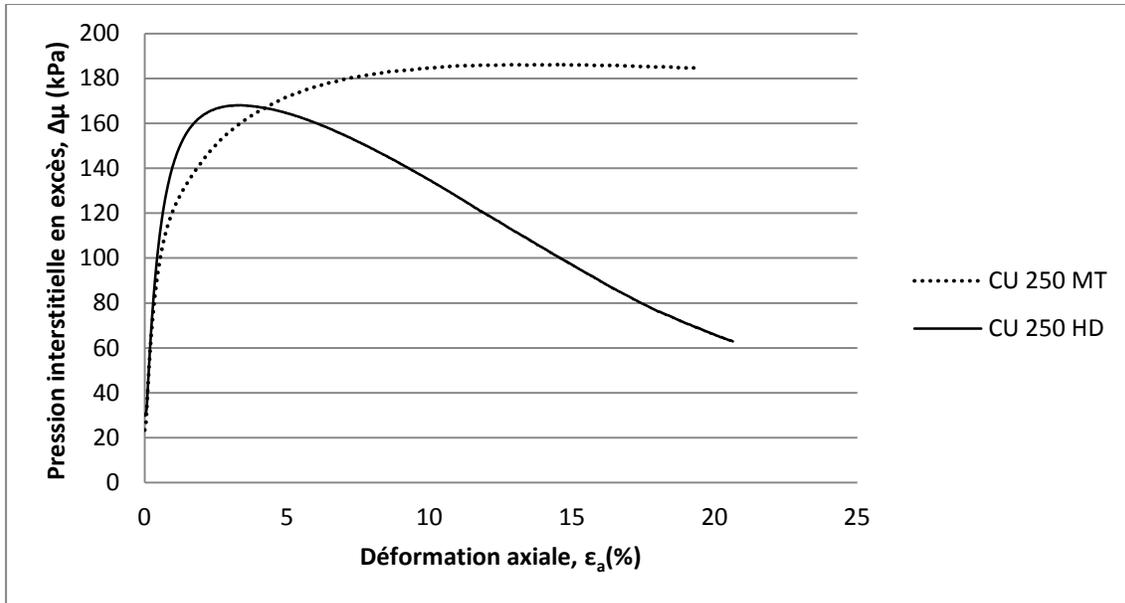


Figure 4.17 : Pressions interstitielles en excès en fonction de la déformation axiale, série CU MT et HD

La Figure 4.18 présente l'évolution du rapport des contraintes effectives principales en fonction de la déformation axiale. Cette fois-ci, les deux essais présentent une évolution similaire, bien que le rapport σ'_1/σ'_3 maximal soit plus grand pour l'échantillon HD (3,58) que pour le MT (3,12). Tel qu'il sera démontré un peu plus loin, ceci témoigne d'une meilleure résistance au cisaillement pour l'échantillon HD.

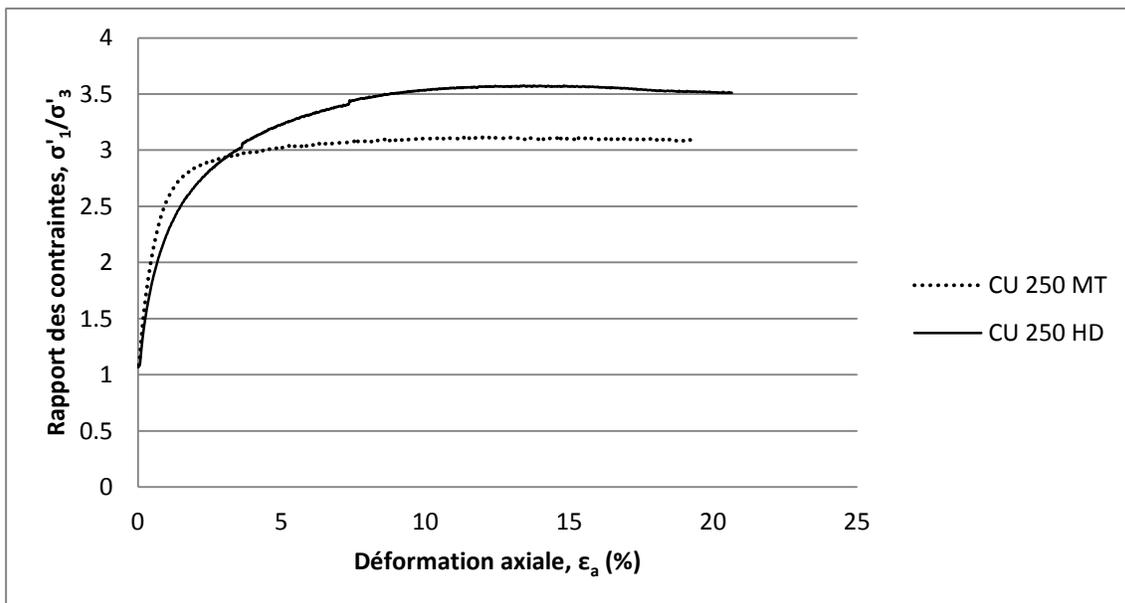


Figure 4.18 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, essais CU MT et HD

La Figure 4.19 présente le cheminement de contraintes pour ces essais. Elle révèle tout d'abord des comportements très différents. L'échantillon MT courbe vers la gauche, avec un

pic de résistance, alors que l'échantillon HD courbe initialement vers la gauche, pour ensuite bifurquer vers la droite, en formant un coude. Il est à noter que les deux échantillons connaissent une phase initiale où le déviateur augmente très peu. Ceci est normal et est souvent dû à un léger tassement de l'échantillon dans la cellule triaxiale au début du cisaillement. Cet effet n'a pas été corrigé ici afin de conserver les rapports de contraintes intacts.

Toujours à la même figure, différentes étapes sont illustrées par des formes géométriques. Les losanges indiquent la fin de la consolidation pour les deux essais. Le carré correspond au déviateur maximal atteint par l'échantillon MT. Les triangles correspondent aux états résiduels pour chacun des essais, soit quand le rapport σ'_1/σ'_3 est maximal. De plus, des angles de friction effectifs associés à chacun de ces états, peuvent être visualisés dans le plan $q-p'$. Il est à noter que ces angles de friction ont été obtenus à partir de l'équation (4.1).

À ce titre, l'échantillon MT est caractérisé par un angle de friction au pic de $27,4^\circ$, et un angle résiduel de $30,9^\circ$. Tel qu'établit plus haut, l'échantillon HD ne présente pas de pic. Il possède donc uniquement un angle de friction résiduel, qui s'établit à $34,3^\circ$. Selon ces résultats, l'échantillon HD présente une résistance résiduelle supérieure d'environ 12%, et ce seulement à cause d'une mise en place différente. Bien que l'essai HD ne possède pas de pic, le coude marquant une bifurcation vers la droite s'aligne avec le pic de l'essai MT.

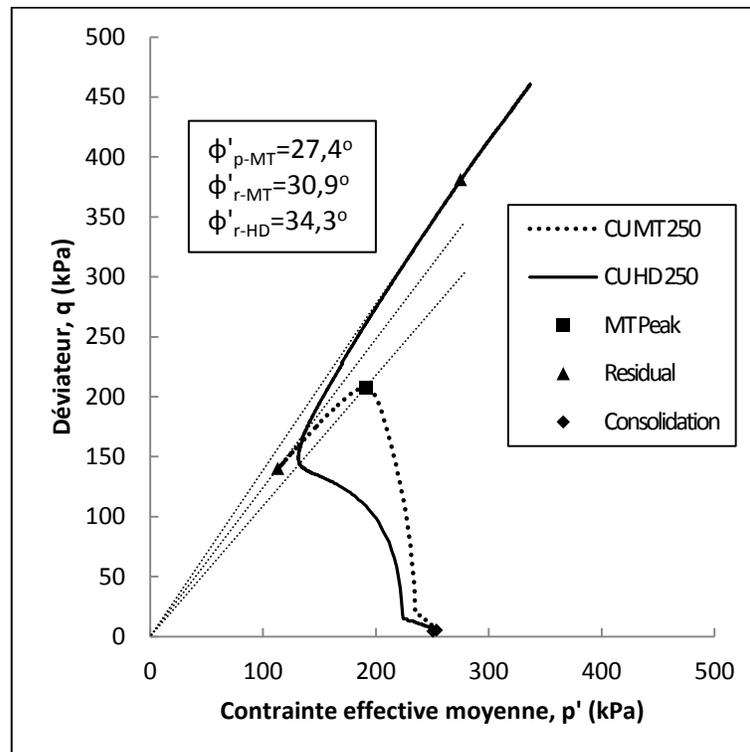


Figure 4.19 : Cheminement de contraintes pour les essais CU MT et HD

La Figure 4.20 présente l'indice des vides en fonction de la contrainte effective moyenne pour tous les essais CU réalisés dans le cadre de ce projet, c'est-à-dire la série CU MT, ainsi que les deux essais concernés par cette section. Le cheminement effectué par l'essai CU MT est illustré par une ligne horizontale pointillée. Les losanges noirs correspondent à la phase de consolidation pour les quatre essais CU mis en place par compactage, ainsi que pour l'essai IC « sat-con 3 ». Les carrés noirs représentent les états de déviateur maximal pour les essais CU MT. Finalement, les triangles noirs correspondent à l'état critique pour ces mêmes essais. Des régressions linéaires ont permis d'obtenir la NCL (ligne pointillée) et la CSL (ligne pleine). Ces deux droites sont parallèles, ce qui est conforme à la théorie.

Par ailleurs, la fin de consolidation de l'essai CU HD est représentée sur cette figure par un losange bleu. L'état critique n'a pas été tracé pour cet essai, car tel qu'indiqué à la Figure 4.17, l'échantillon subissait encore une variation de pression interstitielle à la fin de l'essai. Il aurait donc fallu prolonger la déformation pour atteindre l'état critique. Néanmoins, il apparaît clairement que le point de fin de consolidation de l'essai HD ne s'inscrit pas sur la NCL des échantillons MT.

Il est possible que la méthode de mise en place affecte la NCL. Au niveau de la CSL, certains auteurs estiment qu'elle est indépendante de la mise en place [23]. Il se pourrait également que l'échantillon CU HD ait été surconsolidé, ce qui expliquerait pourquoi il ne se retrouve pas sur la NCL. Il serait intéressant d'effectuer plus d'essais CU HD et de les amener jusqu'à l'état critique, afin de voir si la méthode de mise en place affecte la CSL pour ce type de matériau. Toutefois, ceci dépasse le cadre de ce projet.

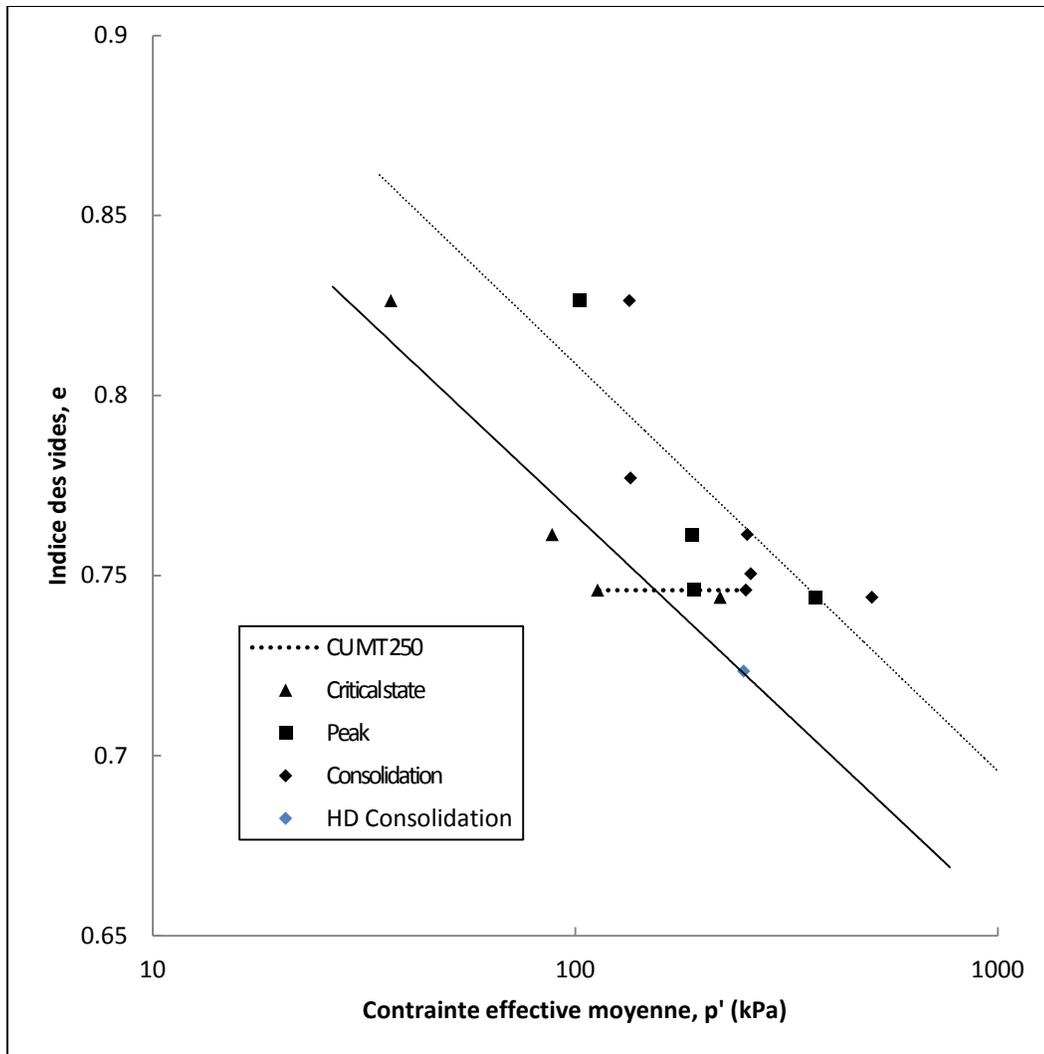


Figure 4.20 : CSL et NCL pour les essais CU

4.2.1.5 Essais triaxiaux consolidés drainés, mise en place par déposition hydraulique (CD HD)

Cette section présente les résultats d'essais consolidés drainés, mis en place par déposition hydraulique, selon la méthode décrite à la section 3.3.2.1.2. Les échantillons ont été déposés à une teneur en eau initiale d'environ 30%, soit 77% solide. Par ailleurs, la densité initiale des trois échantillons formant cette série présente une certaine variabilité. Le Tableau 4.5 résume ces différences, et il apparaît que l'échantillon CD HD 125 a été mis en place à une densité inférieure (1545 kg/m^3) à celle des deux autres essais (1612 kg/m^3 et 1628 kg/m^3). Il s'agit là d'un des inconvénients de la méthode de mise en place hydraulique, qui permet un moins bon contrôle sur la densité initiale de l'échantillon.

Tableau 4.5: Comparaison des densités initiales pour la série CD HD

Essai	ρ_{di} (kg/m ³)	e_i
CD HD 125	1545	0,786
CD HD 250	1612	0,712
CD HD 500	1628	0,695

Suite à la déposition, les échantillons ont été saturés en deux étapes, avec circulation d'eau désaérée et imposition d'une contre-pression de 490 kPa. Ceci a permis d'atteindre des valeurs de B de l'ordre de 0,9. Les valeurs de B atteintes lors de chacun des essais, ainsi que d'autres paramètres, sont présentés aux Figure A2.15 à Figure A2.18, à l'Annexe 2. Après la saturation, les échantillons ont été consolidés puis cisailés à une vitesse de 0,005 mm/min. Cette vitesse a permis de réduire le temps nécessaire aux essais par rapport à la série CD MT. Néanmoins, aucunes pressions interstitielles n'ont

été générées durant ces essais, tel qu'illustré à la Figure A2.19 de l'Annexe 2.

L'objectif de cette série d'essais était avant tout d'obtenir des modules élastiques initiaux (E_i) pour des échantillons mis en place par déposition hydraulique. Afin de gagner du temps, les essais ont été menés jusqu'à une déformation axiale de 10%, ce qui est amplement suffisant pour déterminer le E_i . Cependant, ceci fait en sorte que l'état résiduel, correspondant au $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$, n'a pas été atteint. Les cercles de Mohr ne seront donc pas tracés pour cette série, ni la CSL. Les E_i obtenus dans le cadre de cette série seront utilisés plus loin afin d'établir une comparaison avec les mesures de vitesses de cisaillement. Les courbes contraintes déformations relatives à cette série sont tout de même présentées ici.

La Figure 4.21 illustre le déviateur en fonction de la contrainte axiale pour la série CD HD. Les trois essais présentent des courbes similaires, sans pic de résistance. Ceci est semblable aux résultats obtenus pour les essais CD MT.

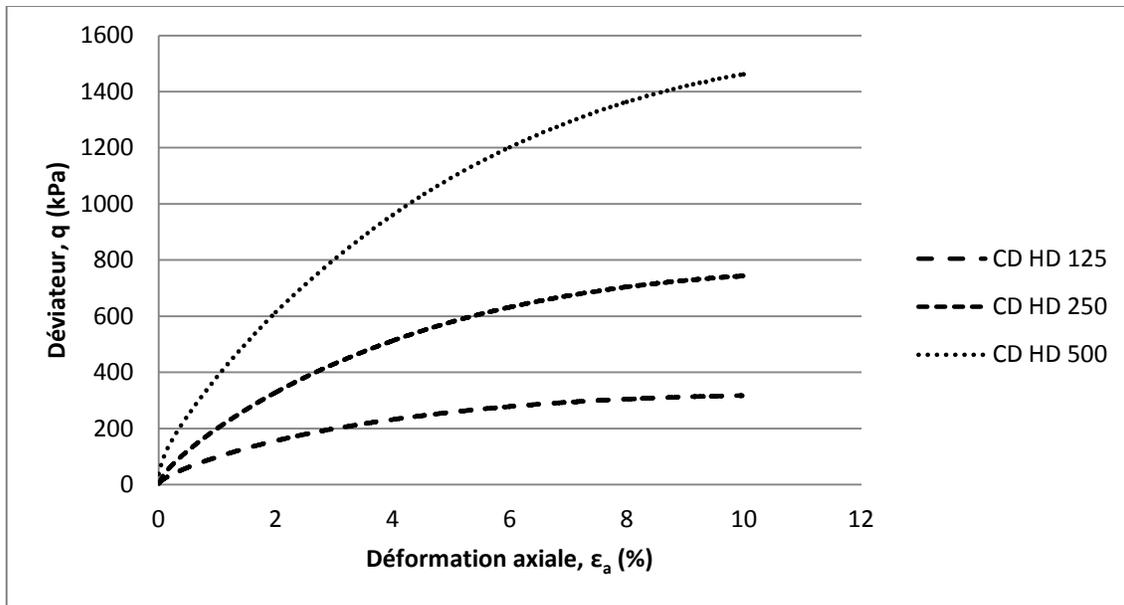


Figure 4.21 : Déviateur en fonction de la contrainte axiale, série CD HD

La Figure 4.22 présente le rapport des contraintes effectives principales en fonction de la déformation axiale. Tel que mentionné précédemment, des échantillons de même densité devraient parvenir au même rapport à l'état résiduel. Même si l'état résiduel n'est pas tout à fait atteint ici, il est facile de voir que les essais CD HD 250 et CD HD 500 tendent vers des σ'_1/σ'_3 semblables (environ 3,88). Ces deux essais avaient été mis en place à des densités initiales assez similaires (voir Tableau 4.5). Quant à l'essai CD HD 125, il avait été mis en place de façon plus lâche, et ceci se reflète à la Figure 4.22 par un rapport σ'_1/σ'_3 inférieur (3,35).

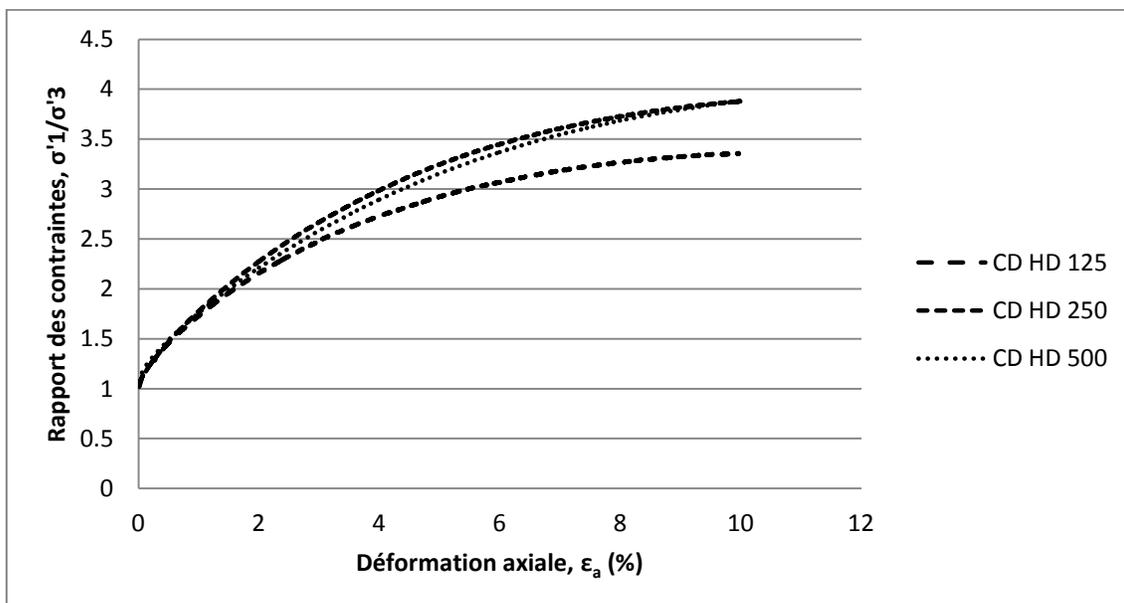


Figure 4.22 : Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale, série CD HD

La Figure 4.23 illustre les déformations volumétriques en fonction de la déformation axiale pour cette série. La déformation volumétrique a été obtenue à partir de l'équation (2.2). Il a été énoncé précédemment que les déformations volumétriques obtenues lors de la série CD MT présentent certaines irrégularités, probablement dues à une fuite de pression cellulaire vers l'intérieur de l'échantillon. Les mesures prises pour corriger ce problème semblent avoir porté fruit, puisque les déformations volumétriques obtenues ici sont très cohérentes. Les trois échantillons présentent des formes similaires, et celles-ci sont de plus en plus prononcées pour des niveaux de confinement plus importants.

Par ailleurs, il est à noter que les 3 courbes illustrées à la Figure 4.23 présentent un comportement initialement contractant, qui devient dilatant par la suite. Ceci est tout à fait en accord avec le comportement observé lors de l'essai CU HD, ce qui tend à confirmer les observations faites plus tôt quant à l'influence de la méthode de mise en place sur le comportement volumétrique des échantillons cisailés. Comme lors des essais CU, les échantillons drainés présentent un comportement partiellement dilatant. Malheureusement, la comparaison avec les déformations volumétriques obtenues lors des essais CD MT est difficile, car il a été établi que ces déformations avaient été faussées par une fuite. Finalement, il est pertinent d'ajouter qu'aucun des échantillons CD HD n'a atteint d'état critique, c'est-à-dire un moment où le cisaillement s'effectue sans changement de volume. Pour cette raison, la CSL ne sera pas tracée pour cette série.

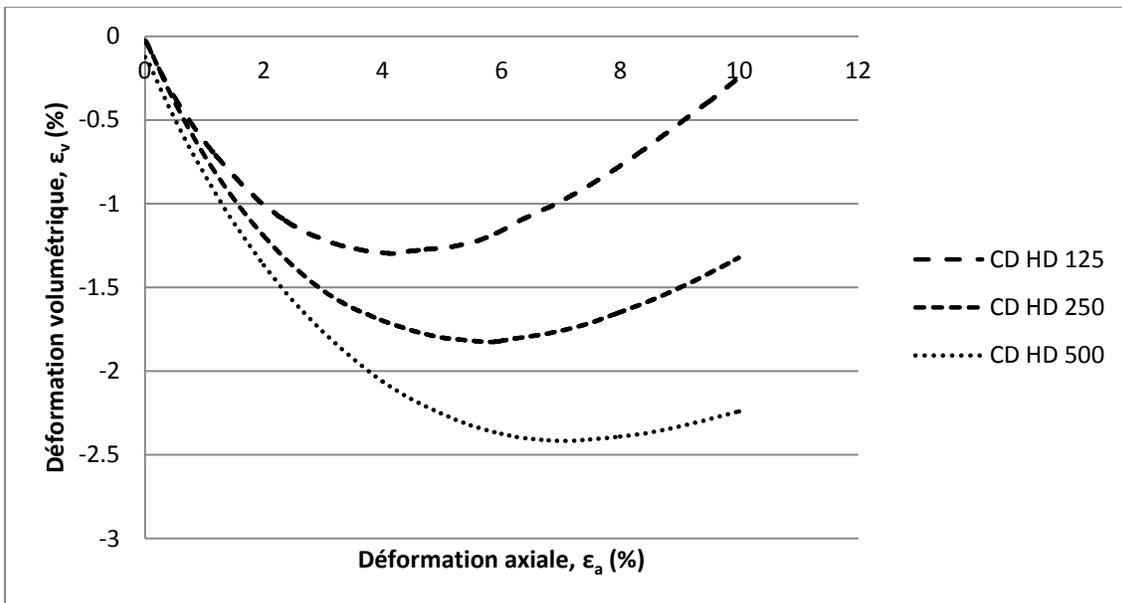


Figure 4.23 : Déformations volumétriques en fonction de la déformation axiale, série CD HD

Néanmoins, il est possible d'ajouter les états de fin de consolidation pour cette série afin d'obtenir une NCL pour les essais HD, représentée par une droite bleue sur la Figure 4.24. Dans cette figure, les losanges noirs représentent la fin de consolidation pour les essais MT,

et les losanges bleus, la même chose pour les essais HD. En reliant ces points, il est possible de tracer la NCL pour les essais MT (ligne pointillée noire) et pour les essais HD (ligne bleu pleine). Il apparaît alors clairement que la pente de la NCL n'est pas la même.

Tel que mentionné, la CSL ne peut être tracée pour ces essais, car aucun n'échantillon HD n'a atteint d'état critique. D'autres essais, amenés à plus grande déformation, seraient nécessaires à l'établissement d'une CSL.

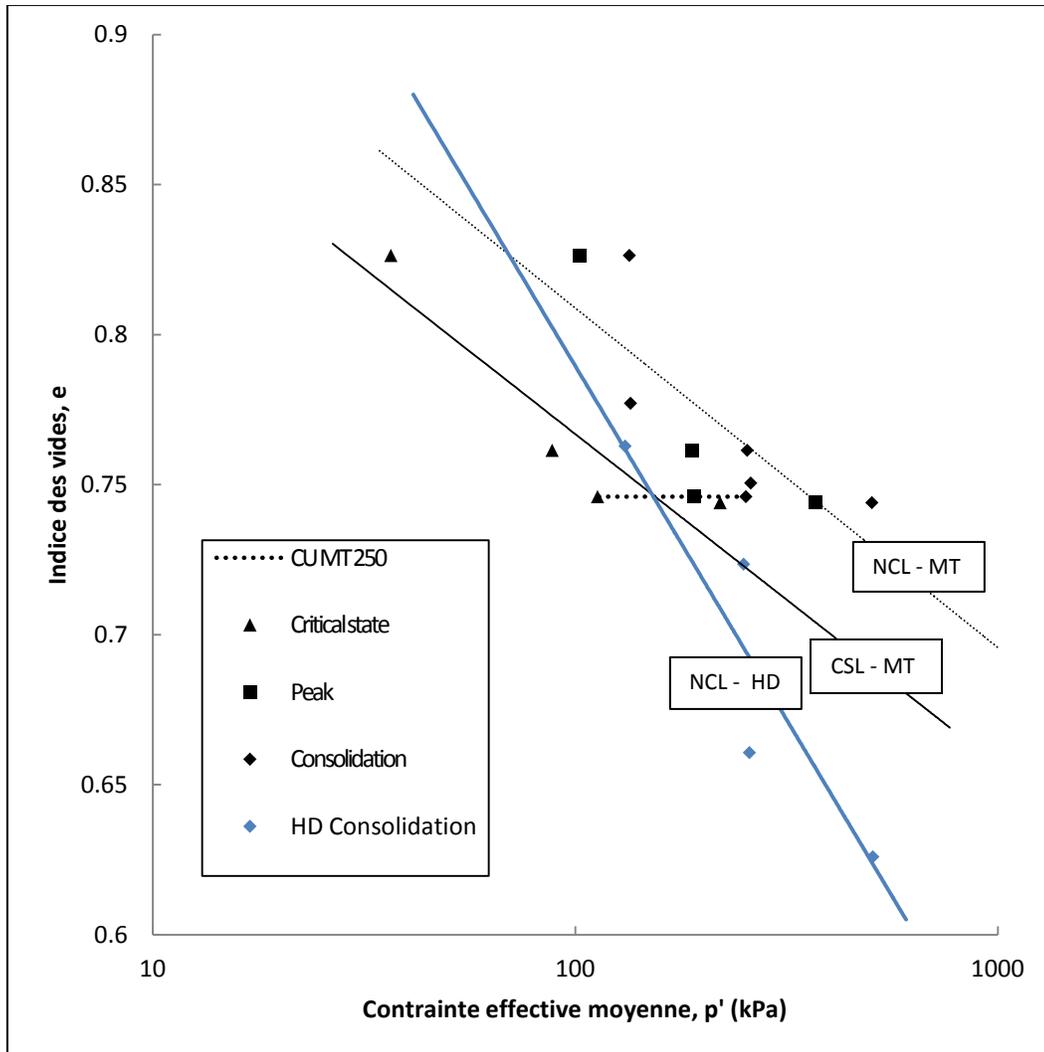


Figure 4.24 : NCL et CSL, séries MT et HD

4.2.1.6 Consolidation isotrope, mise en place par déposition hydraulique (IC MT)

Les résultats présentés ici concernent la phase de consolidation isotrope effectuée avant tous les essais triaxiaux mis en place par déposition hydraulique. La Figure 4.25 présente la contrainte effective moyenne (σ'_m) en fonction de la contrainte volumétrique (ϵ_v). Les points

nommés « IC » représentent la déformation volumétrique lors de la phase de consolidation isotrope (IC) des échantillons mis en place par déposition hydraulique. Une courbe de tendance exponentielle a été insérée afin de mieux représenter l'allure de cette série. L'allure parabolique de cette distribution est similaire aux résultats obtenus lors de la consolidation isotrope des échantillons mis en place par compactage (voir Figure 4.15).

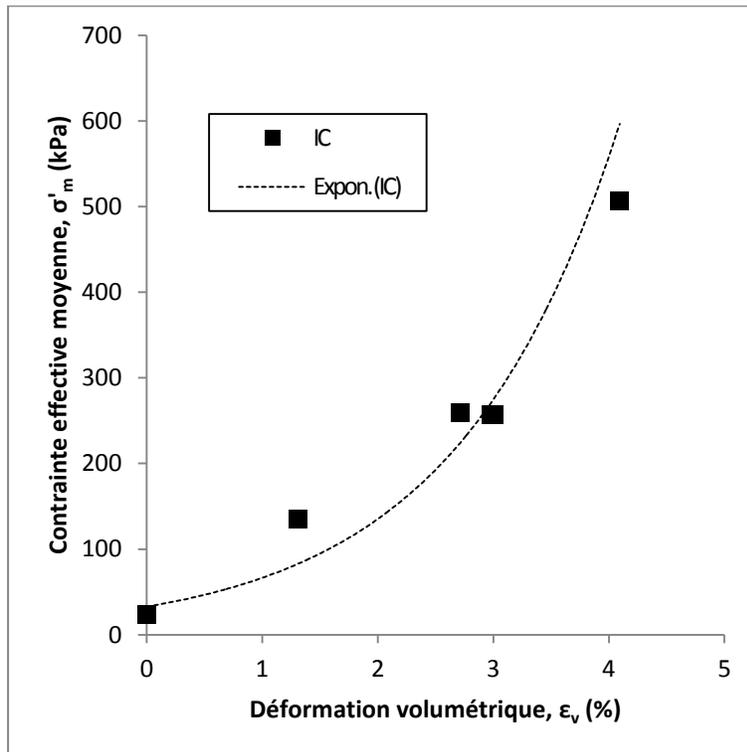


Figure 4.25 : Consolidation isotrope des échantillons HD

4.2.2 Modèle de Duncan et Chang

Afin de valider et d'interpréter les résultats obtenus au laboratoire lors des essais triaxiaux drainés, le modèle hyperbolique de Duncan et Chang a été employé. Celui-ci a été choisi pour sa simplicité et sa capacité à reproduire des cisaillements drainés dans des matériaux granulaires. Des simulations, effectuées dans le logiciel EXCEL selon la méthode décrite à la section 3.3.2.2, ont permis de représenter les essais effectués au laboratoire à l'aide de ce modèle. Cette section présente les résultats obtenus pour les essais mis en place par compactage et par déposition hydraulique.

4.2.2.1 Série mise en place par compactage (CD MT)

Les modules élastiques initiaux (E_i) ont tout d'abord été déterminés pour les échantillons de la série drainée mise en place par compactage. Ces modules sont présentés dans la deuxième colonne du Tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Modules élastiques initiaux expérimentaux, série CD MT

Essai	E_i labo (kPa)	E_i lissé (kPa)
CD MT 125	12890	16751
CD MT 250	34991	29860
CD MT 500	53946	52231

Par la suite, l'équation (2.8) a été utilisée afin d'obtenir un lissage des E_i , selon la méthode des moindres carrés, tel qu'illustré à la Figure 4.26. Les valeurs lissées, également présentées au Tableau 4.6, ont été utilisées pour la suite des calculs.

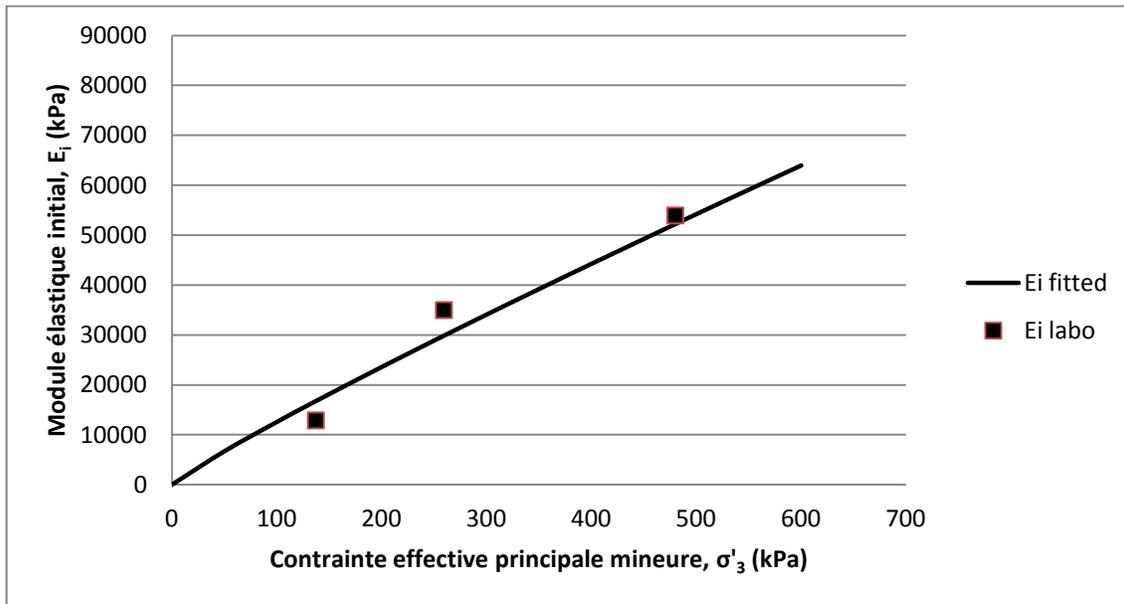


Figure 4.26 : Lissage des modules élastiques initiaux, série CD MT

Le lissage de l'équation (2.8) selon les moindres carrés a permis d'obtenir les paramètres présentés au Tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Paramètres de lissage des modules élastiques initiaux, série CD MT

κ	n
125	0,91

Une fois les E_i lissés, il est possible d'utiliser l'équation (2.7) afin d'établir un module élastique (E) variant en fonction de la contrainte déviatoire appliquée. Ensuite, les déformations axiales sont calculées selon la loi de Hooke, ce qui permet d'obtenir les courbes présentées à la Figure 4.27. Il apparaît que les courbes modélisées sont très proches des courbes expérimentales, et ce sur toute la plage des déformations. Ceci permet d'affirmer que les résultats de laboratoire présentés à la section 4.2.1.2 sont fiables et cohérents entre

eux. Il est à noter que le cycle de chargement-déchargement effectué lors de l'essai CD MT 125 n'a pas été modélisé. En effet, le module d'élasticité obtenu lors d'un cycle de chargement-déchargement est de nature différente à ce qui est exploré ici, soit le module élastique initial (E_i).

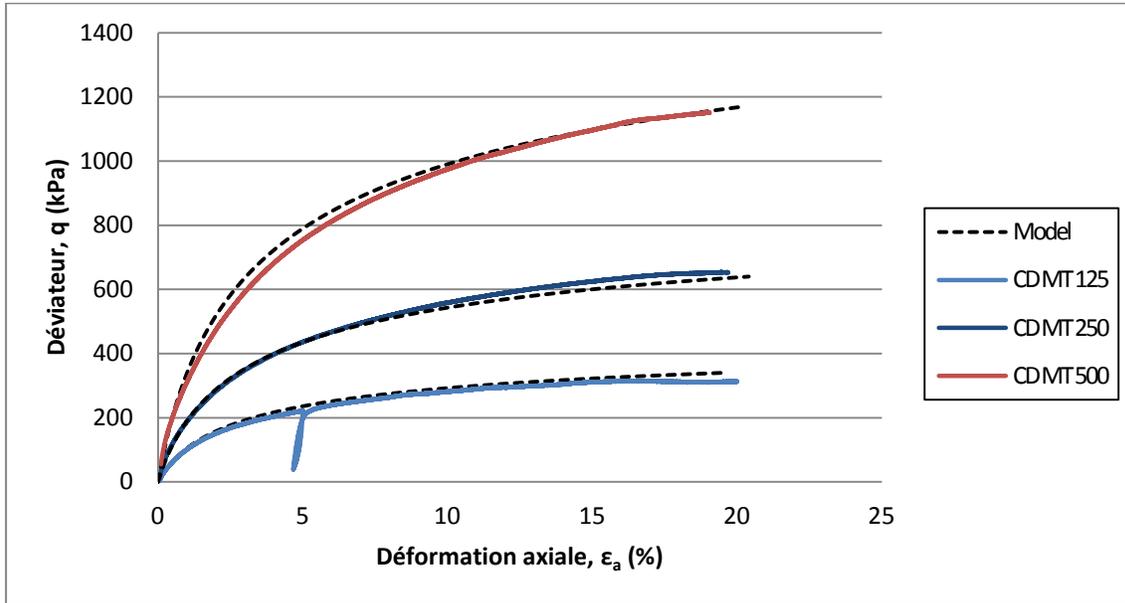


Figure 4.27 : Modélisation du déviateur en fonction de la contrainte axiale, série CD MT

Les courbes de la Figure 4.27 ont été lissées selon la méthode des moindres carrés, ce qui a permis d'obtenir les paramètres de modélisation présentés au Tableau 4.8. L'angle de friction obtenu par lissage ($33,2^\circ$) est très proche de ce qui avait été déterminé par la méthode des cercles de Mohr pour la série CD MT ($32,9^\circ$).

Tableau 4.8: Paramètres pour la modélisation du comportement déviatoire, série CD MT

R_f	c (kPA)	φ ($^\circ$)
0.66	0	33,2

Il est également possible de reproduire l'étape de consolidation isotrope, préalable au cisaillement triaxial, par le modèle de Duncan et Chang. Le lissage de l'équation (2.9), par les moindres carrés, permet de tracer la contrainte moyenne en fonction de la déformation volumétrique, tel qu'illustré à la Figure 4.28. Il apparaît que le modèle correspond très bien aux essais effectués au laboratoire, nommés « IC » et « Sat con 3 ».

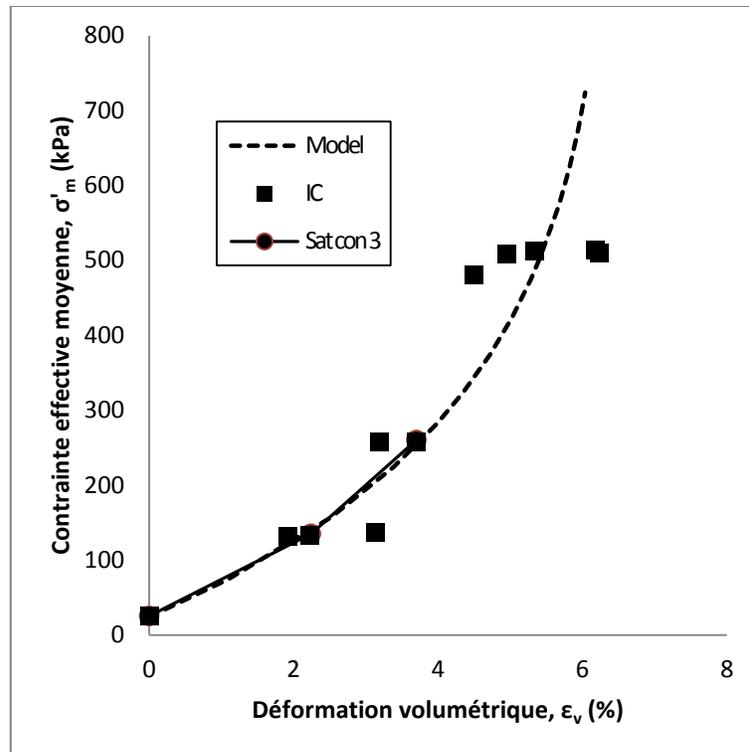


Figure 4.28 : Modélisation de la consolidation isotrope, série CD MT

Ce lissage a permis d’obtenir les paramètres présentés au Tableau 4.9. Il est à noter que ce lissage a été effectué pour tous les essais triaxiaux mis en place selon la méthode de compactage, peu importe le type de drainage imposé lors du cisaillement.

Tableau 4.9 : Paramètres de modélisation de la consolidation isotrope, série CD MT

K_i (kPa)	ϵ_u (%)
4174	25,2

De plus, il est possible de modéliser le comportement volumétrique lors de l’essai triaxial à partir des paramètres du Tableau 4.9. Encore une fois, la loi de Hooke est utilisée. Par contre, la pression de confinement sert alors de pression de référence, ce qui n’était pas le cas lors des simulations de consolidation isotrope. Ceci a permis de créer les courbes présentées à la Figure 4.29 pour les 3 essais de la série CD MT.

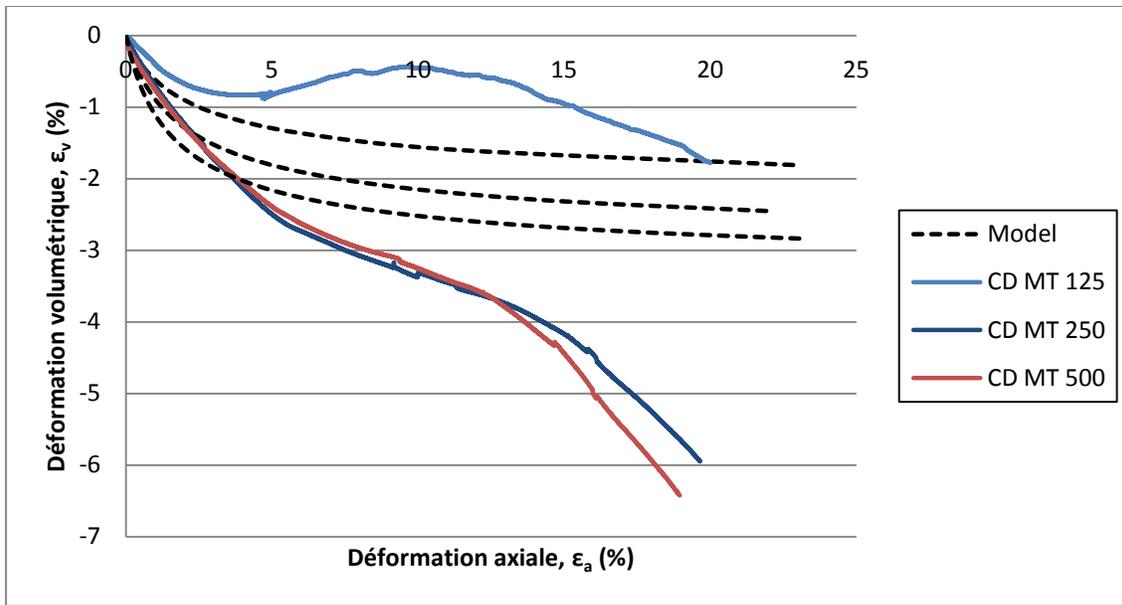


Figure 4.29 : Modélisation des déformations volumétriques lors du cisaillement, série CD MT

L'observation de cette figure révèle que le modèle ne correspond pas aux courbes de laboratoire, et ce à plusieurs endroits. Tout d'abord, la pente initiale des courbes modélisées est plus marquée que celle obtenue au laboratoire, surtout dans le cas de l'essai CD MT 125. Les pentes initiales obtenues au laboratoire ne sont pas très cohérentes entre elles, et en ce sens, le modèle présente une allure plus classique. Ensuite, les courbes modélisées présentent une forme parabolique simple, alors que les courbes de laboratoire présentent des points d'inflexions. Il s'agit là d'une limitation du modèle utilisé. Finalement, les courbes modélisées présentent des déformations qui augmentent avec le niveau de confinement, ce qui n'est pas le cas pour les courbes de laboratoire.

Tel qu'énoncé à la section 4.2.1.2, les déformations volumétriques enregistrées au laboratoire pour la série CD MT ont probablement été faussées par une fuite de pression cellulaire vers l'intérieur de l'échantillon. Il n'est donc pas possible de comparer les résultats du modèle à des résultats de laboratoire fiables. Néanmoins, les courbes du modèle, à la Figure 4.29, semblent plus cohérentes entre elles que les courbes de laboratoire. Ceci vient renforcer l'hypothèse voulant que ces dernières soient erronées.

La dernière étape de cette modélisation est d'obtenir des modules de cisaillement à grandes déformations. Le Tableau 4.10 présente ces paramètres pour les trois essais de la série CD MT, ainsi que pour un essai additionnel mis en place de la même façon, et consolidé à 125 kPa. Cet essai est nommé « CD MT 125, test 1 ».

Tableau 4.10 : Modules de cisaillement à grande déformation, série CD MT

Essai	σ'_m (kPa)	E_i (MPa)	K (MPa)	G (MPa)	G_n (MPa)
CD MT 125, test 1	131,9	16,15	5,29	8,15	7,09
CD MT 125	137,3	16,75	5,34	8,57	7,32
CD MT 250	259,4	29,86	6,48	20,4	12,7
CD MT 500	480,1	52,23	8,86	50,4	23,0

Le tableau précédent présente tout d'abord la contrainte de confinement effective (σ'_m) au début du cisaillement pour chaque essai. La colonne suivante contient le module élastique initial lissé (E_i) correspondant à cette σ'_m . Vient ensuite le module de compressibilité (K), lui aussi lissé pour la σ'_m . Le fait d'utiliser K plutôt que K_i fait en sorte que tous les modules présentés sur une ligne du Tableau 4.10 correspondent à la même contrainte de confinement effective (σ'_m). Finalement, le module de cisaillement est calculé selon l'équation (3.1). Celui-ci est ensuite normalisé selon l'équation (3.4), afin d'obtenir un module de cisaillement indépendant de la σ'_m . G_n augmente néanmoins pour des états plus confinés, mais ceci est plutôt dû à la densité de l'échantillon.

4.2.2.2 Série par déposition hydraulique (HD)

Le même exercice de modélisation a été appliqué à la série d'essais triaxiaux CD HD, encore une fois dans le but de valider les résultats de laboratoire. Les modules élastiques initiaux (E_i) ont tout d'abord été déterminés pour les trois essais de cette série. Ces modules sont présentés dans la deuxième colonne du Tableau 4.11.

Tableau 4.11 : Modules élastiques initiaux expérimentaux, série CD HD

Essai	E_i labo (kPa)	E_i lissé (kPa)
CD HD 125	23674	25010
CD HD 250	43222	41657
CD HD 500	70777	71223

Par la suite, l'équation (2.8) a été utilisée afin d'obtenir un lissage des E_i , selon la méthode des moindres carrés, tel qu'illustré à la Figure 4.30. Les valeurs lissées, également présentées au Tableau 4.11, ont été utilisées pour la suite des calculs.

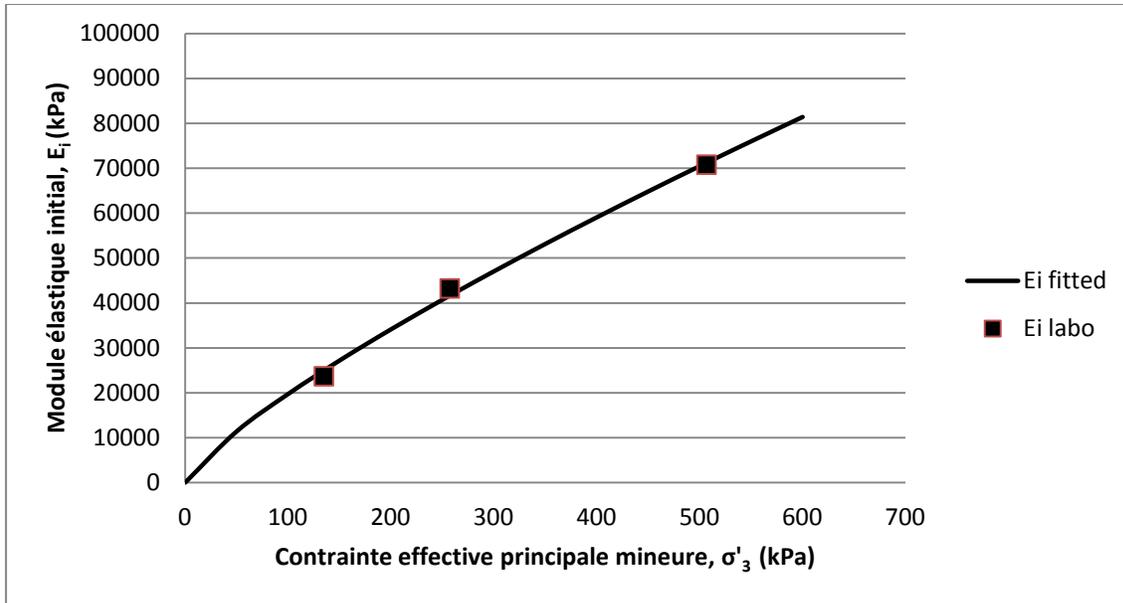


Figure 4.30 : Lissage des modules élastiques initiaux, série CD HD

Le lissage de l'équation (2.8) selon les moindres carrés a permis d'obtenir les paramètres présentés au Tableau 4.12.

Tableau 4.12 : Paramètres de lissage des modules élastiques initiaux, série CD MT

κ	n
197	0.79

L'équation (2.7) permet d'établir un module élastique (E) variant en fonction de la contrainte déviatoire appliquée. Ensuite, les déformations axiales sont calculées selon la loi de Hooke, ce qui permet d'obtenir les courbes présentées à la Figure 4.31. Il apparaît que les courbes modélisées sont proches des courbes expérimentales, mais moins que ce qui avait été obtenu pour la série MT. Ceci peut s'expliquer par le fait que les échantillons de la série HD ont été mis en place à des densités initiales moins uniformes que celles de la série MT. Tel qu'expliqué précédemment, il s'agit là d'un des inconvénients de la mise en place par déposition hydraulique. La modélisation présentée ici repose sur un seul jeu de paramètres afin de reproduire des échantillons quelques peu variables, ce qui explique les écarts qui se retrouvent à la Figure 4.31. Néanmoins, le tout demeure acceptable, et confirme la validité des résultats expérimentaux présentés à la section 4.2.1.5.

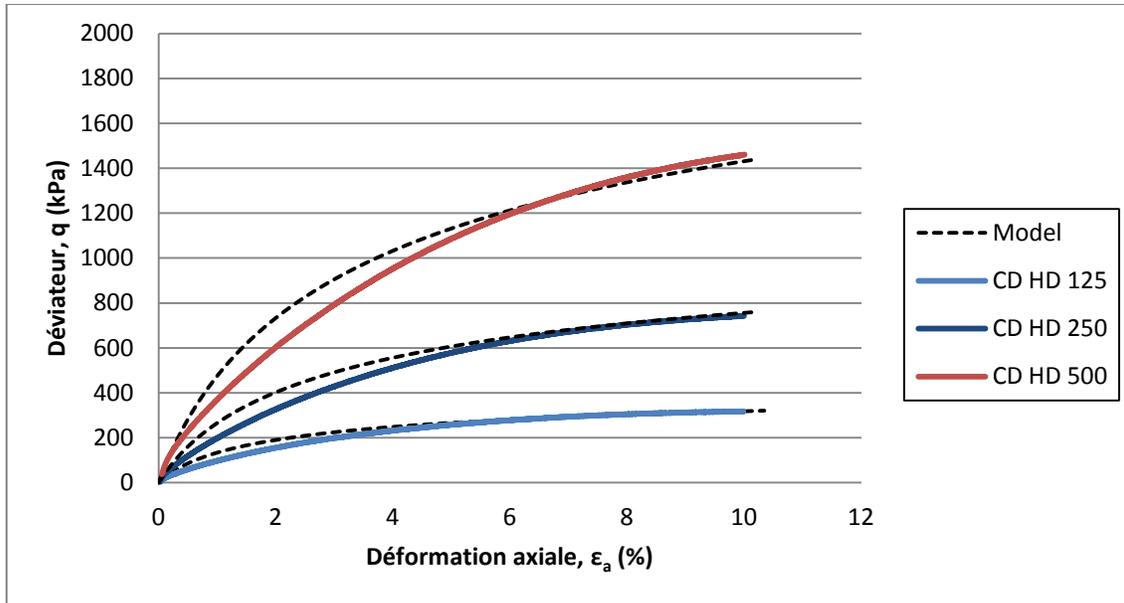


Figure 4.31 : Modélisation du déviateur en fonction de la déformation axiale, série CD HD

Les courbes de la Figure 4.31 ont été lissées selon la méthode des moindres carrés, ce qui a permis d'obtenir les paramètres de modélisation présentés au Tableau 4.13. L'angle de friction obtenu par lissage est de $36,5^\circ$. Il s'agit d'une bonne indication de la valeur possible de l'angle de friction effectif résiduel pour cette série, qui n'avait pu être déterminé à partir des essais de laboratoire.

Tableau 4.13 : Paramètres de modélisation du comportement déviatoire, série CD HD

R_f	c (kPA)	φ' ($^\circ$)
0,57	0	36,5

La modélisation de la consolidation isotrope pour cette série, effectuée grâce à l'équation (2.9), est présentée à la Figure 4.32. Encore une fois, le modèle correspond très bien aux essais de laboratoire.

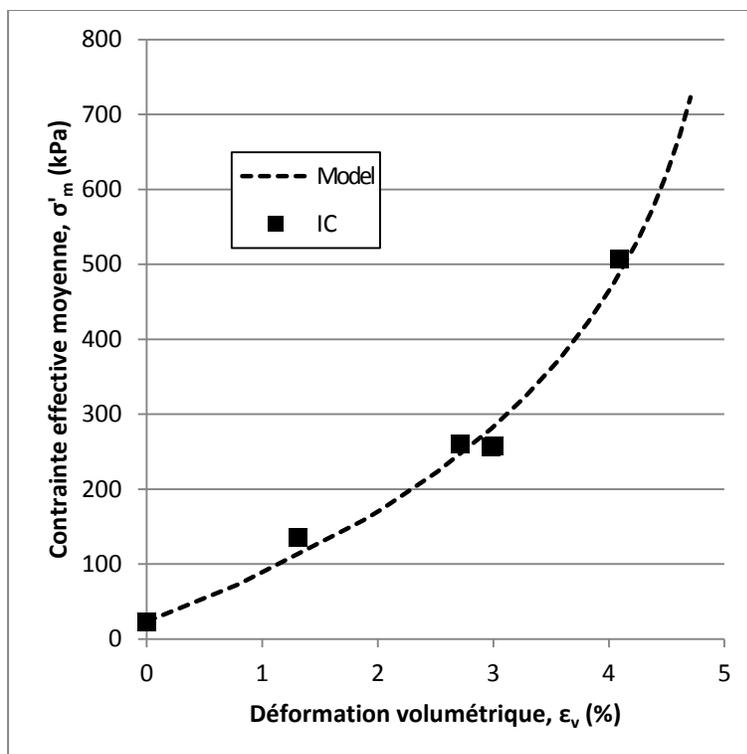


Figure 4.32 : Modélisation de la consolidation isotrope, série CD HD

La courbe présentée à la figure précédente a été obtenue à partir du jeu de paramètres présentés au Tableau 4.14.

Tableau 4.14 : Paramètres de modélisation de la consolidation isotrope, série CD HD

K_i (kPa)	ϵ_u (%)
5786	20,1

Le comportement volumétrique lors du cisaillement a également été modélisé à partir des paramètres présentés au tableau précédent. Les résultats de cette modélisation sont présentés à la Figure 4.33.

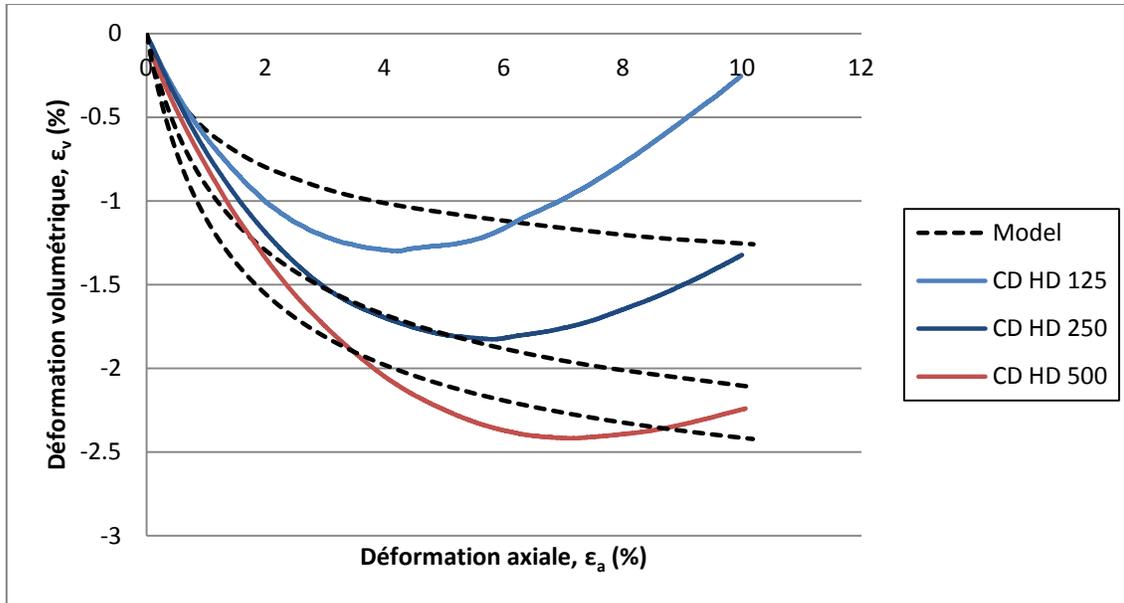


Figure 4.33 : Modélisation des déformations volumétriques lors du cisaillement, série CD HD

L'observation de la figure précédente révèle que le modèle utilisé ici n'est probablement pas le plus adéquat pour simuler le comportement partiellement dilatant de cette série. En effet, le modèle de Duncan et Chang ne possède pas de fonction de dilatance pouvant reproduire un changement de sens du comportement volumétrique. Néanmoins, il est intéressant de constater que les déformations volumétriques maximales obtenues au laboratoire et par le modèle sont assez similaires pour les trois essais. De plus, la déformation volumétrique augmente en fonction du niveau de confinement pour le modèle ainsi que pour les résultats expérimentaux.

La dernière étape de cette modélisation est d'obtenir les modules de cisaillement à grandes déformations (G) pour cette série. Ceux-ci, ainsi que le module élastique initial (E_i) et le module de compressibilité (K), sont présentés au Tableau 4.15. Le fait d'utiliser E_i et K permet de s'assurer que toutes les informations contenues sur une ligne de ce tableau correspondent à la même contrainte de confinement effective (σ'_m). La dernière colonne du Tableau 4.15 contient les modules de cisaillement normalisés (G_n), selon l'équation (3.4). L'augmentation de G_n est donc uniquement due à une augmentation de la densité des échantillons.

Tableau 4.15 : Modules élastiques à grandes déformations, série CD HD

Essai	σ'_m (kPa)	E_i (MPa)	K (MPa)	G (MPa)	G_n (Mpa)
CD HD 125	135,1	25,0	7,21	13,6	11,7
CD HD 250	257,5	41,7	8,64	29,9	18,6
CD HD 500	507,0	71,2	11,9	70,3	31,2

4.3 Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement

Cette section présente les résultats de trois essais oedométriques au cours desquels des mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s) ont été effectuées. Ces essais se nomment « td1 », « td4 » et « td5 ». Ils ont été effectués selon les méthodes décrites aux sections 3.3.2.3.1.1 et 3.3.2.3.1.2. Initialement, ces essais devaient être mis en place à des densités initiales différentes, afin de couvrir une large gamme d'indices des vides. Malheureusement, il s'est avéré impossible d'obtenir des indices des vides initiaux en dehors de la plage présentée ici, soit entre 0,65 et 0,70. Une explication de ce phénomène est présentée à la section 3.2.2.1.2.

Le Tableau 4.16 résume les conditions de mise en place pour ces 3 essais. Tel que mentionné, les indices des vides initiaux varient peu. Le % solide est identique (79%) pour les deux premiers essais, et s'approche de la consistance visée sur le terrain (68% solide). Finalement, il est à noter que les deux premiers essais ont été mis en place selon la méthode M1, alors que l'essai « td5 » a été mis en place selon la méthode M2. Le % solide initial n'est pas disponible pour ce-dernier. Les Figure A3.1 à Figure A3.6 de l'Annexe 3, présentent les fiches expérimentales détaillées pour ces essais.

Tableau 4.16 : Paramètres de mise en place pour les essais de V_s

Essai	e_i	% solide (%)	Mise en place
td1	0,65	79	M1
td4	0,67	79	M1
td5	0,70	-	M2

4.3.1 Courbes oedométriques

La Figure 4.34 donne les résultats des consolidations oedométriques effectuées en parallèle aux mesures de V_s . Les courbes illustrent l'évolution de la déformation verticale (ϵ_{ve}) en fonction de la contrainte verticale appliquée (σ_v). De façon générale, les courbes présentent une forme parabolique caractéristique. Une observation plus détaillée révèle que les échantillons « td1 » et « td5 » se comporte de façon très similaire, alors que l'échantillon « td4 » semble plus rigide. Cependant, les échantillons « td1 » et « td5 » étaient ceux qui avaient les indices des vides initiaux les plus éloignés (voir Tableau 4.16). En se basant uniquement sur l'indice des vides initial, l'échantillon « td1 » aurait du être le plus rigide (donc le plus à gauche à la Figure 4.34), suivit du « td4 » puis du « td5 ».

Il existe deux explications pour cette divergence. La plus plausible est que la mesure de la densité initiale ait été imprécise, ce qui signifie que les indices des vides réels peuvent

déroger légèrement de ce qui est présenté au Tableau 4.16. Néanmoins, d'autres phénomènes doivent être considérés, comme l'effet d'une saturation partielle. En effet, la présence de succion dans les pores d'un échantillon augmente sa rigidité, même pour un état plus lâche. Dans le contexte de ce projet, ces résultats sont toutefois acceptables.

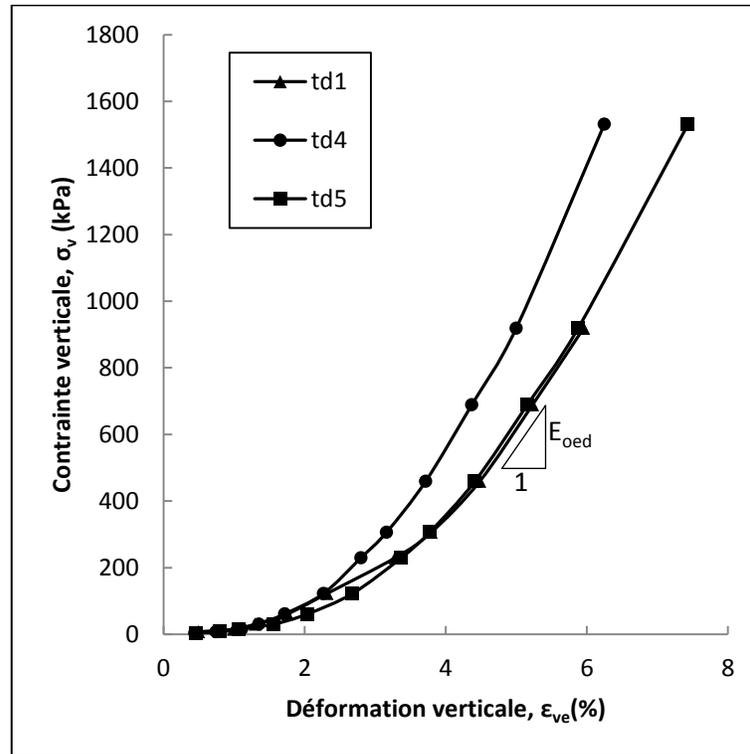


Figure 4.34 : Courbes oedométriques obtenues lors des mesures de V_s

4.3.2 Modules oedométriques

La Figure 4.35 présente les modules oedométriques normalisés en fonction de l'indice des vides pour les essais V_s . La Figure 4.34 illustre comment sont calculés les modules pour chaque paliers de chargement, c'est-à-dire en tant que pente de la courbe contrainte-déformation. Les modules sont normalisés selon l'équation (3.4). Les déformations sont ensuite transformées en indice des vides pour créer les points de la Figure 4.35. L'observation de celle-ci révèle une assez grande dispersion des données, surtout au niveau des modules de l'essai « td4 ». Pour cet essai, les modules évoluent très peu en fonction de l'indice des vides, et ceci est dû à la normalisation. En général, des courbes similaires à celle de l'essai « td5 » sont plus courantes, et c'est pourquoi une courbe de tendance attendue (*expected trend*) a été ajoutée à cette figure.

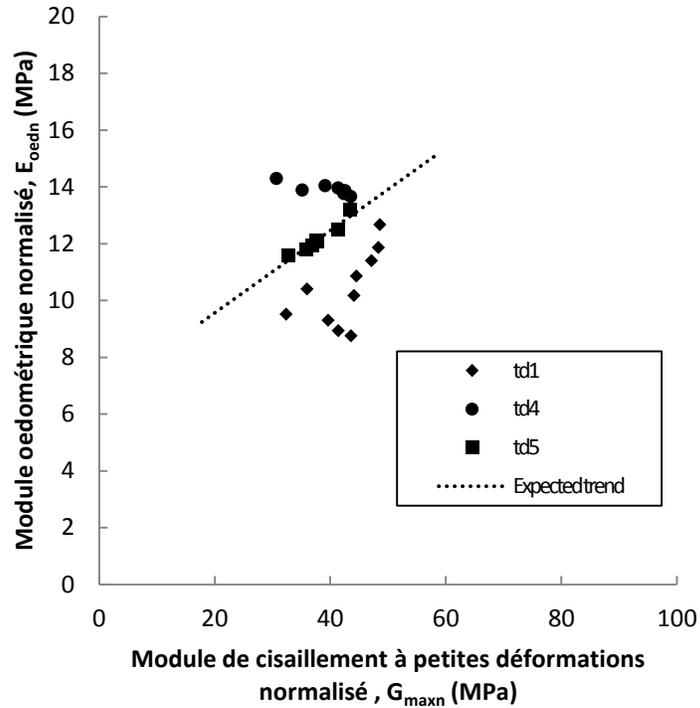


Figure 4.35 : Modules oedeométriques obtenus lors des mesures de V_s

Tel que mentionné, les courbes relatives aux déformations oedométriques présentées aux 2 dernières figures présentent certaines irrégularités. Les résultats obtenus dans le cadre de cette série d'essai sont néanmoins utilisables, quoique la précision des indices des vides peut-être remise en doute. Le développement d'une nouvelle cellule oedométrique et d'une nouvelle méthode de mise en place devraient permettre de régler ce problème.

4.3.3 Vitesse des ondes de cisaillement

La Figure 4.36 présente les vitesses des ondes de cisaillement normalisées en fonction de l'indice des vides pour les essais de cette série. Les vitesses ont été normalisées selon l'équation (3.2). L'observation de cette figure révèle que les 3 essais présentent des V_{s1} très semblables, variant entre 120 et 150 m/s. Ceci est très similaire aux valeurs provenant de la littérature, présentée à la section 2.2.2.2. En effet, Baoshan (1983) a obtenu des vitesses normalisées variant entre 114 et 151 m/s, alors que Chang a rapporté des vitesses situées entre 125 et 150 m/s [5, 12]. Les résultats présentés ici sont donc en accord avec la littérature, d'autant plus que les trois essais effectués à l'Université de Sherbrooke présentent des distributions de V_{s1} très similaires.

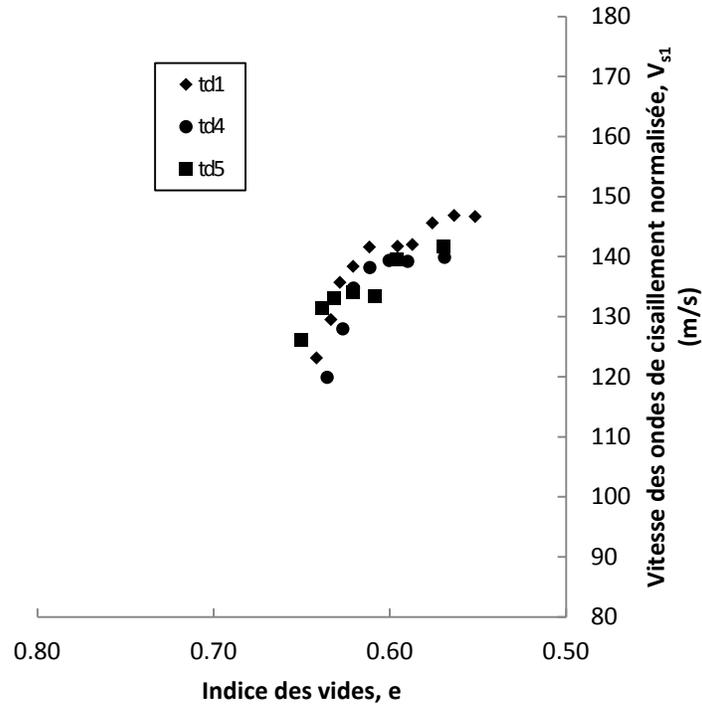


Figure 4.36 : Vitesses de cisaillement normalisées en fonction de l'indice des vides

4.3.4 Modules de cisaillement

La Figure 4.37 présente des modules de cisaillement normalisés en fonction de l'indice des vides. Cette figure est une synthèse de plusieurs aspects de ce projet. En effet, elle réunit les modules obtenus à travers 2 séries d'essais triaxiaux (CD MT et CD HD) à ceux obtenus par la mesure des vitesses des ondes de cisaillement. Il s'agit donc d'une comparaison entre un module à grande déformations (G), provenant du triaxial et un module à très petites déformations (G_{max}), obtenus par la mesure des V_s . Dans tous les cas, les modules ont été normalisés selon l'équation (3.4). Par ailleurs, les lignes pleines représentent une courbe de tendance linéaire pour chaque série. Ce type de régression a été choisi compte tenu du faible nombre de données disponibles.

La série provenant des mesures de V_s est illustrée par des points en forme de « x » à la Figure 2.1. Les modules ont été obtenus selon l'équation (3.3). Les points pleins représentent les modules obtenus lors d'essais triaxiaux drainés mis en place par compactage (CD MT) et par déposition hydraulique (CD HD). La façon de les obtenir a été présentée aux sections 4.2.2.1 et 4.2.2.2. La comparaison entre ces 3 séries révèle que la mise en place hydraulique a produit des G dont la variation en fonction de l'indice des vides est relativement proche de celle du G_{max} . En effet, les pentes sont presque parallèles pour ces 2 cas.

La série mise en place par compactage présente une pente plus abrupte, ce qui signifie qu'elle est plus sensible à la variation de l'indice des vides que la série CD HD ou que le G_{max} . L'homogénéité des échantillons a peut-être un rôle à jouer à ce niveau. Il peut sembler contradictoire que la série CD MT présente des G plus élevés pour le même indice des vides, alors que la série CD HD avait été identifiée comme plus résistante que la première. Cependant, les essais de la série CD HD ont été réalisés pour des états plus denses que ceux de la série CD MT, ce qui explique la distribution observée à la Figure 4.37.

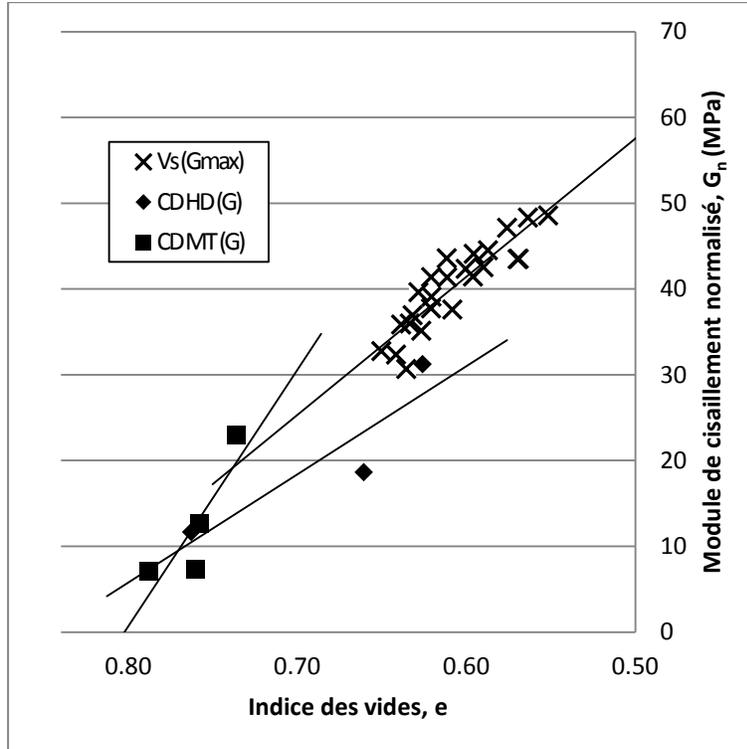


Figure 4.37: Modules de cisaillement en fonction de l'indice des vides obtenus par essais triaxiaux et par mesures de V_s

Tel que mentionné précédemment, l'objectif de ce projet n'est pas d'obtenir de lien empirique reliant les modules de cisaillement à grandes et très petites déformations. La comparaison de ces deux types de modules s'arrêtera donc à l'aspect qualitatif. Néanmoins, un des points qui ressort de cet exercice est que la méthode de mise en place hydraulique semble mieux adaptée pour effectuer une comparaison avec les échantillons utilisés lors des mesures de V_s . Par ailleurs, un plus grand nombre de données serait nécessaire pour établir un lien empirique entre ces différents modules, tant au niveau des essais triaxiaux que pour la mesure de V_s . Dans les deux cas, il serait également pertinent de couvrir une plage plus large de densités.

Finalement, la Figure 4.38 présente une courbe qui pourrait être utilisée en combinaison avec des mesures de V_s in situ. Il s'agit d'une courbe reliant l'angle de friction effectif à

l'indice des vides, pour la série CD MT. Cette série a été choisie, car il s'agit des seuls essais drainés pour lesquels il a été possible d'obtenir un angle de friction résiduel. Idéalement, il faudrait répéter cet exercice avec plus d'échantillons afin d'établir une véritable corrélation. Néanmoins, ce type de relation permettrait d'obtenir l'angle de friction effectif de résidus sur le terrain, dont la densité aurait été évaluée par la mesure des V_s . La ligne pleine est une courbe de tendance linéaire.

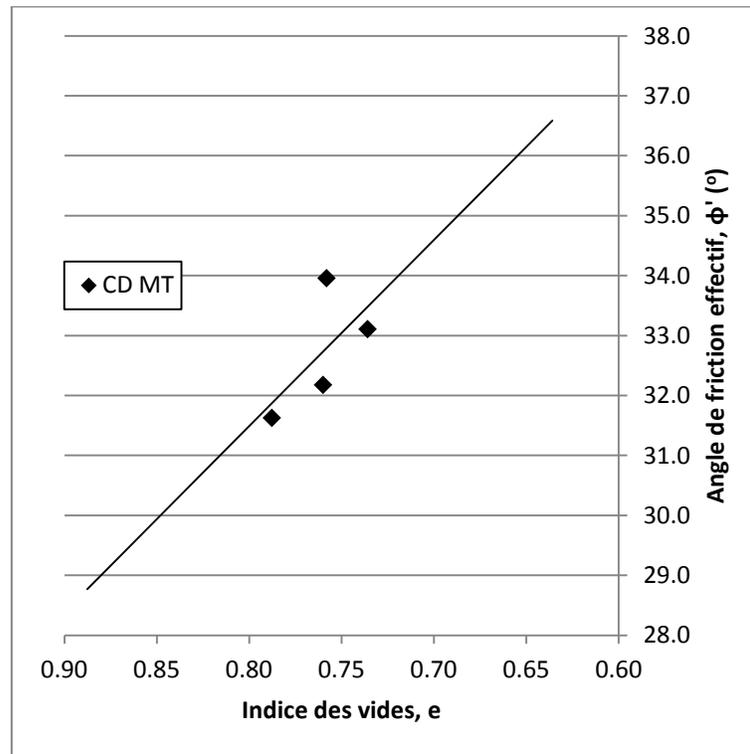


Figure 4.38 : Angle de friction effectif en fonction de l'indice des vides, série CD MT

5 Analyse et interprétation des résultats

Les résultats relatifs à ce projet, ainsi qu'une analyse sommaire de ceux-ci, ont été présentés au chapitre précédent. Le présent chapitre se veut une analyse plus générale de ces résultats, dans le but de pousser plus loin la réflexion sur certains aspects de ce projet.

5.1 Analyse

Cette section propose une analyse des résultats du chapitre 4 de façon à faire ressortir certaines tendances plus générales.

5.1.1 Résistance au cisaillement

L'étude de la résistance au cisaillement est le thème principal de ce projet de recherche. Afin de mieux comprendre celle-ci, de nombreux essais de laboratoire ont été effectués, dans l'appareil triaxial et dans le dispositif de mesure des V_s .

5.1.1.1 Essais triaxiaux mis en place par compactage humide

Le Tableau 5.1 compare les paramètres de résistance au cisaillement obtenus par l'Université de Sherbrooke et par Golder et Associés sur des échantillons MT.

Tableau 5.1 : Comparaisons des paramètres de résistance au cisaillement pour les essais triaxiaux MT de l'Université de Sherbrooke et de Golder et Associés

Série	φ' (°)	c' (kPa)
CU (UdeS)	29,5	0
CD (UdeS)	32,9 (33,5)	0
CU (Golder)	37,9	0
CD (Golder)	33,9	12

Pour les résultats obtenus à l'Université de Sherbrooke, il est à noter qu'un angle de friction de **33,5°** est probablement plus représentatif que ce qui a été obtenu par les cercles de Mohr pour la série drainée (CD). Une explication à ce niveau est fournie à la section 4.2.1.2. Par ailleurs, les essais non-drainés ont permis d'obtenir un angle de friction effectif de **29,5°**. Les deux séries sont caractérisées par une cohésion nulle.

Il a déjà été démontré au chapitre 4 que les échantillons mis en place par compactage humide ont tous adopté un comportement qualifié de contractant. Les valeurs des angles de friction rapportées ici le confirment. En effet, un échantillon contractant possède généralement un angle de friction effectif plus élevé en conditions drainées [21]. Cette faiblesse du matériau en conditions non-drainées signifie qu'en cas de construction sur celui-ci, il pourrait s'avérer nécessaire de laisser les pressions interstitielles se dissiper afin d'éviter une rupture par liquéfaction statique. Par ailleurs, ce type de comportement soulève des questions au niveau de la réaction du matériau à un chargement cyclique. Néanmoins, ce type de sollicitation dépasse le cadre de ce projet.

Il est à noter que les angles de frictions effectifs obtenus par Golder et Associés vont à l'encontre de ce qui est énoncé plus haut. Les échantillons non-drainés présentent une résistance supérieure, alors que tous ont affiché un comportement contractant, caractérisé entre autres par une augmentation des pressions interstitielles lors du cisaillement. Ceci, en plus d'autres irrégularités présentées à la section 4.2.1.1.3, soulève certaines interrogations par rapport à l'utilisation d'un φ' de $37,9^\circ$ pour ce matériau, en conditions non-drainées.

L'utilisation du modèle hyperbolique de Duncan et Chang fournit une autre base de comparaison afin d'évaluer la validité des paramètres de résistance au cisaillement obtenus au laboratoire. La Figure 4.27 révèle que le lissage effectué par les moindres carrés permet de produire des courbes très similaires à ce qui a été observé lors des essais drainés. Ce lissage a permis d'obtenir un angle de friction de $33,2^\circ$, une cohésion nulle et un R_f de 0,6. Le fait d'obtenir des paramètres de résistance au cisaillement similaires à ceux provenant des essais de laboratoire permet d'affirmer que ceux-ci sont fiables. Par ailleurs, il a été mentionné à la section 4.2.1.2 que l'essai CD 125 présentait un rapport de contraintes principales inférieur aux deux autres essais, ce qui théoriquement ne devrait pas être le cas. Il est intéressant de constater que le modèle de Duncan et Chang s'applique quand même très bien à cette série malgré cette divergence, tout à fait normale lors de manipulations de laboratoire. Finalement, il est à noter que même si le modèle de Duncan et Chang n'a pas été développé pour les sols granulaires fins, il s'applique très bien ici.

5.1.1.2 Essais triaxiaux mis en place par déposition hydraulique

L'effet du type de mise en place sur le comportement en cisaillement des résidus miniers est une des questions principales soulevées par ce projet. L'effet sur la résistance au cisaillement sera abordé ici.

Dans le cadre de la série non-drainée mise en place par déposition hydraulique (CU HD), deux essais ont été réalisés dans des conditions identiques, à l'exception de la mise en place. Ces essais non-drainés ont permis d'obtenir les paramètres présentés au Tableau 5.2. Il apparaît que la mise en place par déposition hydraulique a permis d'obtenir un angle de friction effectif résiduel de $34,3^\circ$, par rapport à une valeur de $30,9^\circ$ pour la mise en place par compactage humide. Il s'agit d'un écart de 12%. Il est possible de comparer ces résultats entre eux, puisque les 2 échantillons ont été mis en place sensiblement à la même masse volumique initiale.

Tableau 5.2 : Paramètres de résistance au cisaillement pour la série CU HD

Essai	φ' ($^\circ$)	c' (kPa)	ρ_{di} (kg/m ³)
CU MT	30,9	0	1545
CU HD	34,3	0	1554

Cette résistance accrue pour l'échantillon mis en place par déposition hydraulique s'apparente aux résultats présents dans la littérature sur les sables. En effet, Chang (2011) a noté une augmentation de 3% de l'angle de friction pour des échantillons de résidus miniers mis en place sous forme de *slurry* [13]. La littérature sur les sables explique ce type de résultats par une différence au niveau de la microstructure des échantillons. Tel qu'illustré à la Figure 2.18, les échantillons mis en place par déposition hydraulique possèdent une microstructure plus homogène que les échantillons mis en place par compactage humide. Il est probable qu'une structure plus hétérogène réduise les contacts intergranulaires, ce qui rend l'échantillon moins résistant dans son ensemble.

La méthode de mise en place utilisée dans le cadre de ce projet devrait être comparée à des échantillons intacts afin d'évaluer à quel point elle est représentative des conditions de terrain. Néanmoins, les résultats présentés ici soulèvent des questions intéressantes. La méthode de la compactage humide, très répandue dans les laboratoires de l'industrie, n'est peut-être pas la plus adéquate pour évaluer l'angle de friction de résidus déposés hydrauliquement. L'écart de 12% mentionné plus haut est probablement assez important pour avoir un impact sur les coûts reliés à la construction d'un système de gestion des résidus miniers. Il est à noter que cet écart se trouve du côté sécuritaire.

Des essais drainés mis en place par déposition hydraulique ont également été effectués. Tel que mentionné à la 4.2.1.5, les cercles de Mohr n'ont pas été utilisés afin d'obtenir un angle de friction effectif pour cette série. Néanmoins, le Tableau 5.3 présente des angles de friction effectifs obtenus en appliquant l'équation (4.1) au rapport σ'_1/σ'_3 à la fin de l'essai. L'essai CD HD 125 présente un angle de friction de $32,8^\circ$, par rapport à $36,2^\circ$ pour les deux autres essais. Il est à noter que ceux-ci ont été mis en place à une densité plus élevée.

Tableau 5.3 : Paramètres de résistance au cisaillement pour les essais CD HD

Essai	σ'_1/σ'_3	φ' (°)	c' (kPa)	ρ_{di} (kg/m ³)
CD HD 125	3.36	32.8	0	1545
CD HD 250	3.88	36.2	0	1612
CD HD 500	3.88	36.2	0	1628

La comparaison avec les essais mis en place par compactage humide est difficile, faute d'essais CD MT mis en place aux mêmes densités. Il est également à noter que les essais HD n'ont pas atteint de véritable état résiduel. Néanmoins l'essai CD HD 125 permet une comparaison grossière, puisqu'il a été réalisé à une densité similaire aux essais mis en place par compactage humide (1515 kg/m³). L'échantillon HD obtient un angle de friction de $32,8^\circ$, par rapport à un angle de $33,5^\circ$ pour la série MT. Il s'agit d'une diminution de 2,1%. À la

lumière de cette comparaison, la méthode de mise en place semble avoir eu moins d'impact lors des essais CD que lors des essais CU. Peut-être que l'homogénéité de l'échantillon est moins déterminante lors d'un chargement lent et drainé. Néanmoins, un plus grand nombre d'essais de ce genre devraient être réalisés afin d'établir une comparaison solide.

5.1.2 Effet du type de mise en place lors d'essais triaxiaux

Le deuxième objectif principal de ce projet était d'évaluer l'effet de la méthode de mise en place lors d'essais triaxiaux sur des résidus miniers. En effet, il est établi que ce genre de matériau est souvent mis en place par déposition hydraulique. Or, dans la pratique, les échantillons triaxiaux sont habituellement mis en place par compactage humide. Les essais réalisés dans le cadre de projet ont permis de démontrer que comme pour les sables, la méthode de mise en place affecte le comportement en cisaillement dans l'appareil triaxial.

À première vue, la méthode de déposition hydraulique développée ici semble plus proche des conditions de terrains pour les résidus miniers. Au niveau du pourcentage solide, la déposition hydraulique permet de mettre en place des échantillons à 77,2% solide, ce qui s'approche plus des conditions de terrains (68%) que la compactage humide (86,1%). Au niveau de l'arrangement des grains, il a été démontré dans la littérature que la déposition hydraulique favorise une microstructure plus homogène pour les sables [7]. Ceci pourrait être vérifié pour des résidus miniers en observant différents échantillons au microscope à balayage électronique. Il serait très intéressant d'effectuer une comparaison avec des échantillons intacts, afin de voir à quel point la méthode de déposition hydraulique s'approche des conditions de terrain.

L'effet de la mise en place sur la résistance au cisaillement a déjà été démontré à la section 5.1.1.2. Les impacts sur le comportement volumétrique et sur la CSL ou la NCL seront abordés ici.

5.1.2.1 Comportement volumétrique

Selon le cadre adopté pour ce projet (voir 2.4.2.2.5), la liquéfaction statique est le comportement d'un échantillon triaxial non-drainé qui connaît un pic de résistance initial, suivi par une baisse de celle-ci jusqu'à un état résiduel inférieur. Pour tous les essais réalisés dans le cadre de ce projet, ce type de comportement est survenu conjointement à une augmentation des pressions interstitielles lors du cisaillement. C'est donc dire que la liquéfaction statique et le comportement contractant sont intimement liés.

Tel que mentionné à la section 4.2.1, tous les échantillons mis en place par compactage humide ont présenté un comportement contractant, et une rupture par liquéfaction statique lors du cisaillement non-drainé. D'un autre côté, l'échantillon mis en place par déposition hydraulique a montré un comportement partiellement dilatant, et n'a pas subi de

liquéfaction statique. En effet, même à très grandes déformations, la résistance de l'échantillon a continué d'augmenter. Il est connu que la contractance est due à un réarrangement de la microstructure lors du cisaillement. Or, La déposition hydraulique favorise peut-être un arrangement initial plus naturel et plus optimal. Pour une même densité générale de tout l'échantillon, le seul réarrangement possible est alors vers une augmentation de volume.

Tel qu'indiqué à la section 1.1.2, la liquéfaction statique est un mode de rupture qui a déjà entraîné la ruine de plusieurs ouvrages. À la lumière des résultats présentés ici, il apparaît que les échantillons mis en place par déposition hydraulique sont plus résistants au cisaillement, et ne semblent pas susceptibles à la liquéfaction statique. Pour le matériau étudié ici, il apparaît que la compactage humide sous-estime la résistance au cisaillement non-drainé, et exagère le potentiel de liquéfaction statique.

Au niveau des essais drainés, il apparaît que les échantillons mis en place par compactage humide sont contractants, alors que ceux mis en place par déposition hydraulique sont partiellement dilatants. En effet, ces derniers ont connus une diminution de volume initiale, suivi d'une augmentation de celui-ci. Il n'est pas possible de parler de liquéfaction statique en conditions drainées, puisque ce phénomène est relié à l'augmentation des pressions interstitielles. Néanmoins, ceci vient confirmer les résultats obtenus en conditions non-drainées.

5.1.2.2 Effet sur la CSL et la NCL

Le cadre d'analyse de Been et Jefferies, basé sur la *critical state line*, a été présenté au chapitre 2. Selon cette théorie, un sol contractant possède un ψ positif. C'est ce qui a été observé pour les échantillons CU MT effectués dans le cadre de ce projet. La CSL pour ces essais a été tracée à la Figure 4.6. Malheureusement, les autres essais triaxiaux (CD MT, CU HD, CD HD) n'ont pas été amenés à l'état critique, défini comme un cisaillement sans variation de volume ou de pression interstitielle. La CSL n'a donc pas pu être tracée pour ces échantillons.

Néanmoins, la *normal consolidation line* a pu être tracée pour tous les essais effectués dans le cadre de ce projet. La Figure 4.24 présente les NCL obtenues pour les échantillons MT et HD. Pour les essais réalisés dans le cadre de ce projet, il apparaît que la NCL est affectée par la méthode de mise en place.

Il est intéressant de noter que certains auteurs soutiennent que la CSL n'est pas affectée par la mise en place [23], alors que d'autres oui [31]. En théorie la NCL et la CSL doivent être parallèles. Si tel était le cas pour les essais présentés ici, la CSL aurait également été affectée par la méthode de mise en place, allant ainsi à l'encontre de l'opinion de Been et Jefferies à

ce sujet. Néanmoins, il convient de rappeler que certains échantillons ont pu être surconsolidés lors de leur mise en place, ce qui viendrait affecter la position de la NCL. De plus amples essais seraient nécessaires afin de mieux évaluer l'effet de la mise en place sur la CSL et la NCL.

5.1.3 Comparaison entre les paramètres à petites et grandes déformations

La Figure 4.37 présente des modules de cisaillement obtenus à grandes et à petites déformations selon deux méthodes très différentes. Le premier a été obtenu dans l'appareil triaxial, à partir des modules élastiques et de compressibilité, selon l'équation (3.1). Le deuxième type de module provient des mesures de vitesses des ondes de cisaillement.

Malgré ces différences importantes au niveau de la méthode et du domaine de déformation, la Figure 4.37 révèle que ces 2 modules de cisaillement peuvent s'apparenter, surtout pour les échantillons triaxiaux mis en place par déposition hydraulique. En effet, les courbes provenant de la série CD HD et V_s sont presque parallèles, et semblent même partager un point commun, à l'indice des vides 0.635. La méthode utilisée pour obtenir les modules de cisaillement dans le triaxial se base sur le rapport contrainte-déformation au tout début du cisaillement, pour des déformations axiales variant entre 1×10^{-2} % et 1×10^{-3} %. Selon la Figure 2.6, il s'agit du domaine des petites déformations. Il est possible que les modules ainsi obtenus s'approchent des modules à très petites déformations provenant des mesures de V_s . Sans permettre de l'assurer, les résultats présentés à Figure 4.37 soulèvent néanmoins la question.

Il est également intéressant de constater que la méthode de mise en place des échantillons triaxiaux vient encore une fois affecter les résultats au niveau des modules de cisaillement. Cette fois-ci, la série mise en place par compactage présente des modules plus élevés pour un même indice des vides, c'est-à-dire qu'ils sont plus rigides. Ceci peut sembler surprenant lorsque l'on considère que tous les échantillons triaxiaux MT étudiés ici ont présenté une résistance au cisaillement supérieure. Néanmoins, résistance et rigidité ne sont pas la même chose. En effet, un matériau rigide se déformera peu suite à l'application d'une certaine contrainte. Par contre, ceci ne donne aucune indication sur le moment auquel il y aura rupture, c'est-à-dire sur sa résistance ultime à une contrainte. La Figure 5.1 illustre deux matériaux idéalisés. Le matériau A est rigide et moins résistant, alors que le matériau B est moins rigide et plus résistant. Les échantillons MT peuvent être associés au premier matériau, et les échantillons HD, au deuxième.

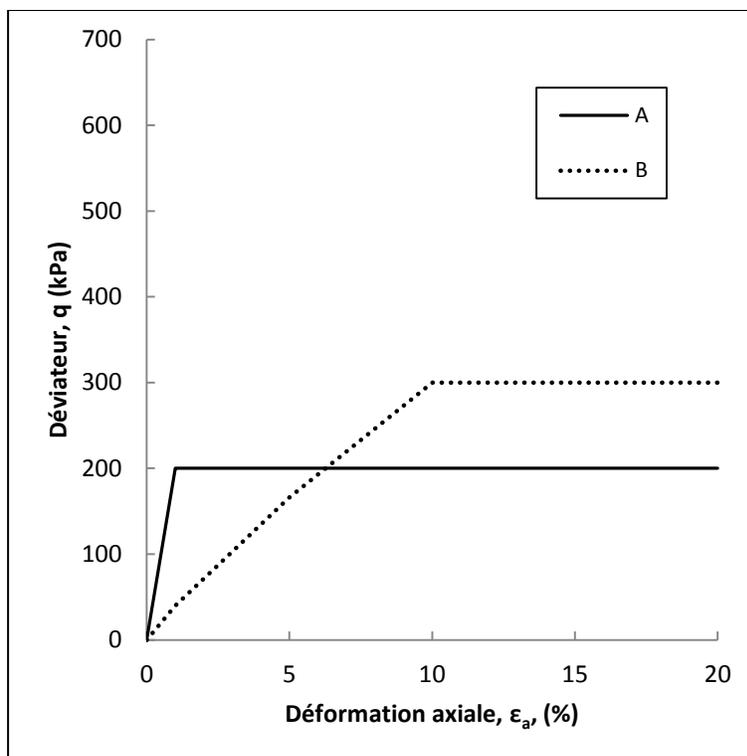


Figure 5.1 : Comparaison entre rigidité et résistance

Évidemment, le nombre de tests réalisés ici est limité, et d'autres essais devraient être réalisés avant de tirer des conclusions claires au niveau des liens pouvant exister entre les modules de cisaillement à grandes et petites déformations pour ce type de matériau. Le fait d'équiper un appareil permettant le cisaillement à grandes déformations (triaxial, cisaillement simple) devrait permettre d'obtenir des courbes de dégradation du module de cisaillement. Ce type de courbes pourrait alors être utilisé pour la conception sismique d'ouvrages en terre, et pour évaluer le module de cisaillement lors d'essais de V_s in situ. Tel que démontré ici et pour le matériau à l'étude, la mise en place hydraulique est recommandée.

5.2 Discussion

Cette section vise à dégager des recommandations pratiques, basées sur les travaux effectués dans le cadre de ce projet.

5.2.1 Utilisation des différents essais dans la pratique

Plusieurs essais ont été effectués dans le cadre de ce projet, différents essais triaxiaux, des essais de consolidation isotrope ainsi que des mesures de vitesses de cisaillement accompagnées d'essais oedométriques. Lesquels sont les plus pertinents lorsque vient le temps de caractériser la résistance au cisaillement d'un résidu minier?

Le choix du type d'essai dépend du type de résistance au cisaillement qui est envisagé. Pour déterminer la résistance au cisaillement statique, avec différentes conditions de drainage, les essais triaxiaux CD et CU sont importants. Ils permettent d'obtenir des paramètres de conception (φ' , c') et sont un véritable standard dans l'industrie. Il s'agit néanmoins d'essais complexes et coûteux, qui doivent souvent être réalisés dans des laboratoires spécialisés. Pour des projets de plus petite envergure, le recours à l'essai de cisaillement direct peut s'avérer plus économique, lorsqu'applicable. L'éventail des conditions de chargement disponibles demeure cependant plus limité pour cet essai.

Par ailleurs, si la résistance au cisaillement cyclique est un paramètre de conception important, le recours à des essais cycliques peut s'avérer nécessaire. À ce titre, des essais triaxiaux cycliques peuvent être effectués. Néanmoins, l'essai de cisaillement simple cyclique semble connaître un certain essor dans la littérature [1, 44]. Le principal avantage de cet essai est qu'il permet d'obtenir directement les contraintes et les déformations en cisaillement, ce qui n'est pas possible avec un triaxial conventionnel.

Au niveau des mesures de vitesses des ondes de cisaillement, la méthode des anneaux piezoélectriques, utilisée dans le cadre de ce projet, a permis d'obtenir des résultats intéressants, même si le matériau à l'étude s'est avéré difficile à mettre en place. Le fait d'effectuer les mesures de V_s dans un appareil oedométrique présente une valeur ajoutée, puisque ceci permet d'obtenir des résultats également applicables à une étude de consolidation du matériau. Cet aspect n'a pas été abordé dans le cadre de ce projet, mais de telles études sont primordiales lors de la conception d'un parc à résidus miniers. Néanmoins, il pourrait s'avérer intéressant d'équiper un appareil de cisaillement conventionnel (triaxial, cisaillement simple) de capteurs de V_s . Ceci permettrait d'obtenir des courbes de dégradation du G_{max} , ce qui n'a pas été possible de faire dans le cadre du présent projet.

5.2.2 De nombreux angles de friction

Tel qu'exposé à la section 5.1.1, plusieurs angles de friction effectifs ont été obtenus dans le cadre de ce projet. Des conclusions ont déjà été tirées par rapport aux valeurs obtenues, dans le contexte de recherche de projet. Mais dans un contexte plus pratique, que peut-on tirer des nombreux angles de friction obtenus ici?

La Figure 4.19 est fort intéressante en ce sens, puisqu'elle met en évidence trois angles de friction non-drainés différents, pour le même résidu, à des densités similaires. Tout d'abord, l'échantillon mis en place par compactage humide présente un angle au pic de $27,4^\circ$, et un angle résiduel de $30,9^\circ$. Il est de pratique courante en géotechnique d'utiliser l'angle de friction résiduel lors de la conception, en conditions non-drainées. En effet, lors de la construction d'un ouvrage en terre, la compactage est habituellement contrôlée afin d'assurer la stabilité de la structure. Il en résulte que la plupart de ces ouvrages sont

constitués de sols denses, et donc qui ont une tendance vers le *durcissement* lors du cisaillement. Pour de tels sols, la résistance au pic est souvent difficile à déterminer, et dans tous les cas, l'état résiduel demeure un bon indicateur de la résistance réelle que le sol pourra générer. La même chose n'est pas vraie pour les sols lâches, qui ont une tendance vers l'*adoucissement* lors du cisaillement. Ces sols s'affaiblissent après avoir atteint leur pic. Ne devrait-on pas alors considérer l'angle de friction au pic, et non le résiduel, lors de la conception? Ceci vient rejoindre le concept de ligne d'instabilité de Swidzinski, présenté à la section 2.4.2.2.3. Selon cette théorie, un sol lâche devient instable après avoir atteint son état au pic. Dans le contexte d'un parc à résidus miniers, essentiellement constitué de sols lâches, ne serait-il pas plus sécuritaire d'utiliser l'angle de friction au pic comme angle maximal qui puisse être mobilisé en conditions non-drainées? Pour le matériau à l'étude ceci voudrait dire un $27,4^\circ$ au lieu de $30,9^\circ$, soit une diminution d'environ 11%. Pour un projet de grande envergure, ceci peut avoir des effets au niveau des coûts d'opération.

C'est ici que l'échantillon mis en place par déposition hydraulique devient particulièrement intéressant. En effet, cet échantillon s'est non seulement comporté comme un sol dense, en se durcissant, mais il a également présenté un angle de friction résiduel supérieur à l'échantillon MT, en atteignant $34,3^\circ$. Tel qu'expliqué précédemment, il est sécuritaire d'utiliser un angle résiduel pour un sol durcissant. En suivant cette approche, l'angle de friction pour ce matériau vient de passer de $27,4^\circ$ à $34,3^\circ$, soit une augmentation de 20%.

Au final, quel angle de friction devrait être utilisé? Il semble que l'utilisation de l'angle de friction résiduel pour la série mise en place par compactage humide ($30,9^\circ$) puisse s'avérer un bon compromis. Il serait tentant de dire que l'angle de friction obtenu par déposition hydraulique ($34,3^\circ$) est plus représentatif des conditions de terrains, et qu'il peut être utilisé lors de la conception. Néanmoins, la méthode de mise en place utilisée dans le cadre de ce projet est une ébauche, et il reste encore du travail à faire pour démontrer sa fiabilité à représenter les conditions de terrain pour des résidus miniers. Dans ce contexte la prudence dicte d'utiliser les résultats obtenus selon les méthodes conventionnelles.

5.2.3 Utilisation du modèle de Duncan et Chang

Par ailleurs, le modèle hyperbolique de Duncan et Chang s'est avéré un outil simple et efficace pour valider les résultats d'essais triaxiaux drainés obtenus au laboratoire, et ce peu importe la méthode de mise en place des échantillons.

Pour le matériau à l'étude, le modèle hyperbolique a permis d'obtenir un angle de friction de $33,2^\circ$ pour la série CD MT, alors qu'un angle de $32,9^\circ$ a été obtenu au laboratoire. Pour la série CD HD, un angle de $36,5^\circ$ a été obtenu par simulation, alors que les essais les plus denses effectués au laboratoire ont permis d'obtenir un angle de $36,2^\circ$. Dans tous les cas, le modèle correspond très bien aux résultats expérimentaux.

Le modèle de Duncan et Chang tel qu'utilisé ici ne comporte pas de couplage hydromécanique, ce qui restreint son application à des cas de chargement drainés. Néanmoins, des modèles tels que celui de Been et Jefferies, permettent de tels couplages, et sont recommandés pour simuler le chargement triaxial en conditions non-drainées. En effet, comme l'essai triaxial est un essai complexe qui peut parfois générer des résultats erronés, la validation par un modèle numérique est une pratique recommandée.

5.2.4 Saturation au CO₂

Finalement, une dernière leçon importante à retenir pour ce projet concerne l'utilisation de la saturation au CO₂ sur des résidus miniers lors des essais triaxiaux. Cette méthode, décrite à la section 3.3.2.1.4, a permis d'obtenir des B de l'ordre 0,95, par rapport à des valeurs de 0,88 pour les échantillons saturés sans CO₂. La séquence utilisée pour les essais CD MT, soit circulation de CO₂, circulation d'eau désaérée et saturation par contre-pression, a donné les meilleurs résultats et est recommandée afin de saturer efficacement les sols granulaires fins.

6 Conclusion

6.1 Sommaire

Ce sommaire est présenté sous la forme d'un retour sur les objectifs du projet de recherche, présentés à la section 1.3, ainsi qu'un rappel des contributions originales du projet, exposées à la section 1.4.

6.1.1 Mise en marche de l'appareil triaxial

Le premier objectif de ce projet a été la mise en route de l'appareil triaxial ELDYN, de marque GDS, appartenant au laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke. Il s'agit d'un appareil de première qualité, qui pourra maintenant être utilisé à des fins scientifiques, académiques et de service dans ce laboratoire.

Dans le cadre de ce projet, de nombreux types d'essais ont été effectués dans l'appareil, soit des essais triaxiaux drainés, non-drainés et des essais de consolidation isotrope. Les essais drainés et non-drainés mis en place par compactage humide ont été réalisés avec les mêmes paramètres que des essais similaires effectués dans un autre laboratoire. Bien que les résultats n'aient pas été identiques, ceux obtenus à l'Université de Sherbrooke sont très cohérents entre eux. De plus, les essais drainés ont été modélisés avec succès en utilisant le modèle de Duncan et Chang. Tout ceci permet de conclure que les modules de l'appareil ELDYN utilisés dans le cadre de ce projet fonctionnent normalement.

Par ailleurs, des protocoles ont été produits afin de laisser des traces des essais et méthodes effectués dans le cadre de ce projet (voir section 3.3). Les modules dynamiques et non-saturés de l'appareil n'ont pu servir dans le cadre de ce projet, mais il ne fait aucun doute que d'autres étudiants auront bientôt la chance de les exploiter.

6.1.2 Effet de la méthode de mise en place lors d'essais triaxiaux

Deux méthodes de mise en place des échantillons triaxiaux ont été utilisées dans le cadre de ce projet : la compactage humide et la déposition hydraulique. La littérature sur les sables a démontré que la méthode de mise en place peut affecter le comportement lors du cisaillement triaxial. L'objectif est donc de voir si l'effet est similaire pour les résidus miniers étudiés dans le cadre de ce projet. Tel qu'énoncé aux chapitres 4 et 5, les résultats sont très proches de ceux obtenus sur les sables. Par ailleurs, la comparaison d'essais triaxiaux effectués selon les 2 méthodes révèle que la déposition hydraulique augmente l'angle de friction effectif et favorise un comportement partiellement dilatant. En d'autres mots, les échantillons mis en place par déposition hydraulique possèdent une meilleure résistance au cisaillement statique et sont moins susceptibles à la liquéfaction statique. En admettant que cette méthode de mise en place représente mieux les conditions de terrain pour des résidus miniers déposés hydrauliquement, ces résultats soulèvent des questions au niveau des

méthodes de laboratoire actuellement utilisées pour la mise en place de ce type de matériau. De plus, les essais réalisés dans le cadre de ce projet ont également démontrés que le module de cisaillement provenant des essais triaxiaux est également affecté par la méthode de mise en place.

Il est trop tôt pour établir de façon définitive l'influence de la méthode de mise en place lors des essais triaxiaux sur des résidus miniers, notamment car le nombre d'essais réalisés dans le cadre de ce projet demeure limité. La section 6.3.1 présente un aperçu des travaux qui pourraient venir compléter ceux réalisés ici.

6.1.3 Application du modèle hyperbolique sur des résidus miniers

Le modèle hyperbolique de Duncan et Chang a été utilisé avec succès pour simuler des chargements triaxiaux consolidés-drainés sur des résidus miniers épaissis. Toutes les phases de l'essai ont pu être reproduites avec ce modèle élastique non-linéaire, du chargement initial à l'état résiduel. Le succès de son application à ce type de matériau est intéressant, puisqu'il s'agit d'un modèle ayant tout d'abord été développés pour les argiles. Par ailleurs, ce modèle simple et efficace s'est révélé très utile afin de valider rapidement les résultats triaxiaux obtenus au laboratoire. Tel que mentionné, cet essai est complexe, et une part d'essai ratés est inévitable. Dans un tel contexte, la validation par un modèle numérique est une pratique recommandée. Il est à noter que le modèle a su reproduire les essais mis en place par compactage humide et par déposition hydraulique.

6.1.4 Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur des résidus miniers

La mesure en laboratoire de vitesses des ondes de cisaillement sur des résidus miniers, par la méthode des anneaux piezoélectriques, est une première à l'Université de Sherbrooke et peut-être dans le monde. En effet, aucune publication scientifique faisant état d'une telle application n'a été répertoriée. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet sont encourageants en ce sens qu'ils sont répétables et cohérents avec des mesures de V_s provenant de la littérature. Des méthodes de mise en place ont été développées dans le cadre de ce projet. Pour diverses raisons, ces méthodes ont donné des résultats restreints à une plage de densité plus limitée que ce qui était attendu. Néanmoins la démonstration a été faite que ces méthodes fonctionnent, et des pistes ont été proposées afin de pallier aux problèmes rencontrés. Par ailleurs, ces méthodes ont été décrites dans des protocoles présentés à la section 3.3.

6.1.5 Comparaison entre les modules de cisaillement obtenus à petites et grandes déformations

Une autre contribution importante de ce projet est d'avoir permis des comparaisons entre des modules de cisaillement à petites et à grandes déformations. Une particularité est que

les modules proviennent d'essais effectués dans des appareils différents. Malgré cette différence, les modules obtenus sont dans le même ordre de grandeur et évoluent de façon similaire en fonction de l'indice des vides du matériau. De plus, il a été démontré que la méthode de mise en place affecte également les modules à grandes déformations obtenus lors d'essais triaxiaux.

En poussant plus loin ce type de comparaison, il pourrait un jour être possible de déduire rapidement certains paramètres à grandes déformations tel que l'angle de friction effectif, à partir de la mesure des vitesses de cisaillement, qui est un essai de terrain non-destructif effectué dans le domaine des petites déformations.

6.2 Liens avec les autres travaux faits à l'Université de Sherbrooke

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet s'inscrivent dans un contexte plus général de recherche en géotechnique à l'Université de Sherbrooke. De par le matériau à l'étude, ce projet se rapproche du projet de maîtrise de Michael Demers-Bonin, qui porte sur l'étude et la simulation de la consolidation primaire de résidus miniers épaissis. Le matériau étudié par M. Demers-Bonin est le même que celui étudié ici. Bien qu'aucuns liens directs n'aient été faits entre ces 2 projets de recherche, il s'agit évidemment d'études complémentaires. En effet, le tassement est un paramètre primordial pour bien évaluer la quantité de résidus qu'il sera possible de stocker dans un parc, ainsi que la densité qui risque d'être atteinte à plus ou moins long terme. Cette densité vient ensuite jouer un rôle lors de l'étude de la résistance au cisaillement, que ce soit au niveau des angles de friction disponibles, ou du comportement volumétrique lors du cisaillement. Les méthodes de laboratoire, ainsi que les outils numériques développés par M. Demers-Bonin permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui déterminent la consolidation primaire du matériau, lorsque le poids propre est le principal mécanisme derrière celle-ci.

6.3 Travaux futurs

Tel qu'exposé à la section précédente, plusieurs travaux effectués dans le cadre de ce projet ont été réalisés pour la première fois au laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke. Ils ont permis d'obtenir des résultats intéressants, mais également de mieux cerner certaines pistes de recherche dans le domaine des résidus miniers. Certaines d'entre elles sont proposées ici.

6.3.1 Déposition hydraulique

La méthode de déposition hydraulique mise au point dans le cadre de ce projet a donné des résultats forts intéressants, mais il reste place à certaines améliorations.

Le principal inconvénient de la méthode de déposition hydraulique utilisée dans le cadre de ce projet est qu'elle ne permet pas un très bon contrôle sur la masse volumique initiale des

échantillons mis en place. Un tel contrôle est important lorsque vient le temps de réaliser une série d'essais à la même densité, ce qui est souvent le cas dans les applications commerciales, ou tout simplement pour comparer des essais entre eux. Dans le cadre de ce projet, une variation de la densité a pu être atteinte en frappant plus ou moins légèrement la colonne juste après la déposition du mélange. Il s'agit cependant d'une technique rudimentaire qui pourrait être améliorée.

Par ailleurs, il a été remarqué lors des essais réalisés dans le cadre de projet que des bulles d'air ont tendance à se former dans la colonne de déposition, ce qui confère une certaine hétérogénéité à l'échantillon. Une solution possible serait d'améliorer le brassage lors de la déposition dans la colonne. Une tige munie d'une hélice souple (pour ne pas déchirer la membrane triaxiale) pourrait être utilisée pour malaxer le mélange. Celui-ci pourrait par ailleurs être déposé en plusieurs portions, chaque fois malaxées à l'hélice. Ceci devrait permettre aux bulles d'air de s'échapper.

Finalement, la saturation des échantillons pourrait probablement être améliorée. En effet, les échantillons mis en place selon cette méthode ont atteint des B de 0,9, ce qui est légèrement inférieur à la valeur de 0,95 recommandée par l'ASTM. Le fait d'éliminer les bulles d'air pourrait aider à la saturation.

Il est à noter qu'une technique de déposition similaire a été mise au point à l'Université Polytechnique de Montréal [14]. Il serait pertinent de consulter la littérature à ce sujet.

De façon théorique, la déposition hydraulique semble être une méthode très prometteuse pour mettre en place des résidus miniers au laboratoire en reproduisant les conditions de terrains propres à ces sols. Néanmoins, certains travaux devraient être effectués afin de valider cette affirmation. En ce sens, la comparaison avec des échantillons intacts, lors d'essais triaxiaux, semble un incontournable. Le fait de se procurer des échantillons intacts de résidus miniers sera certainement un défi en soi. Néanmoins, cet exercice permettra de valider hors de tous doutes si la méthode proposée ici est plus fidèle aux conditions de terrains que la compactage humide. Finalement, il serait pertinent de comparer la microstructure propre à ces 3 méthodes de mise en place (intacte, déposition hydraulique et compactage humide) à partir d'images prises au microscope à balayage électronique. L'Université de Sherbrooke possède un tel équipement.

Une étude plus approfondie de cette méthode de mise en place est conseillée sur la base des résultats très prometteurs obtenus dans le cadre de ce projet. À court terme, il serait pertinent d'effectuer des séries CU HD et CD HD complètes amenés jusqu'à l'état critique. Les échantillons devraient alors être mis en place à des masses volumiques similaires, afin de tracer les cercles de Mohr. Par ailleurs, les mêmes essais devraient être effectués sur des

échantillons MT afin de bien comparer les 2 méthodes. Ceci permettrait de valider certaines des suppositions faites ici au niveau de l'effet de la mise en place. Un autre volet qui n'a pas du tout été exploré ici est l'effet de la mise en place lors de chargements cycliques. Puisque la méthode développée ici affecte la façon dont les pressions interstitielles se développent lors du chargement statique, elle risque également d'avoir un effet en cisaillement cyclique.

6.3.2 Simulations numériques des essais triaxiaux non-drainés

Dans le cadre de ce projet, seuls les essais triaxiaux effectués en conditions drainées ont été reproduits par un modèle numérique. Il serait pertinent d'utiliser un modèle avec couplage hydromécanique afin de valider les essais triaxiaux effectués en conditions non-drainées. Le modèle de Been et Jefferies permet ce genre de simulations, en plus de s'inscrire dans le cadre d'analyse de l'école de Cambridge, qui a été abordé au cours ce projet [23]. L'utilisation de ce modèle serait particulièrement intéressante dans le cadre d'une exploration des effets de la méthode de mise en place sur la CSL. Il serait également très intéressant de voir comment ce type de modèle peut reproduire les différences de comportement attribuables aux méthodes de mise en place abordées dans le cadre de ce projet (MT et HD).

6.3.3 Mise en marche des autres modules de l'appareil triaxial

Un des objectifs de ce projet a été de mettre en marche l'appareil triaxial ELDYN du laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke. Cet appareil est muni de différents modules permettant des essais triaxiaux statiques, cycliques et non-saturés. Dans le cadre de ce projet, seuls des essais statiques ont été effectués. Il serait donc pertinent d'effectuer le même exercice de mise en marche pour les modules cycliques et non-saturés. Le bon fonctionnement de ceux-ci devra être vérifié, et la rédaction de protocoles devrait suivre. Par ailleurs, le personnel de laboratoire concerné devra être formé pour la réalisation de ce type d'essais. Les applications commerciales ou académiques sont nombreuses.

6.3.4 Vérification de la présence d'une fuite lors d'essais en conditions drainées

Tel que mentionné à la section 4.2.1.2, des fuites de pression cellulaire vers l'échantillon ont été détectées lors des essais CD MT. Ce problème semble avoir été réglé par l'application d'un nouveau scellant sur une des connections situées à l'intérieur de la cellule triaxiale. Néanmoins, il serait pertinent de vérifier que cette fuite n'est plus présente en soumettant un sable non-susceptible au fluage à des essais CD à des pressions de confinement supérieures à 250 kPa. La durée de l'essai devrait être assez longue, soit au moins une dizaine de jours. Ceci permettrait de confirmer si les légères variations de pressions interstitielle toujours observables lors des essais CD sur des résidus miniers sont réellement dues à une petite fuite, ou à d'autres phénomènes, tel que le fluage.

6.3.5 Développement d'une nouvelle cellule pour les mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur les sols granulaires fins

Tel qu'exposé à la section 3.2.2.2, la cellule oedométrique modifiée utilisée lors des mesures de V_s possède quelques inconvénients, notamment au niveau du contrôle de la masse volumique de mise en place. Pour pallier à ce problème, il est conseillé de développer une nouvelle cellule, mieux adaptée aux sols granulaires très fins. Un dessin préliminaire est présenté à la Figure A4.8 de l'Annexe 4.

L'utilisation d'un cadre devrait permettre de supporter le poids du chapeau, qui est l'un problème de la cellule actuelle. Par ailleurs, un bon système de mesure de la hauteur initiale de l'échantillon devrait être prévu, afin d'obtenir une meilleure précision lors des mesures des masses volumiques initiales. En ce sens, un capteur de force ou de pression pourrait être utilisé afin de déterminer de façon précise le moment où le chapeau entre en contact avec l'échantillon. Ceci devrait permettre d'obtenir des lectures de V_s sur une plus large plage d'indice des vides, ainsi que des courbes oedométriques plus cohérentes. Par ailleurs, une telle cellule pourrait être utilisée pour mettre en place des résidus miniers, mais également d'autres types de sols granulaires fins, tels que des silts.

6.3.6 Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement in situ sur des résidus miniers

Suite au développement d'une cellule pour les mesures de V_s en laboratoire sur des résidus miniers, il sera pertinent d'appliquer cette technologie à des mesures de terrain, puisque c'est là qu'elle prend tout son sens. Par contre, avant d'effectuer des essais de terrain, de bons résultats de laboratoire doivent être obtenus. Par ailleurs, les mesures de V_s sur le terrain pour des résidus semblent très peu répandues à l'heure actuelle. Il s'agit d'un thème de recherche peu exploré pour l'instant, mais qui pourrait générer des applications intéressantes.

6.3.7 Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans un appareil de cisaillement conventionnel

Dans le cadre de ce projet, des efforts ont été déployés afin de comparer des modules de cisaillement à petites et grandes déformations. La prochaine étape en ce sens pourrait être d'équiper un appareil de cisaillement conventionnel (triaxial ou cisaillement simple) d'anneaux piézoélectriques permettant les mesures de V_s . Des mesures à grandes et petites déformations pourraient alors être faites dans le même appareil, rendant ainsi les comparaisons entre ces 2 domaines encore plus fiables. L'appareil de cisaillement simple est tout indiqué, puisqu'il permettrait d'obtenir directement des modules de cisaillement à grandes déformations, chose que le triaxial ne peut pas faire. Des courbes de dégradation du G_{max} , comme celle présentée à la Figure 2.6, pourraient alors être produites.

Annexe 1 : Sédimentométrie

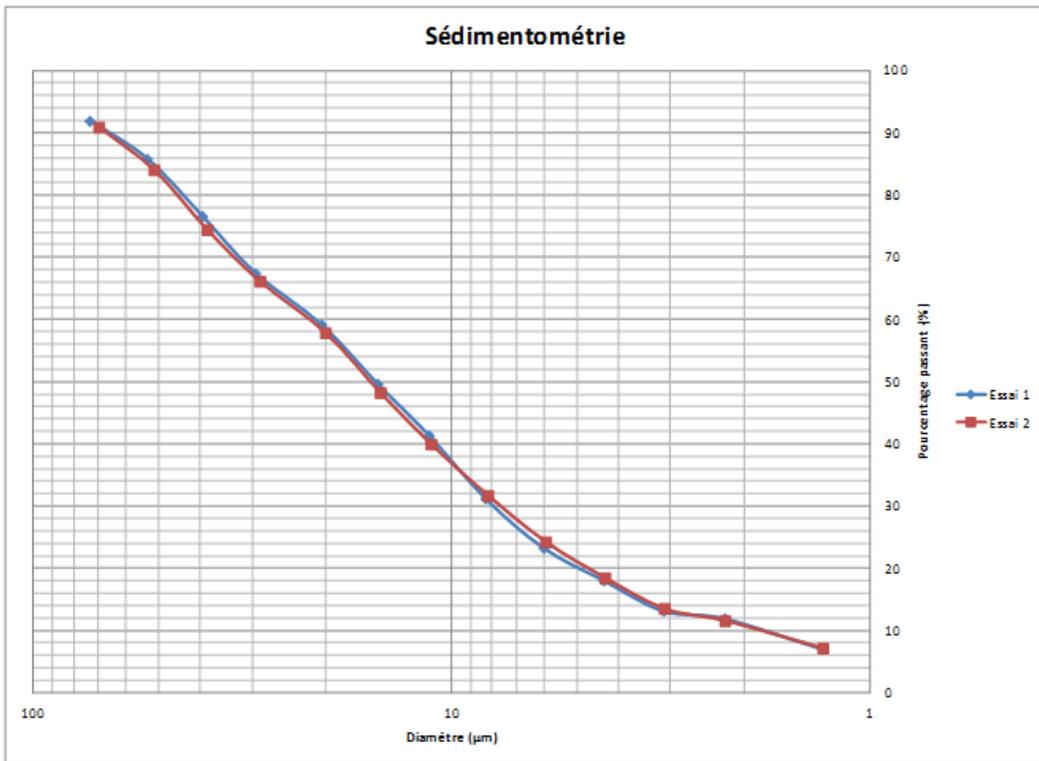


Figure A1.1 : Sédimentométrie effectuée à l'Université de Sherbrooke [20]

Annexe 2 : Essais triaxiaux

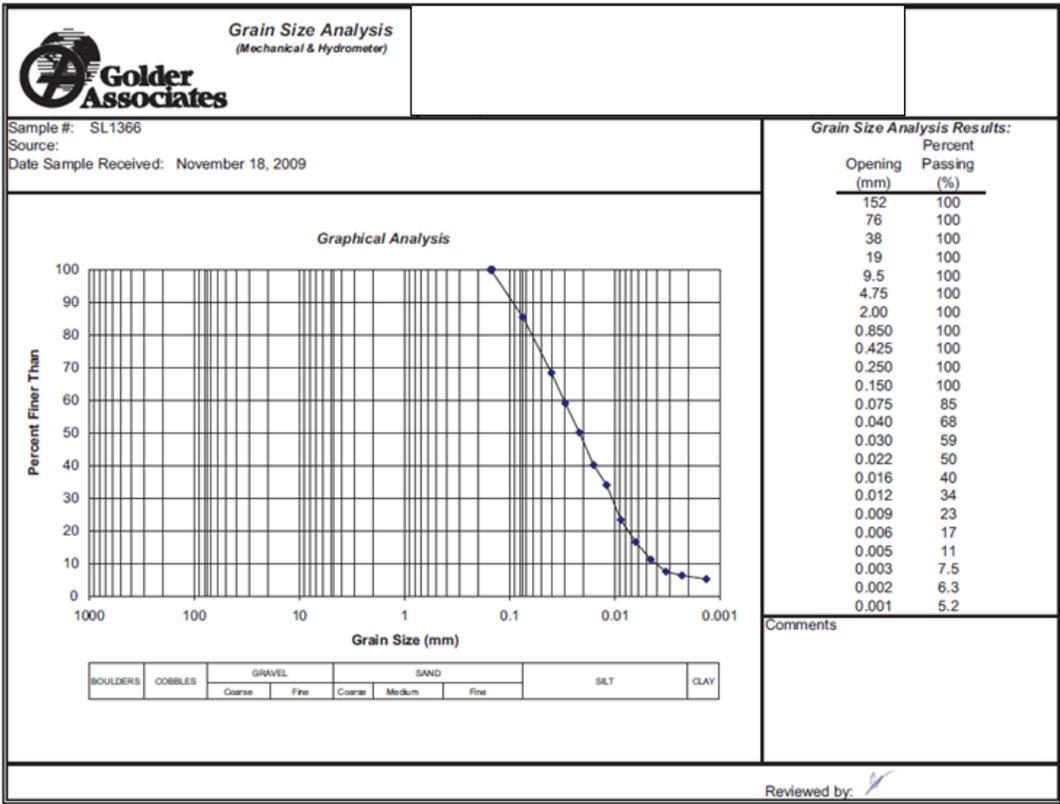


Figure A2.1 : Courbe granulométrique de Golder et Associés[19]

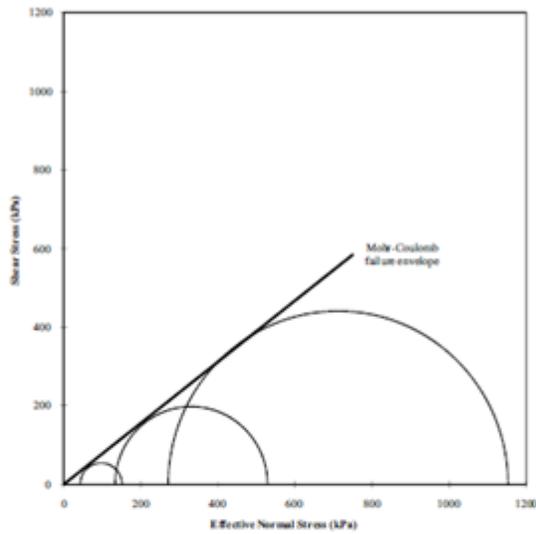


TRIAxIAL COMPRESSION TEST-CONSOLIDATED UNDRAINED
SUMMARY

	Confining Pressure (kPa)	Comments:
	125	
	250	
	500	

Shear Strength Parameters:

$\phi' = 37.9$ degrees
 $c = 0$ kPa



The testing services reported herein have been performed in accordance with the included scope of services and in accordance with best industry practice. This report is for the sole use of the designated client. This report constitutes a binding contract only and does not represent any warranty, representation or opinion regarding specific data, compliance or industry suitability. Engineering responsibility can be provided by Golder Associates Ltd. upon request.

1721 8th Street E.,
Saskatoon, Saskatchewan, S7H0T4

Reviewed by:

Figure A2.2 : Essais triaxiaux CU de Golder et Associés[19]

Sample	Confining Pressure (kPa)	Comments:
	125	
	250	
	500	

Shear Strength Parameters:

$\phi' = 33.9$ degrees
 $c = 12$ kPa

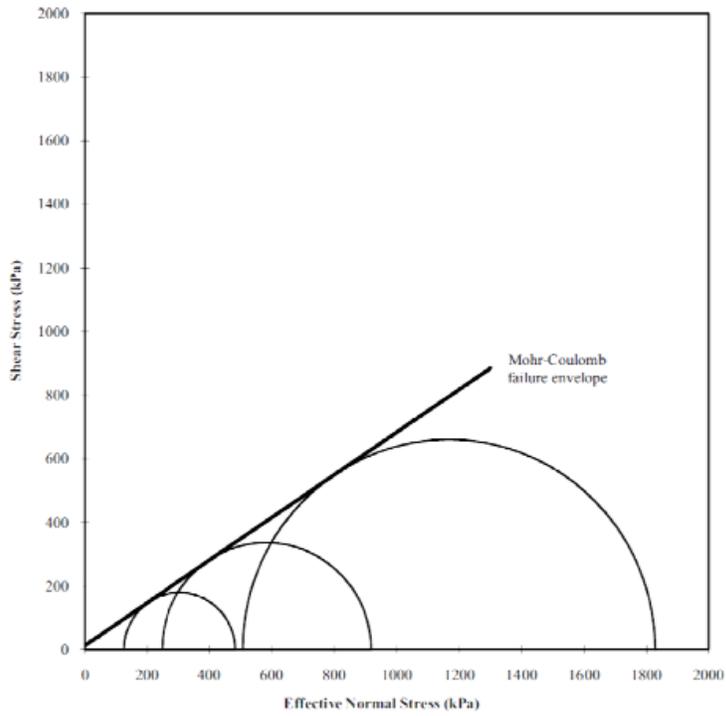


Figure A2.3 : Essais triaxiaux CD de Golder et Associés[19]

Matériel	tailings
Type de test	CU
# test	1
Date	12-déc-12
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.872
σ_c (kPa)	125
Load rate (mm/Min)	0.1

Échantillon			
$\rho_{\text{sèche visée}}$ (kg/m ³)	1515	e_{initial}	0.86
		S_{initial}	0.52
D_i (mm)	38.08	% solides _i	0.86
H_i (mm)	76.11		
w initiale (décimale)	0.163		
w finale (décimale)	0.245		
$\rho_{\text{sèche mise en place}}$ (kg/m ³)	1477.62		

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator stress (kPa)	20 % strain	(σ'_1/σ'_3) max
σ'_3			22.7
σ'_1			64.258
strain (%)			14.0783
Déviateur max (kPa)	92.1154		
Déviateur résiduel (kPa)	39.6273		
(σ'_1/σ'_3) max	2.84		
ϕ' (degrés)	28.65		

Figure A2.4 : Détails de l'essai CU MT 125

Matériel	tailings
Type de test	CU
# test	1
Date	14-déc-12
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.9
σ_c (kPa)	250
Load rate (mm/Min)	0.1

Échantillon			
$\rho_{s\grave{e}che}$ visée (kg/m ³)	1515	$e_{initial}$	0.82
		$Sr_{initial}$	0.55
Di (mm)	38.02	% solides _i	0.86
Hi (mm)	75.94		
w initiale (décimale)	0.162		
w finale (décimale)	0.248		
$\rho_{s\grave{e}che}$ mise en place (kg/m ³)	1517.04		

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator stress (kPa)	20 % strain	($\sigma'1/\sigma'3$) max
$\sigma'3$			53.5
$\sigma'1$			157.7789
strain (%)			14.8565
Déviateur max (kPa)	187.1999		
Déviateur résiduel (kPa)	101.9315		
($\sigma'1/\sigma'3$) max	2.95		
ϕ' (degrés)	29.57		

Figure A2.5 : Détails de l'essai CU MT 250

Matériel	tailings
Type de test	CU
# test	1
Date	18-déc-12
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.87
σ_c (kPa)	500
Load rate (mm/Min)	0.1

Échantillon			
$\rho_{s\text{èche}} \text{ visée (kg/m}^3\text{)}$	1515	e_{initial}	0.84
		Sr_{initial}	0.53
D_i (mm)	38.12	% solides _i	0.86
H_i (mm)	76.07		
w initiale (décimale)	0.161		
w finale (décimale)	0.238		
$\rho_{s\text{èche}} \text{ mise en place (kg/m}^3\text{)}$	1504.31		

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator stress (kPa)	20 % strain	$(\sigma'_1/\sigma'_3) \text{ max}$
σ'_3			131.6
σ'_1			398.0881
strain (%)			15.5528
Déviateur max (kPa)	368.7631		
Déviateur résiduel (kPa)	265.3722		
$(\sigma'_1/\sigma'_3) \text{ max}$	3.03		
ϕ' (degrés)	30.21		

Figure A2.6 : Détails de l'essai CU MT 500

Matériel	tailings
Type de test	CD MT
# test	2
Date	11-avr-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.868
σ_c (kPa)	125
Load rate (mm/Min)	0.0015

Échantillon			
$\rho_{s\grave{e}che}$ visée (kg/m ³)	1515	$e_{initial}$	0.82
		$Sr_{initial}$	0.54
Di (mm)	37.95	% solides _i	0.86
Hi (mm)	76.01		
w initiale (décimale)	0.159		
w finale (décimale)	0.210		
$\rho_{s\grave{e}che}$ mise en place (kg/m ³)	1518.95		
$\rho_{s\grave{e}che}$ réelle (kg/m ³)	1518.09		

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator stress (kPa)	20 % strain	($\sigma'1/\sigma'3$) max
$\sigma'3$			
$\sigma'1$			
strain (%)	16.8399		18.2489
Déviateur max (kPa)	314.47		
Déviateur résiduel (kPa)	312.89		
($\sigma'1/\sigma'3$) max	3.21		
ϕ' (degrés)	31.63		

Figure A2.7 : Détails de l'essai CD MT 125

Matériel	tailings
Type de test	CD MT
# test	4
Date	16-juil-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.95
σ_c (kPa)	250
Load rate (mm/Min)	0.003

Échantillon			
$\rho_{s\grave{e}che}$ visée (kg/m ³)	1515	$e_{initial}$	0.83
		$Sr_{initial}$	0.54
Di (mm)	38.05	% solides _i	0.86
Hi (mm)	76.01		
w initiale (décimale)	0.161		
w finale (décimale)			
$\rho_{s\grave{e}che}$ mise en place (kg/m ³)	1511.88		
$\rho_{s\grave{e}che}$ réelle (kg/m ³)			

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator stress (kPa)	20 % strain	($\sigma'1/\sigma'3$) max
$\sigma'3$			
$\sigma'1$			
strain (%)	19.3874		19.3994
Déviateur max (kPa)	654.0138		
Déviateur résiduel (kPa)	653.5334		
($\sigma'1/\sigma'3$) max	3.5311		
ϕ' (degrés)	33.96		

Figure A2.8 : Détails de l'essai CD MT 250

Matériel	tailings
Type de test	CD MT
# test	5
Date	21-juin-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.95
σ_c (kPa)	435
Load rate (mm/Min)	0.003

Échantillon			
$\rho_{\text{sèche}} \text{ visée (kg/m}^3\text{)}$	1515	e_{initial}	0.82
		S_{initial}	0.54
D_i (mm)	38.01	% solides _i	0.86
H_i (mm)	75.87		
w initiale (décimale)	0.161		
w finale (décimale)			
$\rho_{\text{sèche}} \text{ mise en place (kg/m}^3\text{)}$	1518.51		
$\rho_{\text{sèche}} \text{ réelle (kg/m}^3\text{)}$			

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator stress (kPa)	20 % strain	$(\sigma'_1/\sigma'_3) \text{ max}$
σ'_3			
σ'_1			
strain (%)	18.9060		18.9421
Déviateur max (kPa)	1151.509		
Déviateur résiduel (kPa)	1150.431		
$(\sigma'_1/\sigma'_3) \text{ max}$	3.4079		
ϕ' (degrés)	33.11		
ϕ			
$\tau \text{ max (kPa)}$			
$\tau \text{ résiduel (kPa)}$			

Figure A2.9 : Détails de l'essai CD MT 500

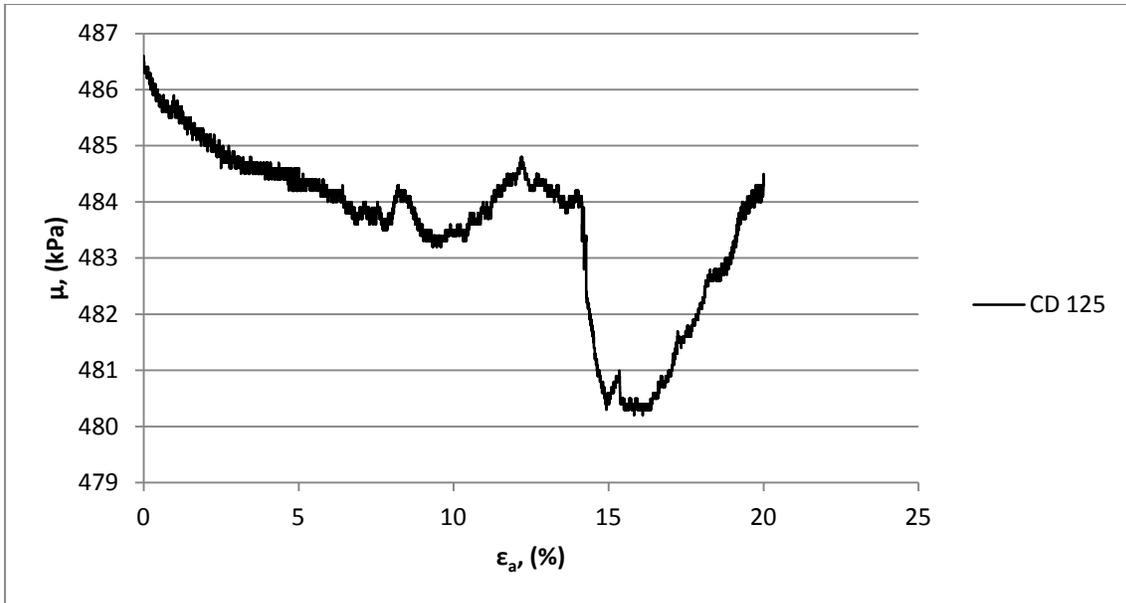


Figure A2.10 : Pression interstitielles en fonction de la contrainte axiale, essai CD MT 125

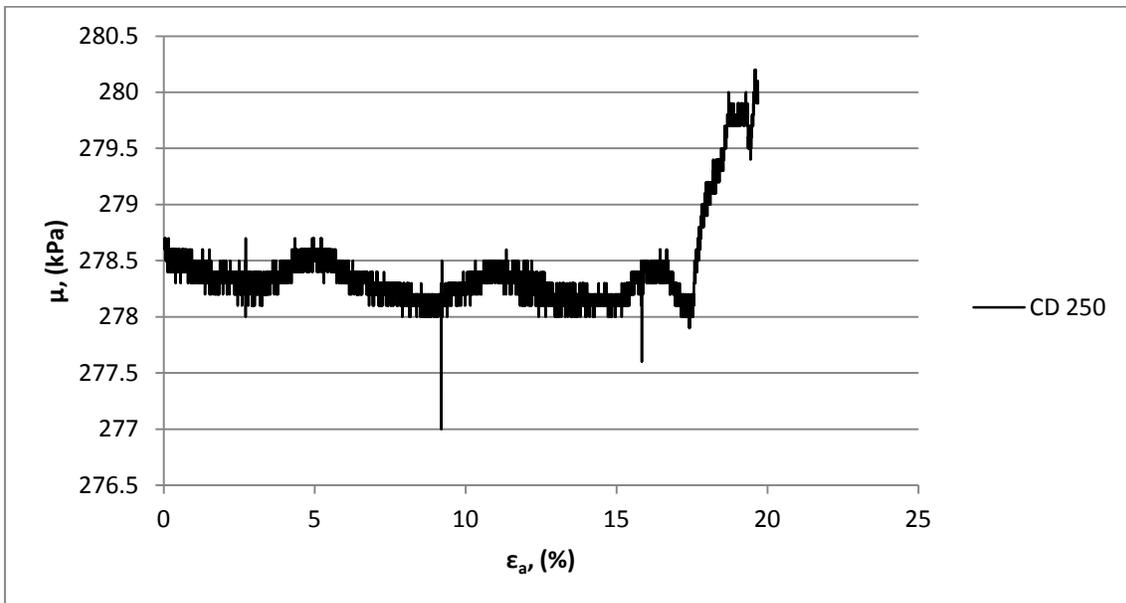


Figure A2.11 : Pression interstitielles en fonction de la contrainte axiale, essai CD MT 250

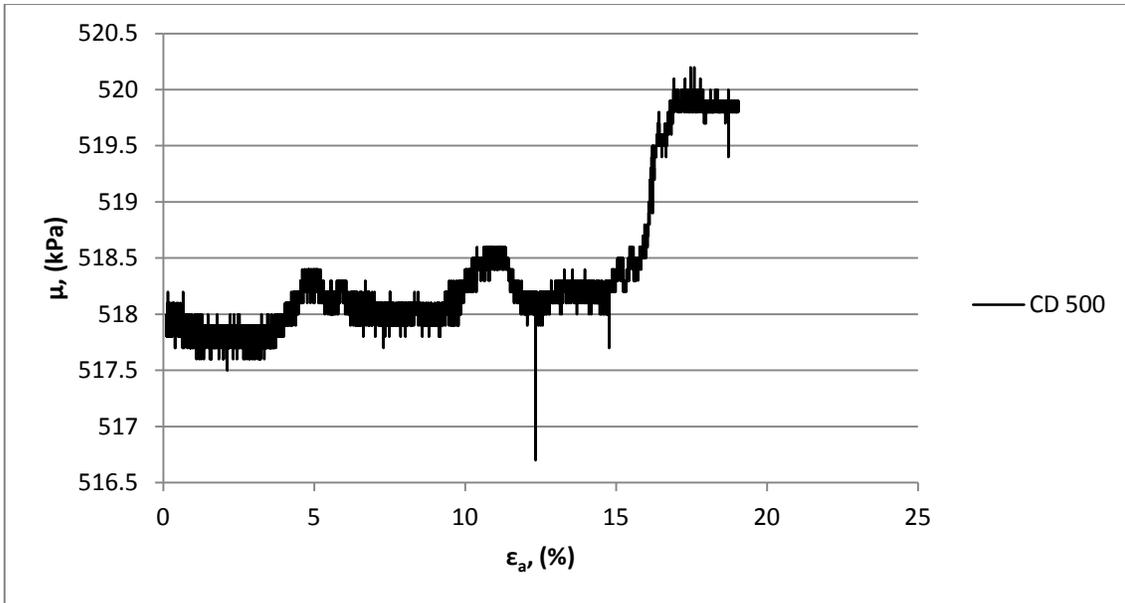


Figure A2.12 : Pression interstitielles en fonction de la contrainte axiale, essai CD MT 500

Matériel	tailings
Type de test	CU HD
# test	test 3
Date	15-août-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.9
σ_c (kPa)	250
Load rate (mm/Min)	0.1

Échantillon			
$\rho_{s\grave{e}che}$ visée (kg/m ³)	HD	$e_{initial}$	0.78
		$Sr_{initial}$	0.77
Di (mm)	37.98	% solides _i	0.82
Hi (mm)	82.74		
w initiale (décimale)	0.217		
w finale (décimale)	0.233		
$\rho_{s\grave{e}che}$ mise en place (kg/m ³)	1553.70		
$\rho_{s\grave{e}che}$ réelle (kg/m ³)	1553.70		

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max. deviator	20 % strain	($\sigma'1/\sigma'3$) max
$\sigma'3$			
$\sigma'1$			
strain (%)	20.534		14.795
Déviateur max (kPa)	460.7542		
Déviateur résiduel (kPA)	460.2333		
($\sigma'1/\sigma'3$) max	3.58		
ϕ' (degrés)	34.27		

Figure A2.13 : Détails de l'essai CU 250 (HD)

Matériel	tailings
Type de test	CU MT
# test	1
Date	18-sept-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	20
B essai	0.95
σ_c (kPa)	250
Load rate (mm/Min)	1

Échantillon			
$\rho_{\text{pêche visée}}$ (kg/m ³)	1553	e_{initial}	0.79
		Sr_{initial}	0.57
D_i (mm)	38.13	% solides _i	0.86
H_i (mm)	75.92		
w initiale (décimale)	0.162		
w finale (décimale)	0.256		
$\rho_{\text{pêche mise en place}}$ (kg/m ³)	1545.06		
$\rho_{\text{pêche réelle}}$ (kg/m ³)	1543.40		

Rupture			
Critère (strain %)	20		
	max.	20	
	deviator	% strain	($\sigma'1/\sigma'3$) max
$\sigma'3$			
$\sigma'1$			
strain (%)	1.3936		11.3061
Déviateur max (kPa)	207.8505		
Déviateur résiduel (kPa)	140.9003		
($\sigma'1/\sigma'3$) max	3.12		
ϕ' (degrés)	30.93		

Figure A2.14 : Détails de l'essai CU 250 (MT)

Matériel	tailings
Type de test	CD HD
# test	1
Date	04-sept-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	10
B essai	0.9
σ_c (kPa)	125
Load rate (mm/Min)	0.003

Échantillon			
$P_{s\grave{e}che}$ visée (kg/m ³)	0	$\epsilon_{initial}$	0.79
		$S_{r_{initial}}$	0.00
D_i (mm)	38.24	% solides _i	1.00
H_i (mm)	84.58		
w initiale (décimale)	0.000		
w finale (décimale)	0.224		
$P_{s\grave{e}che}$ mise en place (kg/m ³)	1545.11		
$P_{s\grave{e}che}$ réelle (kg/m ³)	1545.11		

Rupture			
Critère (strain %)	10		
	max. deviator	10 % strain	(σ'_1/σ'_3) max
σ'_3			
σ'_1			
strain (%)			
Déviateur max (kPa)			
Déviateur résiduel (kPa)			
(σ'_1/σ'_3) max			
ϕ' (degrés)			
ϕ			
τ max (kPa)			
τ résiduel (kPa)			

Figure A2.15 : Détails de l'essai CD HD 125

Matériel	tailings
Type de test	CD HD
# test	1
Date	08-sept-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	10
B essai	0.928
σ_c (kPa)	250
Load rate (mm/Min)	0.005

Échantillon			
$\rho_{\text{sèche visée}}$ (kg/m ³)	0	$\epsilon_{\text{initial}}$	0.71
		Sr_{initial}	0.00
Di (mm)	37.59	% solides _i	1.00
Hi (mm)	83.69		
w initiale (décimale)	0.000		
w finale (décimale)	0.220		
$\rho_{\text{sèche mise en place}}$ (kg/m ³)	1611.96		
$\rho_{\text{sèche réelle}}$ (kg/m ³)	1611.96		

Rupture			
Critère (strain %)	10		
	max. deviator	10 % strain	$(\sigma'1/\sigma'3)$ max
$\sigma'3$			
$\sigma'1$			
strain (%)			
Déviateur max (kPa)			
Déviateur résiduel (kPa)			
$(\sigma'1/\sigma'3)$ max			
ϕ' (degrés)			
ϕ			
τ max (kPa)			
τ résiduel (kPa)			

Figure A2.16 : Détails de l'essai CD HD 250

Matériel	tailings
Type de test	CD
# test	1
Date	11-sept-13
Opérateur	JL
Critère de rupture (%strain)	10
B essai	0.902
σ_c (kPa)	500
Load rate (mm/Min)	0.005

Échantillon			
$P_{s\grave{e}che}$ visée (kg/m ³)	0	$e_{initial}$	0.70
		$Sr_{initial}$	0.00
Di (mm)	37.38	% solides _i	1.00
Hi (mm)	83.78		
w initiale (décimale)	0.000		
w finale (décimale)	0.203		
$P_{s\grave{e}che}$ mise en place (kg/m ³)	1627.99		
$P_{s\grave{e}che}$ réelle (kg/m ³)	1627.99		

Rupture			
Critère (strain %)	10		
	max. deviator	10 % strain	($\sigma'1/\sigma'3$) max
$\sigma'3$			
$\sigma'1$			
strain (%)			
Déviateur max (kPa)			
Déviateur résiduel (kPa)			
(math>\sigma'1/\sigma'3) max			
ϕ' (degrés)			
ϕ			
τ max (kPa)			
τ résiduel (kPa)			

Figure A2.17 : Détails de l'essai CD HD 500

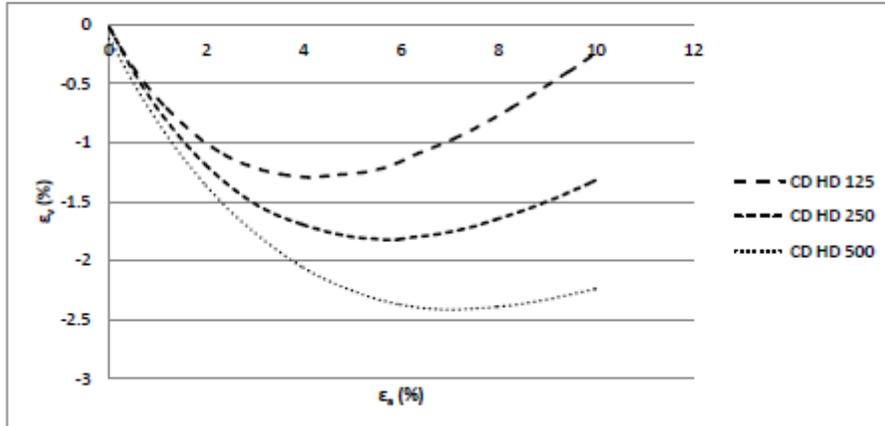
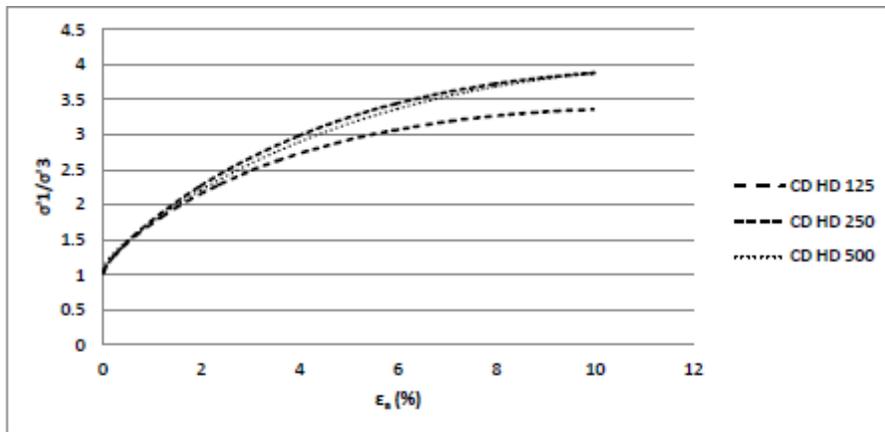
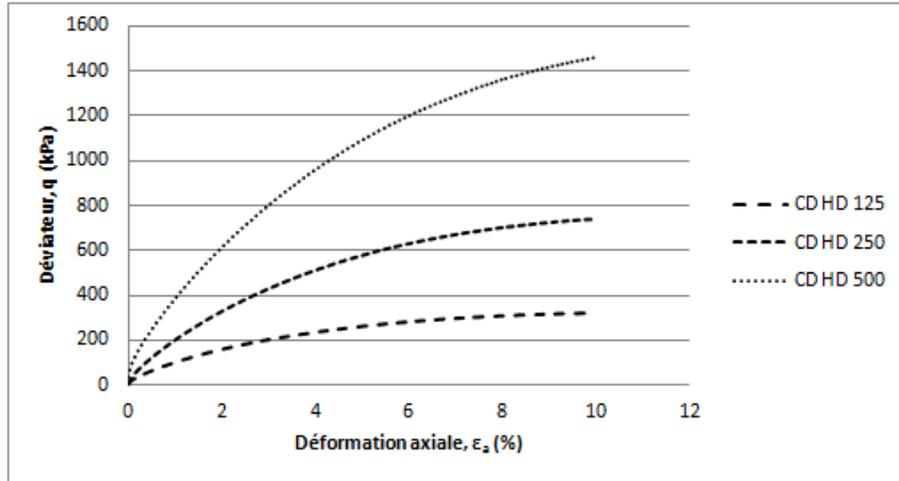


Figure A2.18 : Résultats de la série CD HD

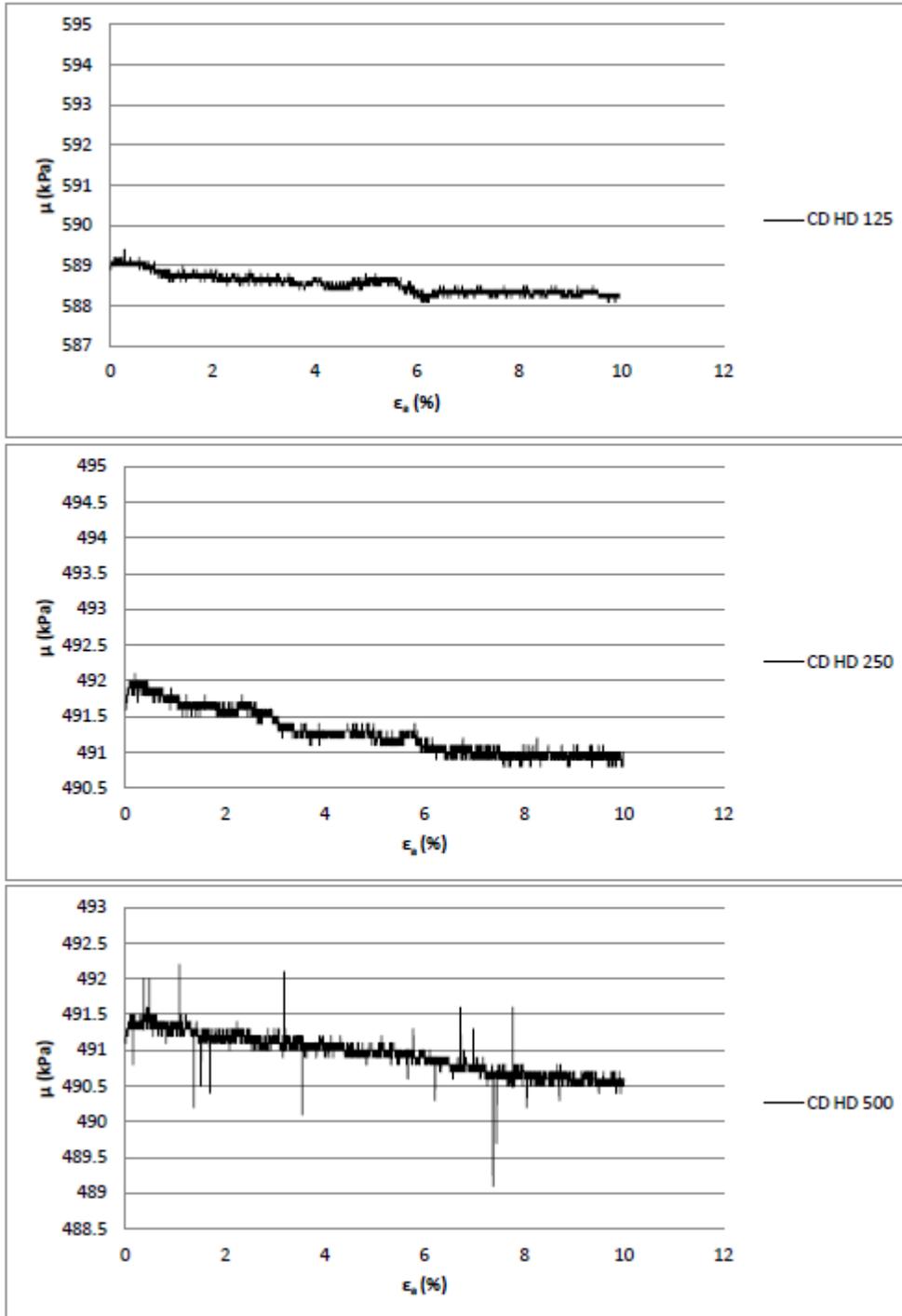


Figure A2.19 : Variations de la pression interstitielle lors du cisaillement, série HD CD

Annexe 3 : Mesures de vitesse de propagation des ondes de cisaillement

Essai oedométrique - Vs

Nom essai td1

Préparation		date		30-avr-13		moule		4 in.	
	visée	réelle				di (mm)	101.57		
w	0.35	0.37				r (m)	0.050785		
mt	850	866				aire (m2)	0.008102533		
ms	630	634				w moy	0.356		
mw	220	232							
Tare #	masse	mh	ms	mi	mf	w			
174		1	47.77	35.55	47	35	0.354		
52		1	47.85	35.49	47	35	0.358		

Pré-cons		date		30-avr-13	
m ajoutée (g)	100	200	300	=	600
Charge (kPa)	0.726439535				

Mise en place		date		01-mai-13		moule		2 pouces	
Tare #	masse	mh	ms	mi	mf	w			
26		1	41.44	32.82	40	32	0.271		
31		1	35.74	28.43	35	27	0.267		
						w moy	0.269		
M anneau	45.96		h vide	645	% solide	0.79			
M p. de verre	72.05		h avec éch.	1304	p (kg/m3)	2123.20			
M éch+ann+pv	230.88		h éch (mm)	16.7386	pd (kg/m3)	1673			
M éch. (kg)	0.11287		h éch (m)	0.0167386	ei	0.650			

Fin essai		date	
M anneau	72	mh	
M p. de verre	46	ms	
M éch+ann+pv	229	mi	
M éch. (kg)	0.11081	mf	
		w f (%)	
		lecture f	2599
		défecto	1261

Figure A3.1 : Fiche de laboratoire, essai "td1"

td1

Chargement

Charge	Charge	Lecture	Heure	Date	t (msec)					Vs
lbs	kPa	10-4 in.			c12	c6	o1	p12	p50	(m/sec)
0.125	1.91	2893	17h16	2013-05-01						#DIV/0!
0.25	3.83	2870	10h25	2013-05-02	0.50	0.30	0.26	0.26		50.72
0.5	7.66	2849	16h36	2013-05-02	0.26	0.26	0.26	0.26		64.38
1	15.31	2807	10h00	2013-05-03	0.20	0.20	0.20			83.69
2	30.63	2776	16h30	2013-05-03	0.16	0.16	0.16	0.16		104.62
4	61.26	2734	10h08	2013-05-04	0.14	0.14	0.14	0.13		121.74
8	122.51	2680	17h40	2013-05-04		0.10	0.12	0.11	0.12	153.57
15	229.71	2598	10h30	2013-05-05						#DIV/0!
20	306.28	2558	10h05	2013-05-06			0.09			185.98
30	459.42	2502	10h05	2013-05-07		0.08	0.08	0.08	0.08	211.21
45	689.13	2440	10h50	2013-05-08			0.07		0.07	239.12
60	918.84	2390	10h50	2013-05-09				0.07		257.52
45	689.13	2399								#DIV/0!
30	459.42	2413								#DIV/0!
15	229.71	2439								#DIV/0!
8	122.51	2461								#DIV/0!
4	61.26	2480								#DIV/0!
2	30.63	2502								#DIV/0!
1	15.31	2523								#DIV/0!
0.125	1.91	2591								#DIV/0!

Figure A3.2 : Chargement oedométrique, essai "td1"

Essai oedométrique - Vs

Nom essai		td4					
Préparation		<u>date</u> 11-juin-13			moule 4 in.		
		<u>visée</u>	<u>réelle</u>		di (mm)	101.57	
w		0.3	0.30		r (m)	0.050785	
mt		900	900.5		aire (m2)	0.008102533	
ms		692	692.5				
mw		208	208		w moy	0.306	
Tare #	masse	mi	mf	mh	ms	w	
	48	1.01	30.82	23.86	30	23	0.305
	14	1.03	36.17	27.89	35	27	0.308
Pré-cons		<u>date</u> 11-juin-13					
m ajoutée (g)	100	454	440	=	994		
Charge (kPa)	1.203468162						
Mise en place		<u>date</u> 12-juin-13			moule 2 pouces		
Tare #	masse	mi	mf	mh	ms	w	
	22	1.04	37.12	29.62	36.08	28.58	0.262
o		1.02	40.64	32.31	39.62	31.29	0.266
					w moy	0.264	
M anneau	72.07		h vide	636	% solide	0.79	
M p. de verre	44.05		h avec éch.	1345	p (kg/m3)	2085.20	
M éch+ann+pv	235.38		h éch (mm)	18.0086	pd (kg/m3)	1649	
M éch. (kg)	0.11926		h éch (m)	0.0180086	ei	0.67	
Fin essai		<u>date</u>					
M anneau		mi					
M p. de verre		mf					
M éch+ann+pv		mh		0			
M éch. (kg)	0	ms		0			
m récupérée		w f (%)		#DIV/0!	lecture f	défecto	

Figure A3.3 : Fiche de laboratoire, essai "td4"

td4

Chargement

Charge	Charge	Lecture	Heure	Date	t (msec)		Red	Ond	V	Vs
lbs	kPa	10-4 in.			c6	o1	H/B	H/B	(mV)	(m/sec)
0.125	1.91	2930								#DIV/0!
0.25	3.83	2894								#DIV/0!
0.5	7.66	2866								#DIV/0!
1	15.31	2831								#DIV/0!
2	30.63	2803								#DIV/0!
4	61.26	2765								#DIV/0!
8	122.51	2709								#DIV/0!
15	229.71	2653								#DIV/0!
20	306.28	2621								#DIV/0!
30	459.42	2571								#DIV/0!
45	689.13	2512								#DIV/0!
60	918.84	2465								#DIV/0!
100	1531.39	2366								#DIV/0!
60	918.84	2388								#DIV/0!
6	91.88									#DIV/0!
2	30.63									#DIV/0!
1	15.31									#DIV/0!
0.125	1.91									#DIV/0!
										#DIV/0!

Figure A3.4 : Chargement oedométrique, essai "td4"

td5

Chargement

Charge	Charge	Lecture	Heure	Date	t (msec)		Red	Ond	V	Vs
lbs	kPa	10-4 in.			c6	o1	H/B	H/B	(mV)	(m/sec)
0.125	1.91	3001								#DIV/0!
0.25	3.83	2965	12:30	2013-07-22						#DIV/0!
0.5	7.66	2935		2013-07-23						#DIV/0!
1	15.31	2907		2013-07-25						#DIV/0!
2	30.63	2862	11:21	2013-07-26						#DIV/0!
4	61.26	2817	11:37	2013-07-27						#DIV/0!
8	122.51	2756	11:13	2013-07-28						#DIV/0!
15	229.71	2690	18:35	2013-07-29						#DIV/0!
20	306.28	2656	18:11	2013-07-30						#DIV/0!
30	459.42	2601	18:00	2013-08-01						#DIV/0!
45	689.13	2537	16:23	2013-08-02						#DIV/0!
60	918.84	2485	16:15	2013-08-03						#DIV/0!
100	1531.39	2367	16:30	2013-08-04						#DIV/0!
60	918.84	2390	15:05	2013-08-05						#DIV/0!
30	459.42	2420	09:46	2013-08-08						#DIV/0!
15	229.71	2451	15:53	2013-08-08						#DIV/0!
6	91.88	2486	09:57	2013-08-09						#DIV/0!
2	30.63	2522	16:00:00	2013-08-09						#DIV/0!
1	15.31394293	2543	10:10	2013-08-10						#DIV/0!
0.125	1.91	2610	16:46	2013-08-10						#DIV/0!

Figure A3.6 : Chargement oedométrique, essai "td5"

Annexe 4 : Appareillage

« Load Cell »

File: « Load Cell_36461 »

Transducer name: load cell

Serial number: 36461

Sensitivity: 0.714318 Kn/mv (Il faudra ensuite le mettre à zéro, car il a un offset important)

«Pore Pressure»

File: « PorePressure_014704 »

Transducer name: pore pressure

Serial number: 014704

Sensitivity: 19.84324 kPa/mv

«Cell Pressure»

File: «PneumaticCP_10616_69647_ch1 »

Transducer name: pneumatic CP

Serial number: 10616_69647_ch1

Sensitivity: 0.10223 kPa/mv

«Displacement»

File: «Displacement_Encoder »

Transducer name: displacement

Serial number: encoder

Sensitivity: 0.000208 mm/count

Figure A4.1 : Paramètres de calibration des capteurs du triaxial GDS ELDYN

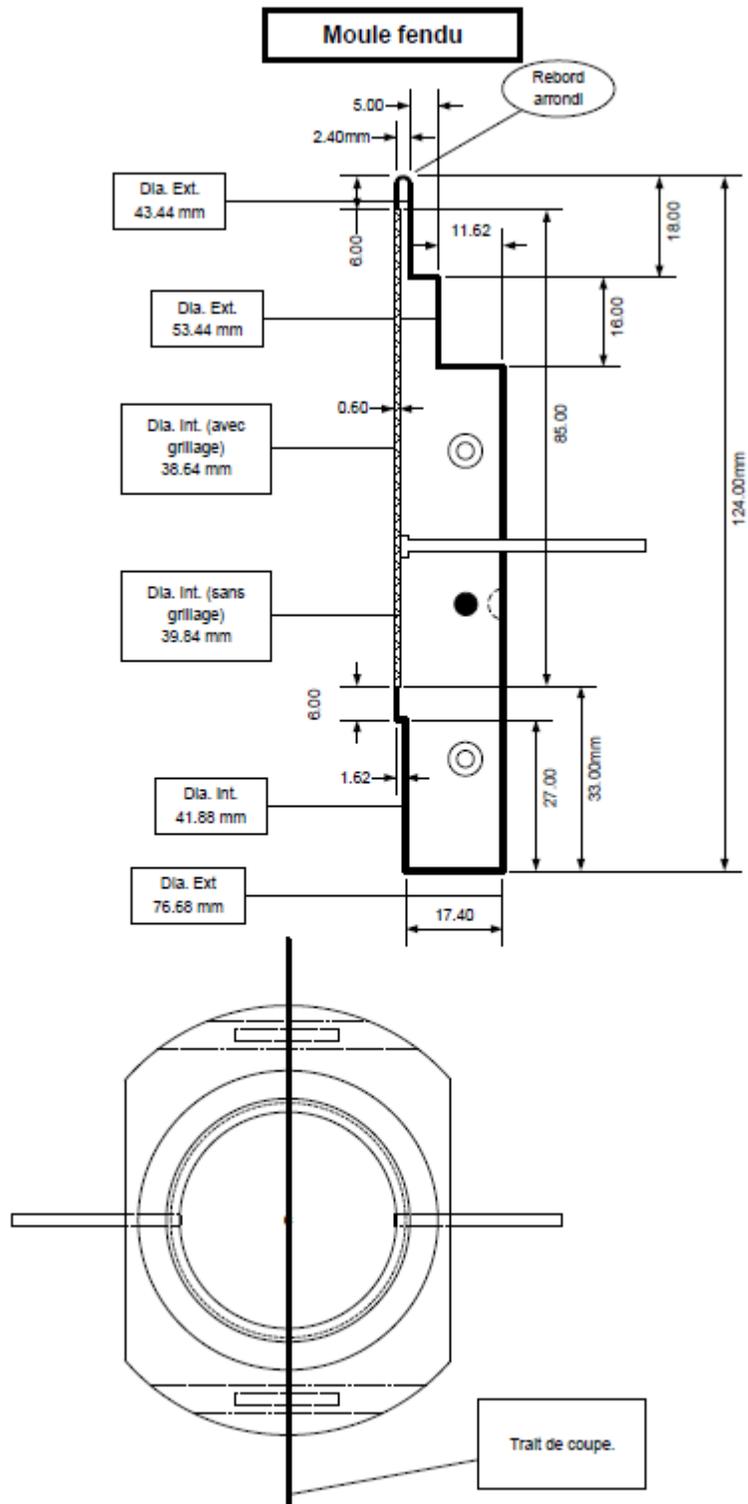


Figure A4.2 : Dessin du moule à vacuum

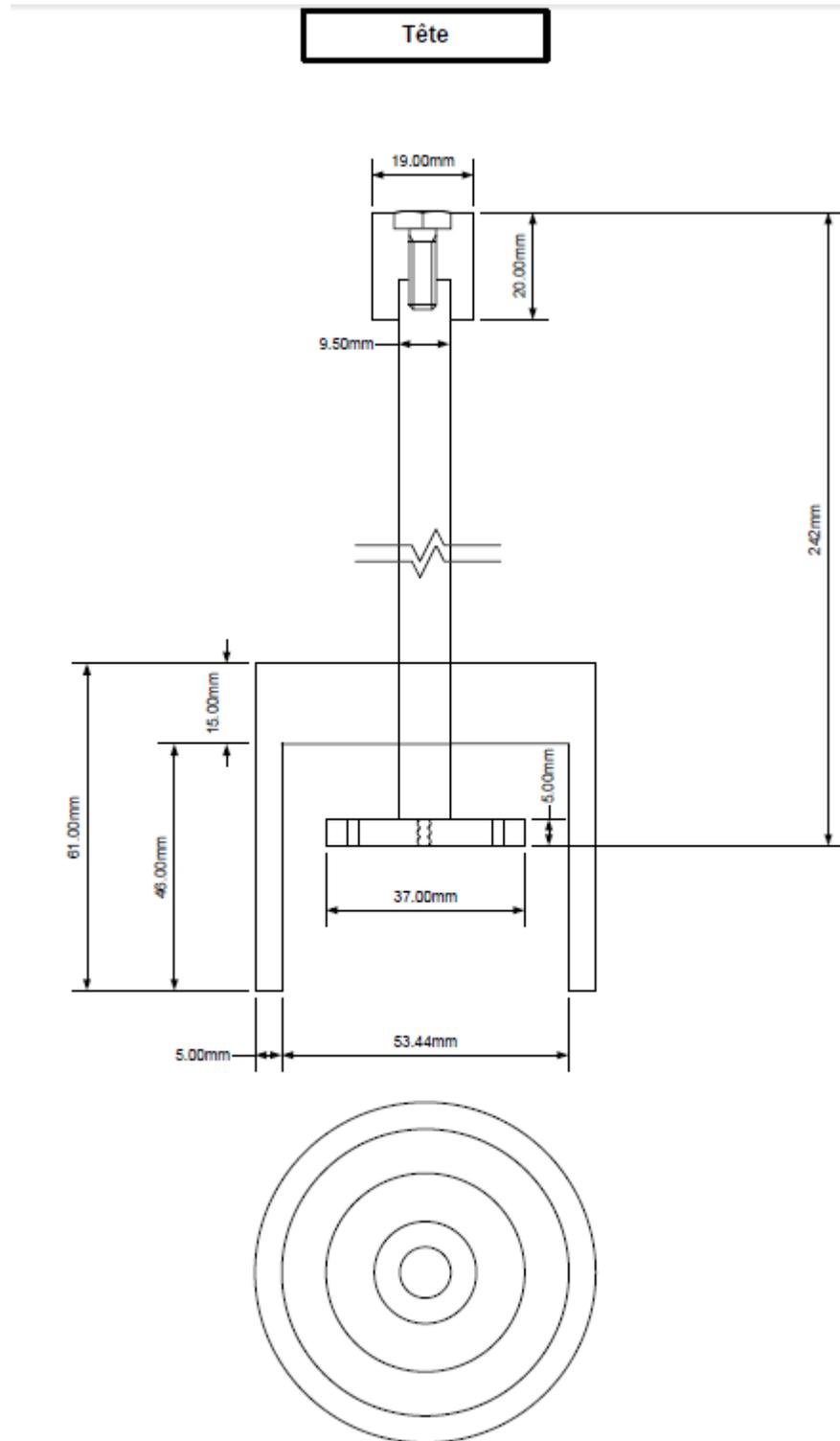


Figure A4.3 : Dessin de la tête du moule à vacuum

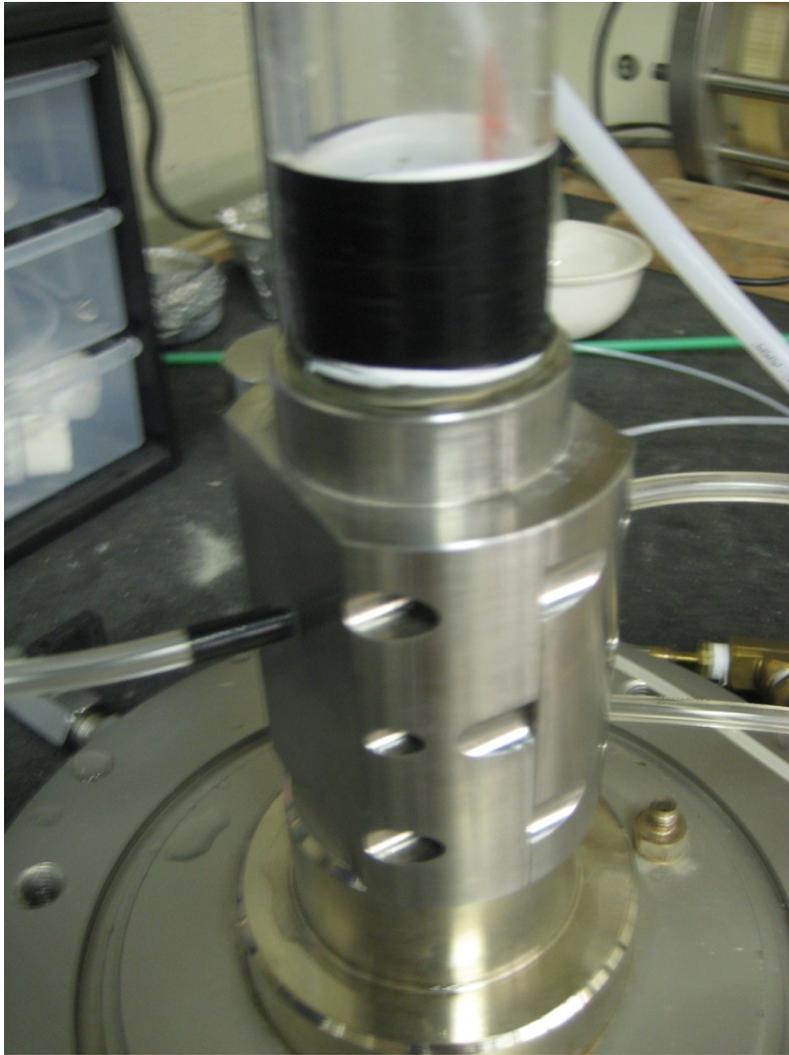


Figure A4.4 : Détail de la jonction entre la colonne de déposition hydraulique et le moule à vacuum



Figure A4.5 : Pré-consolidation de l'échantillon lors de la déposition hydraulique

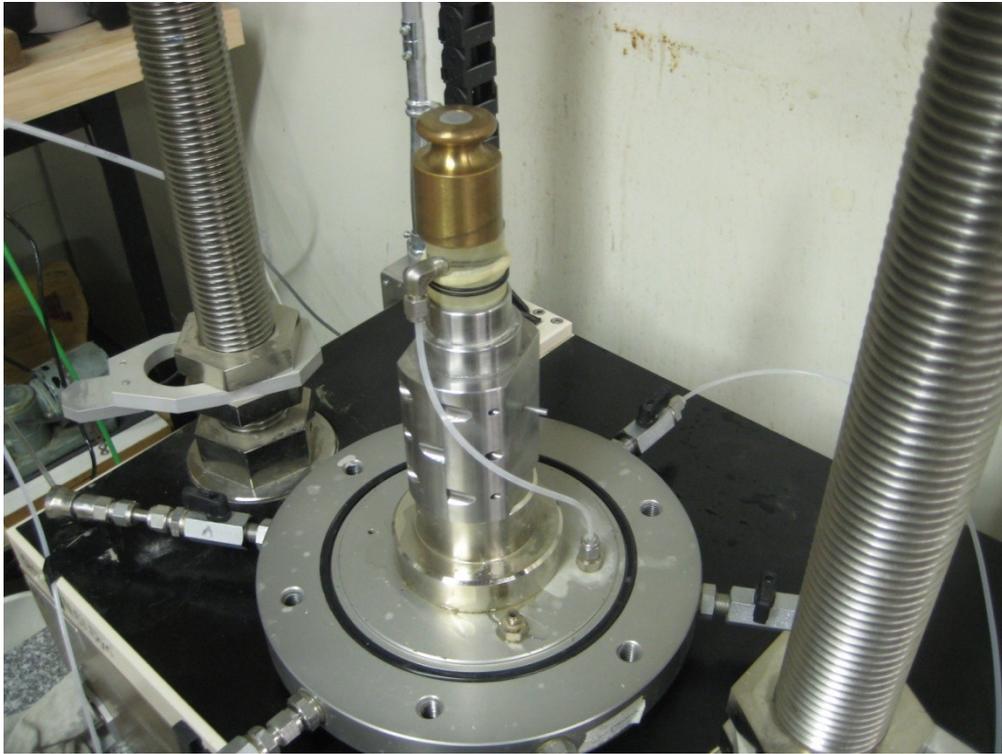


Figure A4.6 : Échantillon mis en place par déposition hydraulique, prêt à être démoulé

Pressure Controllers	
Product	Power (Watts)
ELDPC (Enterprise Level Controller)	50
STDDPC 3Mpa (Original Standard Controller)	130
STDDPCv2 (2010 to date)	50
ADVDPc 2 - 4Mpa (Advanced Controller)	130
ADVDPc 16 - 64Mpa	150
ADVDPc 128Mpa – 150MPa	1000
Sigma 3 dynamic controller	
Pneumatic Controller	50

Data Acquisition	
Serial Pad (8-Ch. Data Logger)	50
ELDCS (Dynamic Control System 4ch)	50
DCS (Dynamic Control System 8ch)	100
ADVDCS (Dynamic Control System 16ch)	100
MUX (Serial Multiplexer)	50
Bender Element Master Signal Conditioning Unit	50
LVDT Signal Conditioning Box	50
Resonant Column – control box & power amplifier	

Loadframes/Similar	
Force Actuator	150
Triscan 50kN Loadframe	150
Triscan 100kN Loadframe	150
ELDyn 5kN (Enterprise Level Dynamic Loadframe)	2400
ELDyn 10kN	3600
Static MINIDyn 40kN	150
MINIDyn 2hz 10kN	2400
MINIDyn 2hz 16-20kN	3600
MINIDyn 2hz 40kN	3-phase 9000

Other	
Typical PC + Monitor.	550

Figure A4.7 : Consommation électrique des appareils GDS

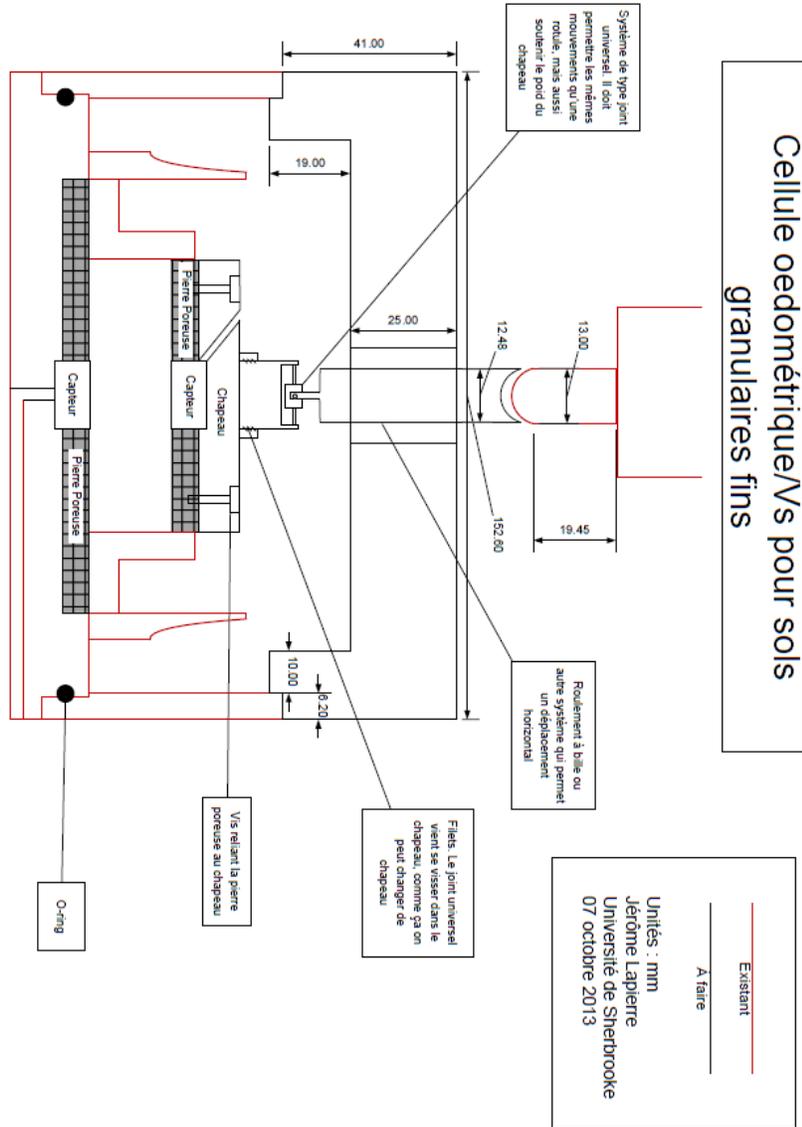


Figure A4.8 : Schéma d'une nouvelle cellule permettant la mesure des V_s sur des sols granulaires fins



Figure A4.9 : Deux anneaux pour argile reliés ensemble, utilisés pour la mise en place M2

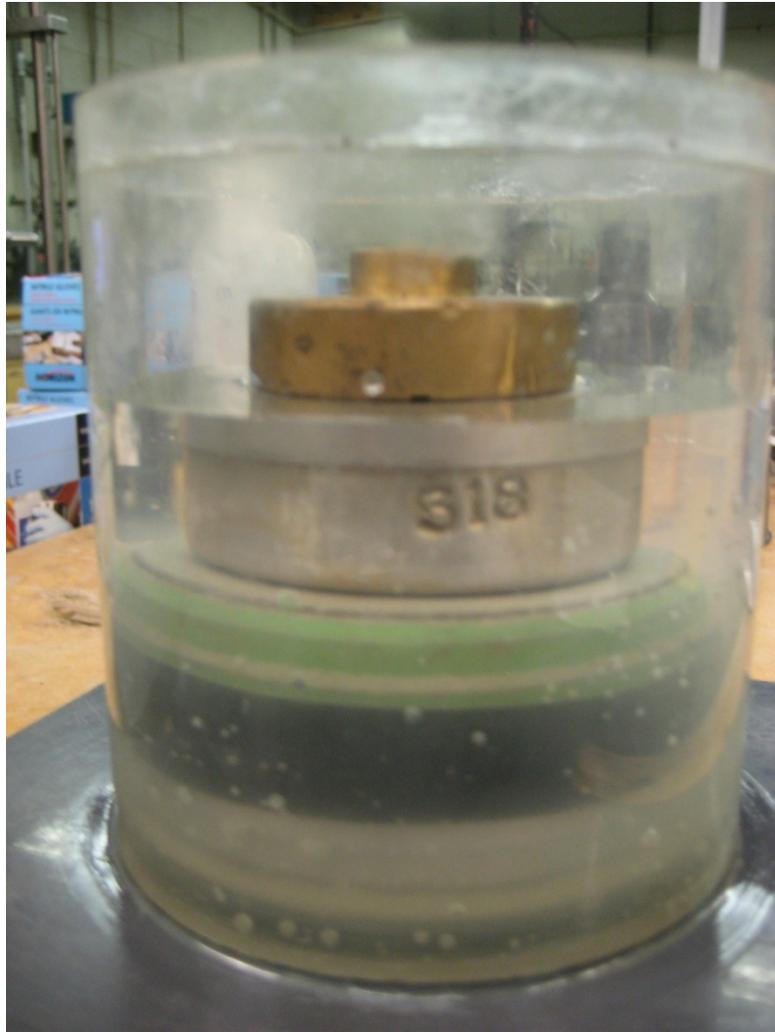


Figure A4.10 : Échantillon mis en place selon la méthode M2



Figure A4.11 : Échantillon mis en place selon la méthode M1

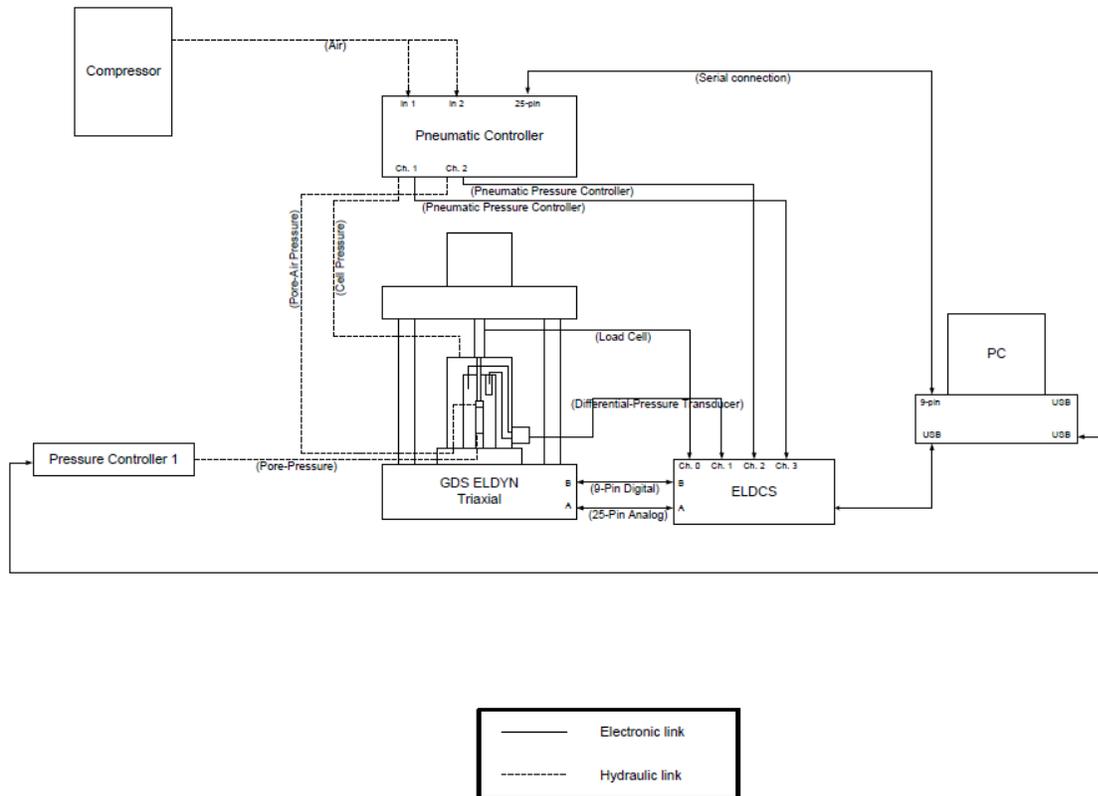


Figure A4.12 : Schéma de montage de l'appareil triaxial en mode non-saturé

Liste des références

- [1] Al-Tarhouni, M., Simms, P. et Sivathayalan, S. (2011). Cyclic behaviour of reconstituted and desiccated- rewet thickened gold tailings in simple shear. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 48, numéro 7, p. 1044-1060.
- [2] ASTM (2011). *ASTM D4767-11. Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 14 p.
- [3] ASTM (2011). *ASTM D7181-11. Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 11 p.
- [4] Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique*, volume 50, numéro 5, p. 487-508.
- [5] Baoshan, Z. et Chopin, L. (1983). Shear Wave Velocity and Geotechnical Properties of Tailings Deposits. Dans *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 347-353.
- [6] Been, K. et Li, A. L. (April 2009). Proceedings of the 12th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Vina del Mar, Chile. Dans Jewel, R., Fourie, A., Barrera, S. et Wiertz, J., *Soil Liquefaction and Paste Tailings*. Australian Center for Geomechanics, Perth, Australia, p. 281-290.
- [7] Benhamed, N., Canou, J. et Dupla, J. -. (2007). Propriétés de liquéfaction et structure des sables lâches. Dans École Centrale Paris, *7ième Colloque National AFPS 2007 - École Centrale Paris*
- [8] Bishop, A. W. et Blight, G. E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Géotechnique*, volume 13, numéro 3, p. 177-197.
- [9] Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 44, numéro 9, p. 1019-1052.
- [10] Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, volume January, p. 257.
- [11] Castro, G. et Poulos, S. J. (1977). Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility. *ASCE J Geotech Eng Div*, volume 103, numéro 6, p. 501-516.
- [12] Chang, H. P. N. et Heymann, G. (2005). Shear wave velocity of gold tailings. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, volume 47, numéro 2, p. 15-20.

- [13] Chang, N., Heymann, G. et Clayton, C. (2011). The effect of fabric on the behaviour of gold tailings. *Geotechnique*, volume 61, numéro 3, p. 187-197.
- [14] Contreras, C. A. et James, M. (2013). A laboratory investigation of the cyclic resistance of tailings. Dans *Proceedings of the 66th Canadian Geotechnical Conference*. GeoMontreal 2013, Montreal,
- [15] Duncan, J. M. et Chang, C. -. (2002). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Dans Allen Marr W., *A History of Progress: Selected U.S. Papers in Geotechnical Engineering*. 1347-1371.
- [16] Éthier, Y. A. (2009). *La mesure en laboratoire de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 1-256p.
- [17] Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M. et Mulligan, D. R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*, volume 36, numéro 2, p. 114-122.
- [18] Garga, V. K. et McKay, L. D. (1984). Cyclic triaxial strength of mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, volume 110, numéro 8, p. 1091-1105.
- [19] Golder Associés (2010). *Mémoire technique - préliminaire*
- [20] Guermonprez, T. (2012). *Essais de laboratoire sur les résidus miniers épais (Projet d'intégration)*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke,
- [21] Holtz, R. D. et Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*, Presses Internationales Polytechnique édition, Montréal, 808 p.
- [22] Hujeux, J. C. (1985). Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. *Génie Parasismique (Davidovici V.)*, volume Presses ENPC, p. 287-302.
- [23] Jefferies, M. et Been, K. (2006). *Soil Liquefaction, A critical state approach*. Taylor & Francis, New York, 479 p.
- [24] Juneja, A. et Raghunandan, M. E. (2011). Effect on cyclic response and liquefaction resistance due to de-saturation of sand. Dans *Geotechnical Special Publication*, p. 2594-2604.
- [25] Kuerbis, R. et Vaid, Y. P. (1988). Sand sample preparation - the slurry deposition method. *Soils and Foundations*, volume 28, numéro 4, p. 107-118.
- [26] L'actualité - supplément publicitaire (2012). Portrait sectoriel : les mines. *L'actualité*, volume 37, numéro 1, p. 45.

- [27] Lara, J. L. et Barrera, S. (1999). Seismic Behaviour of Tailings Deposits and Alternatives for Use in the Post-Operation Stage. *Chile*,
- [28] Martin, G. R., Finn, W. D. L. et Seed, H. B. (1975). FUNDAMENTALS OF LIQUEFACTION UNDER CYCLIC LOADING. *ASCE J Geotech Eng Div*, volume 101, numéro 5, p. 423-438.
- [29] Mohamad, R. et Dobry, R. (1986). Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand. *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, volume 112, numéro 10, p. 941-958.
- [30] Mousseau, N. (2012). *Le défi des ressources minières*. Éditions MultiMondes, Québec, 260 p.
- [31] Naeini, S. A. et Baziar, M. H. (2000). Effect of sample preparation on steady state. Dans *Sessions of Geo-Denver 2000 - Geotechnical Measurements: Lab. and Field, GSP 106*, volume 294p. 16-29.
- [32] Nuth, M. et Laloui, L. (2008). Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, volume 32, numéro 7, p. 771-801.
- [33] Okamura, M. et Noguchi, K. (2009). Liquefaction resistances of unsaturated non-plastic silt. *Soils and Foundations*, volume 49, numéro 2, p. 221-229.
- [34] Poulos, S. J. (1971). *The Stress-Strain Curves of Soils*. Geotechnical Engineers Inc., Winchester, MA, 122 p.
- [35] Poulos, S. J. (1981). The steady state of deformation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, volume 107, numéro GT5, Proc. Paper, 16241, p. 553-562.
- [36] Qiu, Y. et Segoo, D. C. (2001). Laboratory properties of mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 38, numéro 1, p. 183-190.
- [37] Rodriguez-Roa, F. (2000). Observed and calculated load-settlement relationship in a sandy gravel. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 37, numéro 2, p. 333-342.
- [38] Sharma, R., Baxter, C. et Jander, M. (2011). Relationship between shear wave velocity and stresses at failure for weakly cemented sands during drained triaxial compression. *Soils and Foundations*, volume 51, numéro 4, p. 761-771.
- [39] Skempton, A. W. (1984). *Selected Papers on Soil Mechanics*, Thomas Telford Limited édition London, 281 p.

- [40] Swidzinski, W. et Mierczynski, J. (2005). Instability line as a basic characteristics of non-cohesive soils. *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics*, volume 52, numéro 1, p. 59-85.
- [41] Vaid, Y. P. et Sivathayalan, S. (2000). Fundamental factors affecting liquefaction susceptibility of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 37, numéro 3, p. 592-606.
- [42] Vick, S. G. (1990). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*, Bi Tech Publishers LTD édition Vancouver, 369 p.
- [43] Vietti, A. J., Boshoff, J. C. J. et Cope, A. (2011). Does thickening save water? *SIAMM - Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, volume 111, numéro 2, p. 63-66.
- [44] Wijewickreme, D., Sanin, M. V. et Greenaway, G. R. (2005). Cyclic shear response of fine-grained mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 42, numéro 5, p. 1408-1421.
- [45] Xu, L., Cai, F., Wang, G. et Ugai, K. (2013). Nonlinear analysis of laterally loaded single piles in sand using modified strain wedge model. *Computers and Geotechnics*, volume 51, numéro 0, p. 60-71.
- [46] Youd, T. L. (1973). Liquefaction, Flow and Associated Ground Failure. p. 146-155.