

Chapitre 4.

Programme expérimental

Dans cette section, la procédure suivie lors de la réalisation des essais de cisaillement en compression triaxiale monotonique et des tests triaxiaux à chargement répété (RLT) est décrite en détail.

4.1. Essai de compression triaxiale monotonique

4.1.1. La préparation des échantillons

Les échantillons ont été préparés dans un moule (récipient creux) composé de deux demi-cylindres. La première membrane en latex, utilisée pour aligner le volume de l'échantillon avec le moule, a été étirée autour du moule et scellée avec deux joints toriques.

Après avoir recombinaé les fractions d'agrégats séchés pour atteindre précisément la granulométrie de chaque GSD, l'eau a été ajoutée pour obtenir une teneur en eau initiale appropriée à partir du poids du sol sec. Selon D7181-11 (2011), les échantillons ont été reconstruits par la méthode de compactage humide. Dans cette méthode, à l'aide d'une cuillère, la masse de sol humide a été transférée dans le moule de compactage en 6 couches. Chaque couche a été compacté en dynamique tomber le marteau sur une hauteur d'environ 150 mm.

Ensuite, des pierres poreuses, bouillies au préalable dans l'eau pendant 30 minutes, ainsi que des papiers filtres ont été placés sur le fond et sur le plateau supérieur. Étant donné que la déformation non uniforme est un facteur important qui peut affecter le comportement du sol, des plateaux d'extrémité lubrifiés sont utilisés pour minimiser la localisation des contraintes causées par les frottements. Une deuxième membrane en latex

est ajoutée pour protéger l'échantillon contre d'éventuelles fuites. Le recours à une troisième membrane en latex pour les échantillons composés de particules angulaires (matériaux de transition) ainsi qu'une mince feuille en plastique pour ces échantillons avec $D_{\max} = 150$ mm étaient nécessaires. Les membranes ont été scellées à la base avec deux joints toriques. Il convient de noter que les pierres poreuses et la base étaient saturées en eau.

4.1.2. Préparation de la cellule

Après assemblage de la cellule triaxiale, les opérations suivantes ont été effectuées :

1. Déplacer le piston pour le placer au centre du plateau supérieur.
2. Mettre le piston à charge axiale en contact avec le plateau de l'éprouvette pour permettre un positionnement correct du piston sur celui-ci.
3. Remplir la cellule d'eau jusqu'à dépasser la hauteur de l'échantillon.
4. Veiller à ce que les capteurs de pression interstitielle et pression cellulaire et les lignes internes de l'appareil soient saturés en eau afin de chasser l'air et ainsi minimiser les erreurs résultant de la compression de l'air emprisonné.

La pression interstitielle est mesurée au moyen d'un capteur de pression PX102 de la compagnie *Omega*. De plus, la pression cellulaire est quant à elle mesurée à l'aide d'un capteur de pression de la série 85 C de la compagnie *Measurements Specialties*. La pression interstitielle et la pression cellulaire ont une précision de 0,25 % et 0,15 % respectivement et une capacité maximale de 100 PSI.

5. Raccorder les transducteurs de pression interstitielle et pression cellulaire.

Le spécimen complet et l'échantillon placé dans la cellule sont présentés à la Figure 4-1.



Figure 4-1 a) Spécimen complet, et b) Spécimen placé dans la cellule

4.1.3. Avant la saturation

Avant de commencer la saturation, le dioxyde de carbone (CO_2) a d'abord circulé à travers l'échantillon sous une petite pression de confinement pendant environ 20 minutes. Par la suite, de l'eau désaérée a circulé à travers la base de l'échantillon à un rythme très lent et la quantité d'eau provenant de son sommet a été mesurée. Ce processus a été répété jusqu'à ce que la différence entre la quantité d'eau entraînée et chassée à deux reprises consécutives soit proche. La pression interstitielle a été soigneusement surveillée pendant la circulation de l'eau afin de s'assurer qu'aucune pression interstitielle ne se soit développée dans l'échantillon.

4.1.4. Saturation

La phase de saturation vise à éliminer les bulles d'air qui peuvent être piégées dans l'échantillon et à les remplacer par de l'eau désaérée sans contraindre de manière indésirable l'échantillon. Il convient de noter que la mise en solution de l'air dans l'eau dépend du temps et de la pression utilisée. La phase de saturation a commencé par le

système de drainage initialement saturé. Par conséquent, une contrainte de confinement de 20 kPa a été appliquée, puis la vanne de drainage de l'éprouvette a été ouverte. Par la suite, lorsque la pression interstitielle au bas de l'éprouvette se stabilise, la contre-pression est appliquée progressivement par les étapes suivantes :

1. Fermer la vanne de drainage.
2. Augmenter la pression cellulaire de 50 kPa.
3. Calculer le paramètre de pression interstitielle de Skempton B qui sert à vérifier le degré de saturation de l'échantillon. La valeur B est définie par l'équation suivante:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad \mathbf{4-1}$$

Où:

Δu = changement de pression interstitielle résultant de l'augmentation de la pression cellulaire.

$\Delta \sigma_c$ = variation de la pression cellulaire.

4. Augmenter la pression interstitielle de 50 kPa.
5. Ouvrir la vanne de vidange.
6. Attendre un temps suffisant.
7. Répéter toutes les étapes précitées jusqu'à une valeur B d'environ 0,95.

Il convient de noter que la différence entre la pression cellulaire et la contre-pression ne dépassait pas 10 kPa.

4.1.5. Consolidation

La phase de consolidation a été effectuée pour atteindre l'état des contraintes désiré en conditions drainées. Les contraintes de confinement ont été appliquées avec des valeurs de 100, 200 et 400 kPa. La procédure de consolidation est la suivante :

1. Prendre des lectures initiales de tous les capteurs.
2. Fermer la vanne de drainage, en gardant la contre-pression constante, ensuite la pression cellulaire est augmentée pour atteindre la pression de consolidation souhaitée. Valeur B est calculée à nouveau pour valider la valeur B obtenue.
3. Ouvrir la vanne de drainage afin de laisser l'échantillon se consolider.
4. Attendre quelques minutes jusqu'à ce que le volume d'eau sortant de l'échantillon soit stabilisé et que la pression interstitielle reste constante.

Au cours de la phase de consolidation, le volume d'eau sortant de l'échantillon ainsi que le volume d'eau entraîné dans la cellule ont également été mesurés.

4.1.6. Étape de cisaillement

Lorsque la consolidation a été terminée, la pression cellulaire a été constamment maintenue. La charge axiale a été appliquée en utilisant une déformation axiale contrôlée à une vitesse de déformation constante jusqu'à une déformation axiale de 13 à 20 %. Dans cette étude, les conditions drainées et non drainées ont été testées. Par conséquent, durant les conditions drainées, les changements de volume dans l'échantillon et dans la cellule ont été enregistrés, et durant les conditions non drainées, la variation de la pression interstitielle a été mesurée avec précision. Pour la vitesse de déformation, de 0,16 et 0,4 mm/min ont été adoptés pour les échantillons plus petits et plus grands, respectivement. Ces vitesses ont été choisis afin d'assurer une dissipation totale de la pression interstitielle pendant le

cisaillement drainé et pour atteindre une stabilisation complète des pressions interstitielles pendant le cisaillement non drainé.

4.1.7. Démontage du système et de l'échantillon

À la fin du test, le système et l'échantillon ont été démontés en observant les étapes suivantes :

1. Fermer la vanne de drainage.
2. Réduire la pression cellulaire pour atteindre la même valeur que la contre pression de saturation.
3. Ouvrir la vanne de drainage et diminuer σ_c et u en même temps.
4. Vider l'eau de la cellule.
5. Ouvrir la cellule.
6. Mesurer la masse finale de l'échantillon pour vérifier le poids du sol sec.

4.1.8. Correction des propriétés des échantillons

- Après la consolidation

La section transversale de l'échantillon après consolidation, A_c , peut être calculée par l'équation suivante (Bardet 1997) :

$$A_c = (V_0 - \Delta V_{sat} - \Delta V_c - \Delta V_e) / H_c \quad \mathbf{4-2}$$

Où :

V_0 = volume réel

ΔV_{sat} = Changement de volume de l'échantillon pendant la saturation = $3V_0 \left(\frac{\Delta h_s}{H_0} \right)$

ΔV_c = Changement de volume de l'échantillon pendant la consolidation

ΔV_e = Changement de volume en raison de la pénétration de la membrane. La quantité de pénétration de la membrane suggérée par Baldi and Nova (1984) est :

$$\Delta V_e = \left(\frac{D_{50}}{2 \times D_0} \right) \times [V_0 \times \left\{ \frac{\sigma'_3 \times D_{50}}{E_m \times t_m} \right\}]^{1/3}$$

* Selon D7181-11 (2011), on suppose une valeur typique de $E_m = 1400$ kPa pour les membranes en latex.

H_c = Hauteur de l'échantillon qui est la hauteur réelle moins le changement de hauteur de l'échantillon à la fin de la consolidation

- Pendant le cisaillement

La déformation axiale est donnée par :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_c} \quad \mathbf{4-3}$$

Où :

ΔH = Changement de hauteur mesuré depuis le début de la phase de cisaillement

et, la surface transversale est calculée comme suit :

$$A = \frac{A_c}{(1 - \varepsilon_1)} \quad \mathbf{4-4}$$

4.1.9. Correction de la résistance des membranes

La membrane en latex dans les essais triaxiaux peut reprendre une partie de la charge appliquée à l'échantillon. Selon D7181-11 (2011), la contrainte de cisaillement portée par la membrane est calculée par l'équation suivante :

$$\Delta q = 4 \frac{E_m \times t_m \times \varepsilon_1}{d_c} \quad \mathbf{4-5}$$

Où :

Δq = Correction qui est soustraite de la contrainte déviatorique mesurée

d_c = Diamètre de l'échantillon après consolidation ($\sqrt{4A_c/\pi}$)

4.2. Essais triaxiaux à chargement répété (RLT)

La détermination des propriétés élastiques des sols à petites déformations nécessite un test permettant de mesurer les déformations de l'ordre de 0,01 %. Le test « triaxial à chargement répété (RLT) » a connu des progrès conséquents au cours des deux dernières décennies. L'opération suivante a été réalisée pour examiner la réponse élastique des matériaux testés dans le domaine des petites déformations à l'aide de tests RLT.

Une fois l'échantillon préparé, trois LVDT (Linear Variable Differential Transformer) internes ont été installés sur l'échantillon à des écarts de 120°, comme le montre la Figure 4-2. Les LVDT, mesurant les déplacements verticaux, ont été fixés à l'échantillon à mi-hauteur avec une distance d'enregistrement d'environ 100 et 150 mm pour des échantillons de hauteur respectivement 200 et 300 mm. Les LVDT ont été maintenus en place par des élastiques. Avant d'exécuter le test, les LVDT ont été calibrés avec précision. La Figure 4-3 montre les courbes de calibrations. Les transducteurs sont connectés à un système d'acquisition de données pour transférer des valeurs de voltage en longueur de LVDT. Pour ce transfert, les paramètres b et m de calibrations du Tableau 4-1 sont inscrites l'interface de programmation du logiciel d'acquisition LabVIEW.

La fixation des LVDT interne directement sur l'échantillon donne un avantage considérable sur la précision de la mesure des déplacements. En effet, lorsque le LVDT externe est attaché au piston de chargement à l'extérieur de la chambre celui-ci mesure la déformation totale de l'appareil triaxial, y compris la déformation de l'échantillon, le cadre de

l'appareil, et les connexions, tandis que le LVDT interne enregistre uniquement la modification de la hauteur de l'échantillon.

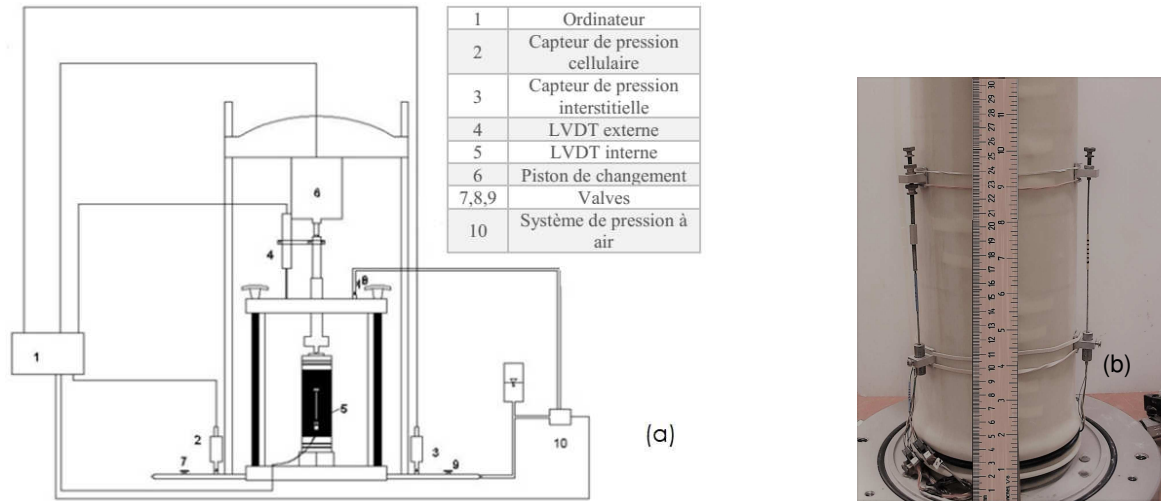


Figure 4-2 a) Représentation du montage de l'essai triaxial avec le LVDT externe (Jamin 2014), b) Échantillon et LVDT. Règle en centimètre

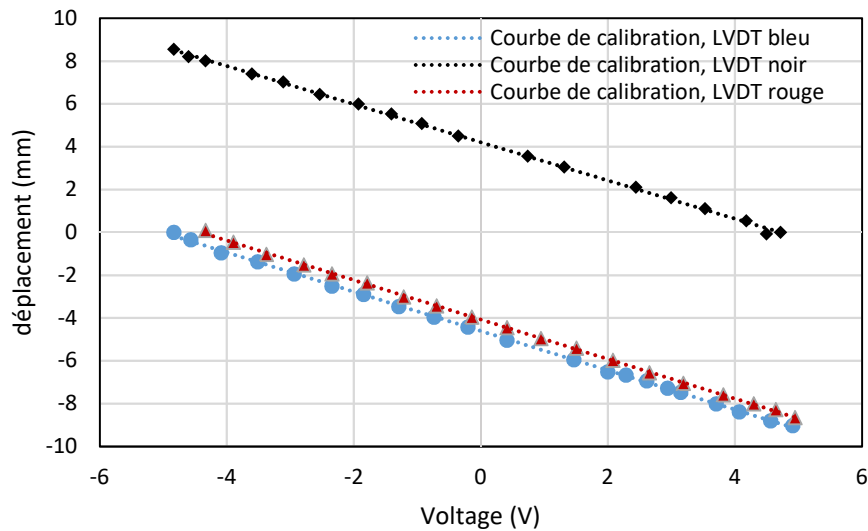


Figure 4-3 Courbes de calibration des LVDT utilisés

Tableau 4-1 Paramètres des courbes linéaires de calibration des LVDT utilisés

	b	m	R ²
Noir	4.2061	-0.8913	0.9992
Bleu	-4.0712	-0.9231	0.9996
Rouge	-4.6056	-0.9182	0.9996

Ensuite, l'échantillon a été fixé sur la base, la chambre triaxiale a été assemblée et le transducteur de pression cellulaire a été connecté.

Dans l'étape suivante, l'échantillon a été consolidé pour simuler l'état in situ. Après cela, il a été chargé sous trois cycles de chargement-déchargement. L'essai a été effectué dans des conditions drainées (les vannes supérieure et inférieure sont ouvertes). À chaque cycle, les déformations ont été maintenues jusqu'à la mesure d'une charge verticale maximale, ce qui correspondait, selon le diamètre de l'échantillon, à la contrainte déviatorique maximale. Le Tableau 4-2 résume les valeurs des pressions cellulaires, des contraintes déviatoriques maximales et les valeurs des charges verticales maximales en fonction du diamètre des échantillons.

Tableau 4-2 Les valeurs des charges verticales maximales

Diamètre d'échantillon (mm)	σ_c & q_{max} (kPa)	Charge verticale maximale (kN)
100	100	0.78
	200	1.56
	400	3.12
150	100	1.76
	200	3.53
	400	7.06

Une fois le test terminé, la pression de la cellule a été réduite à zéro, la cellule a été ouverte et les LVDT ont été désinstallés.

4.3. Programme de test

Dans le programme, 42 tests en compression triaxiale monotonique drainée et non drainée ont été effectués (Tableau 4-3). De plus, le programme de test pour les tests RTL, dans lesquels l'échantillon a été chargé sous trois cycles de chargement-déchargement au niveau des petites déformations, est donné par le Tableau 4-4. Le raisonnement pour trois fois répétitions du chargement-déchargement est d'assurer la

précision des résultats et d'éviter de rapporter des données fausses ou erronées. En outre, afin d'utiliser le même échantillon pour les essais RLT et triaxiaux, les valeurs de la contrainte maximale du déviateur (q_{max}) et σ_c sont choisies de façon à ce que q_{max} en les essais RLT ne dépasse jamais 20% de la résistance au cisaillement maximale (q_F). Deux cellules différentes avec un diamètre de 100 et 150 mm et avec le rapport hauteur / diamètre de 2 sont utilisées pour les tests. Les appareils d'essai utilisés appartiennent à l'Université Laval. Le programme de tests en laboratoire est organisé en fonction du rapport de taille (défini comme le diamètre de l'échantillon (D_s) divisé par le D_{max}). Le D_{max} des matériaux est de 10 mm pour les échantillons de 100 mm, 31,5 mm pour les échantillons de 100 mm, et 50 mm pour les échantillons de 150 mm, correspondant aux rapports de taille de 10, 3,2 et 3 respectivement.

Tableau 4-3 Programme de test pour les tests en compression triaxial monotonique

No	Matériel	Rapport de taille	D _{max} (mm)	σ _c (kPa)	Condition de drainage	ω (%)	ρ _d (kN/m ³)	D _r (%)			
1	Filtre	3.2	31.5	100	Drainé	7	21.5	94.1			
2				200			21.6	94.1			
3				500			21.7	94.1			
4				100	Non drainé		21.4	87.6			
5				200			21.7	95.9			
6				400			21.6	94.7			
7				100	Drainé		21.4	5	21.4	88.2	
8				200			21.7		94.1		
9				400			21.6		94.1		
10				100	Non drainé		21.6		94.7		
11				200			21.7		95.3		
12				400			21.6		95.3		
13		10	10	100	Drainé	6.3	21.3		75		
14				200			21.3		75		
15				400			21.3		75		
16				100	Non drainé		21.3		75		
17				200			21.1		68.8		
18				400			21.3		75		
19				3	50		100	Drainé	4	21.1	87.5
20							200			21.1	87.5
21							430			21.3	95
22							100	Non drainé		21.2	93.7
23							200			21.2	93.7
24							400			21.3	93.7
25	Transition	3.2	31.5			100	Drainé	5.3		21.3	71.9
26						200				21	81.3
27						400				20.2	62.5
28						100	Non drainé			20.0	100
29						200				20.3	96.9
30						400				20.8	90.6
31				10	10	100	Drainé		5	21.3	76.9
32						200				21.3	76.9
33						400				21.3	76.9
34						100	Non drainé			21.2	73.1
35						200				21.3	76.9
36						400				21.3	69.2
37		3	50			100	Drainé			22.1	95.4
38						200				21.9	95.4
39						400				21.5	95.4
40						100	Non drainé			21.5	98.7
41						200				21.5	97.4
42						400				21.7	100

Tableau 4-4 Programme des tests RLT

No	Matériel	Rapport de taille	σ_c (kPa)	ω (%)	ρ_d (kN/m ³)	D_r		
1	Filtre	3.2	100	7	21.5	94.1		
2			200		21.6	94.1		
3			400		21.7	94.1		
4		10	3	100	5	21.4	88.2	
5				200		21.7	94.1	
6				400		21.6	94.1	
7				100		6.3	21.3	75
8				200		21.3	75	
9				400		21.3	75	
10		3	3	100	4	21.1	87.5	
11				200		21.1	87.5	
12				400		21.3	95	
13	Transition	3.2	100	5.3	20.6	71.9		
14			200		21	81.3		
15			400		20.2	62.5		
16		10	3	100	5	21.3	76.9	
17				200		21.3	76.9	
18				400		21.3	76.9	
19		3	3	100	3	22.1	95.4	
20				200		21.9	95.4	

[MCours.com](https://www.MCours.com)