



RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 1 :

Etude à l'appareil triaxial du comportement cyclique non drainé du sable du site expérimental de Dunkerque

Auteur : Jean CANOU

Organisme : ENPC

R/13/SOL/15
LC/12/SOL/37
Juillet 2013

SOLCYP - FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Etude à l'appareil triaxial du comportement cyclique non drainé du sable du site expérimental de Dunkerque

RAPPORT N°: R/13/SOL/015

DATE D'ETABLISSEMENT : juillet 2013

AUTEUR(S) : J. CANOU

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : ENPC

THEME DE RATTACHEMENT : 1

LETTRE DE COMMANDE : LC/12/SOL/37

INTRODUCTION

On présente, dans ce rapport, une synthèse des travaux de caractérisation qui ont été réalisés dans l'équipe Géotechnique du laboratoire Navier (CERMES) sur le sable prélevé sur le site de Loon-plage, près de Dunkerque, où ont été effectués les essais de chargement de pieux expérimentaux réalisés dans le cadre du Projet National SOLCYP (on rappelle que le projet de recherche SOLCYP s'est composé d'un volet ANR, dans le cadre duquel a été réalisée la partie de recherche expérimentale réalisée en laboratoire et d'un volet Projet National qui a, en particulier, permis de réaliser des essais de chargement de pieux expérimentaux sur les sites de Merville (site argileux) et de Loon-plage (site sableux)).

Après avoir rappelé les objectifs de ces travaux de caractérisation, on présente les principales caractéristiques physiques obtenues pour le sable de Loon-plage. On présente ensuite une synthèse des résultats obtenus dans les essais de cisaillement monotone réalisés à l'appareil triaxial (essais de compression) destinés à obtenir les paramètres mécanique de base . On présente ensuite les résultats obtenus sous cisaillement cyclique, toujours réalisés à l'appareil triaxial.

1 – OBJECTIFS

Les objectifs de cette étude ont été de fournir les principales caractéristiques et paramètres du sable prélevé sur le site de Loon-plage, près de Dunkerque, nécessaires pour l'étude du comportement et le calcul des pieux expérimentaux réalisés sur ce même site. Les travaux réalisés ont comporté une première phase d'identification du sable, destinée à obtenir les paramètres physiques de base de ce sable, nécessaires pour poursuivre ensuite l'étude des caractéristique mécaniques du matériau. On a ensuite réalisé une série d'essais de cisaillement monotone à l'appareil triaxial (essais de compression) pour obtenir, en particulier, les caractéristiques de rupture du sable (paramètres du critère de Mohr-Coulomb). Ensuite, les essais de cisaillement cyclique réalisés à l'appareil triaxial ont eu pour objectif de fournir aux équipes chargées de modéliser le comportement des pieux sous chargement cyclique, les paramètres nécessaires à la mise en œuvre des calculs.

2 – PARAMETRES D'IDENTIFICATION DU SABLE DE LOON-PLAGE

2.1 – Provenance, approvisionnement

Le sable testé provient du site de Loon-plage sur lequel ont été réalisés les essais de chargement de pieux expérimentaux dans le cadre du Projet National SOLCYP. Les sondages carottés ont été réalisés par l'entreprise Fugro (A. Puech) qui nous a fourni les carottes correspondant au sondage carotté SC3 réalisé sur le site. Les dix carottes reçues sont répertoriées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 – Récapitulatif des carottes reçues – Sondage carotté SC3

Identification carotte	Profondeur (m)	L_{tot} (cm)	L_{eff} (cm)	Masse sèche (kg)	Teneur en eau (%)	Aspect haut de carotte	Aspect bas de carotte	Remarques
C1	3 – 3,85	90,1	85,1	13,70	14,4	Sable propre	Sable propre	Fort décollement
C2	4 – 4,85	90,3	85,3	14,30	17,2	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C3	5 – 6	92,4	87,4	15,75	22,0	Sable + Cailloux	Sable propre	-
C4	6 – 7	84,2	79,2	14,55	22,3	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C5	7 – 7,85	90,0	85,0	15,10	17,0	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C6	8 – 8,85	90,8	85,8	14,45	18,9	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C7	9 – 10	82,8	77,8	14,05	21,2	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C8	10 – 10,90	83,2	78,2	13,50	17,2	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C9	11 – 11,90	80,3	75,3	14,00	22,4	Sable propre	Sable propre	Fort Décollement
C10	12 – 12,85	90,7	85,7	15,85	26,6	Sable limoneux	Sable limoneux	Pas de décollement

A l'ouverture des carottes, le sable apparaît relativement propre et homogène en partie haute et basse des carottes. Seule la carotte C3 présente une zone un peu plus caillouteuse (cailloux centimétriques) en partie haute. Le sable rencontré présente un aspect plus limoneux au niveau de la carotte C10 (profondeur 12 – 12,85 m). On a donc *a priori* affaire à un site composé d'un sable relativement homogène, au moins jusqu'à la profondeur de sondage atteinte. On constate, à l'ouverture des tubes, des décollements significatifs du sol par rapport à l'enveloppe plastique (fig. 1), rendant compte d'écoulements de drainage au sein des carottes. On a cependant mesuré une teneur en eau indicative du sable pour chaque carotte, rapportée dans le tableau 1.



Figure 1 – Quelques vues des carottes reçues

Des analyses ponctuelles réalisées au niveau de chaque carotte ont confirmé que l'on avait un sable relativement homogène, avec une teneur en fines (particules inférieures à 80 μm) de l'ordre de 15 à 25 g par kg (1,5 à 2,5 %).

Des mesures de la masse volumique des grains solides (ρ_s) réalisées au pycnomètre sur différents prélèvements ont confirmé que ce paramètre était lui aussi assez uniforme, avec une valeur moyenne de l'ordre de 2,65 t/m³ pour le sable propre et le sable « complet » avec les fines.

On a donc décidé de mélanger les sables provenant des carottes C1, C2, C4, C5, C6, C7, C8 et C9 (seules les carottes C3 et C10 ont été éliminées) en vue d'avoir une quantité de sable homogène suffisante pour réaliser l'ensemble des essais triaxiaux prévus et d'envoyer une certaine quantité de sable à l'Ecole centrale de Nantes pour réaliser une batterie d'essais complémentaires sur l'appareil de cisaillement simple DSS.

On a finalement obtenu environ 110 kg de sable sec homogène utilisable pour les essais, dont 10 kg ont été envoyés à l'ECN pour le programme d'essais prévu sur l'appareillage DSS.

2.2 Paramètres d'identification

2.2.1 Courbe granulométrique

La figure 2 présente la courbe granulométrique obtenue pour le sable « moyen » de Loon-plage. On a donc affaire à un sable fin, relativement propre, de diamètre moyen d_{50} égal à 135 μm , à granulométrie uniforme ($C_U = 1,69$) présentant peu de particules passant au tamis de 80 μm .

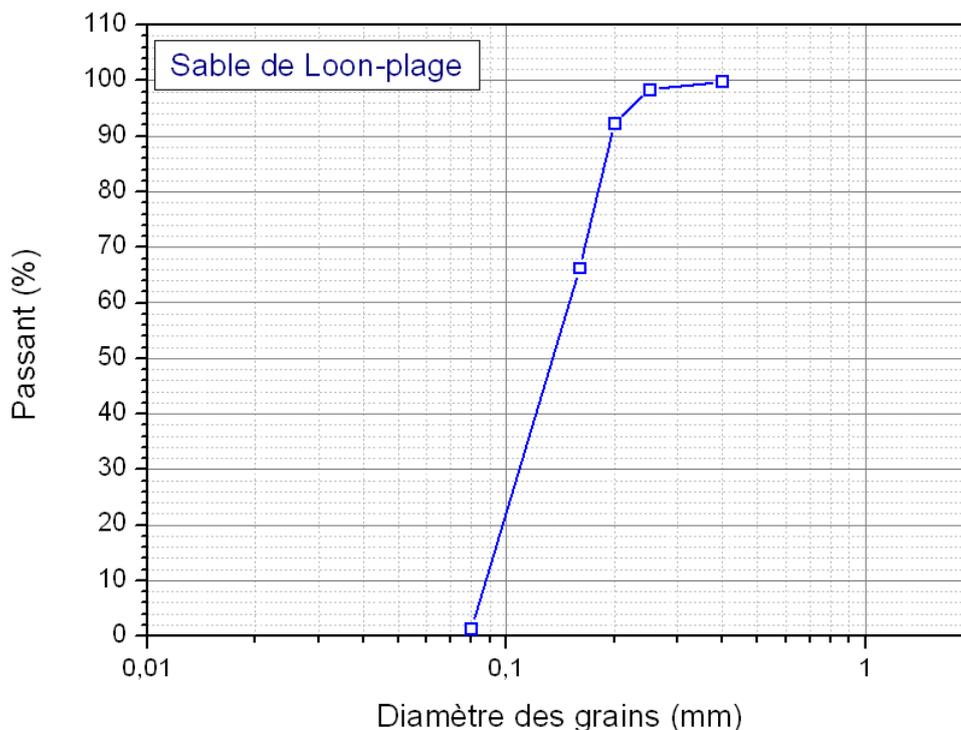


Figure 2 – Courbe granulométrique du sable de Loon-plage

2.2.2 Aspect, forme, angularité

Le sable de Loon-plage se présente visuellement comme un sable fin, présentant peu de fines, de couleur grisé à jaunâtre à grisé avec quelques paillettes de mica et quelques rares coquillages de taille sub-millimétrique.

La figure 3 ci-dessous présente une vue d'un tas de ce sable constitué après séchage.



Figure 3 – Vue d'un tas de sable de Loon-plage

La figure 4 présente quelques vues obtenues au MEB montrant des grains de ce sable, permettant de mettre en évidence une forme sub-arrondie (faible angularité) et une assez faible rugosité des grains.

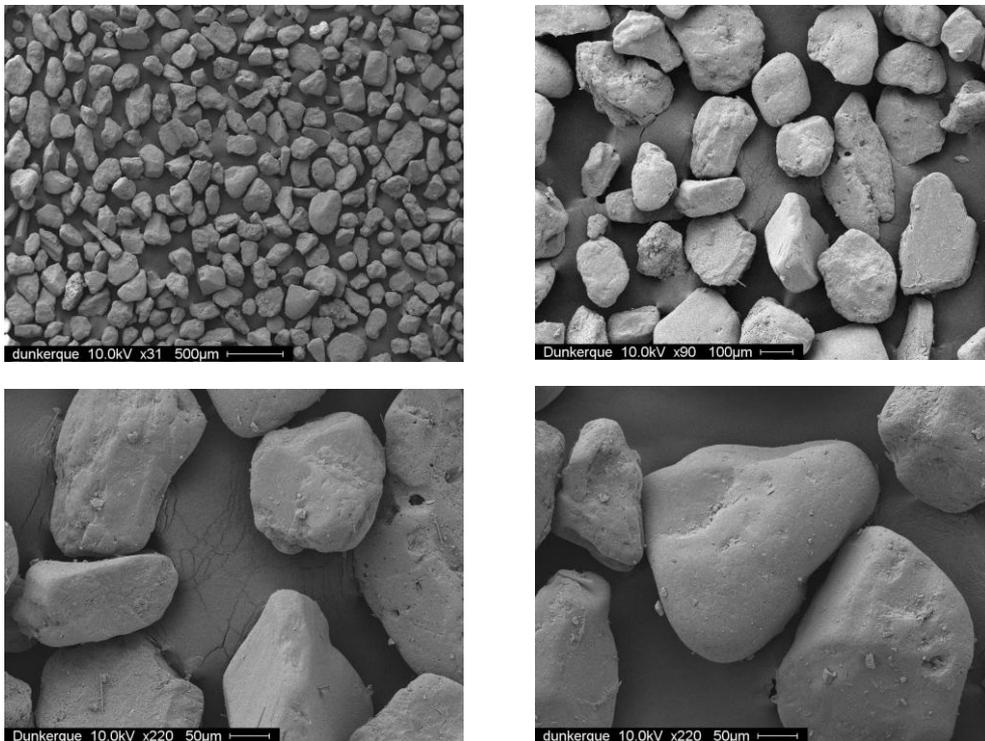


Figure 4 – Vues au MEB de grains de sable de Loon-plage

2.2.3 Masses volumiques, e_{min} , e_{max}

La masse volumique des grains solides a été mesurée au pycnomètre et a permis d'obtenir une valeur proche de $2,65 \text{ t/m}^3$, le sable étant un sable à prédominance siliceuse. On a aussi évalué les indices des vides minimum e_{min} et maximum e_{max} du sable ainsi que les masses volumiques sèches correspondantes.

L'ensemble des paramètres obtenus sont récapitulés dans le tableau 2 ci-dessous. Pour information, on a aussi rappelé dans ce tableau les caractéristiques obtenues pour le sable de Fontainebleau NE34 utilisé dans le cadre du projet SOLCYP (sable de référence)

Tableau 2 – Principales caractéristiques du sable de Loon-plage (avec rappel des caractéristiques obtenues pour le sable de Fontainebleau)

Type de sable	D_{50} (μm)	C_U	ρ_s (t/m^3)	e_{min}	e_{max}	$\rho_{d,max}$ (t/m^3)	$\rho_{d,min}$ (t/m^3)
Loon-plage	135	1,69	2,65	0,634	0,930	1,62	1,37
Fontainebleau NE34	206	1,49	2,65	0,510	0,882	1,75	1,41

3 – ETUDE DU COMPORTEMENT EN CISAILLEMENT MONOTONE A L'APPAREIL TRIAXIAL

3.1 Dispositif d'essai

Pour réaliser les essais de cisaillement monotone en compression, on a utilisé une cellule classique avec capteur d'effort immergé, placée sur une presse électromécanique du type Tri-Scan, de 50 kN de capacité. Les éprouvettes testées ont un diamètre de 100 mm et une hauteur de 200 mm. La figure 5 montre une vue d'ensemble du poste expérimental correspondant, y compris le dispositif d'acquisition et d'enregistrement des données (multimètre et ordinateur PC).



Figure 5 – Dispositif triaxial utilisé pour les essais de cisaillement monotone

3.2 Protocole expérimental

Les éprouvettes sont préparées par compactage de couches de sable sec de masse donnée et d'épaisseur donnée, ce qui permet de cibler l'indice de densité I_D voulu (ici 0,80 visé). L'éprouvette est mise ensuite sous vide, puis saturée à l'eau désaérée après avoir fait circuler sous faible pression du dioxyde de carbone pendant une dizaine de minutes. On applique une contrepression minimale de 200 kPa, ce qui permet d'améliorer de manière significative la saturation de l'éprouvette (valeur du coefficient de Skempton B supérieures ou égales à 98%). On termine la consolidation de l'éprouvette jusqu'à la valeur choisie (consolidation isotrope). L'éprouvette est finalement cisailée en compression à déplacement contrôlé (vitesse de cisaillement de 0.25 % / mn). Pendant l'essai, on mesure la pression de confinement ou pression de cellule p_{cell} (devant *a priori* rester constante), la pression interstitielle (devant *a priori* rester égale à la contrepression initiale appliquée), la force déviatorique sur le capteur de force interne, le déplacement vertical de la cellule, la variation de volume de l'éprouvette, assimilée au volume d'eau qui rentre ou qui sort de l'éprouvette (mesure par volumètre type Wikeham & Farance). Ces mesures sont converties en contraintes, déformations moyennant différentes hypothèses et corrections (en particulier correction de section d'éprouvette faite pour évaluer le déviateur des contraintes q). Les essais sont menés jusqu'à une déformation axiale de l'ordre de 20 %.

3.3 Programme d'essai. Résultats obtenus

En vue de déterminer les caractéristiques mécaniques de base du sable de Loon-plage, en particulier en termes de rupture, on a réalisé une série de quatre essais triaxiaux monotones de compression sur ce sable. Conformément au choix retenu, on s'est fixé, pour les essais, un indice de densité I_D de 0,80 (densité relative D_R de 80 %) représentatif de l'état de densité du sable sur le site et on a réalisé des essais à différents niveaux de contrainte de consolidation isotrope en vue d'obtenir, en particulier, les caractéristiques de rupture du matériau. Le tableau 3 ci-dessous présente les principales caractéristiques des essais réalisés.

Tableau 3 – Principales caractéristiques des essais triaxiaux monotones réalisés

Essai	I_D	$\rho_{d,i}$ t/m ³	σ'_c (kPa)	u_0 (kPa)	B (%)	$d\varepsilon_a/dt$ (% / mn)	$\varepsilon_{a,ult}$ (%)	Remarques
TM1	0,80	1,56	50	200	98	0,25	20	
TM2	0,80	1,56	100	200	98	0,25	20	
TM3	0,80	1,56	100	200	98	0,25	20	essai TM2 doublé
TM4	0,80	1,56	200	200	98	0,25	20	

La figure 6 présente les résultats obtenus en terme des courbes de cisaillement (fig. 6.a), des courbes de déformation volumique (fig. 6.b) et des chemins de contraintes correspondants dans le plan des contraintes de Cambridge (q, p'). L'essai TM2 a été doublé (essai TM3) pour des problèmes de compatibilité des déformations volumiques.

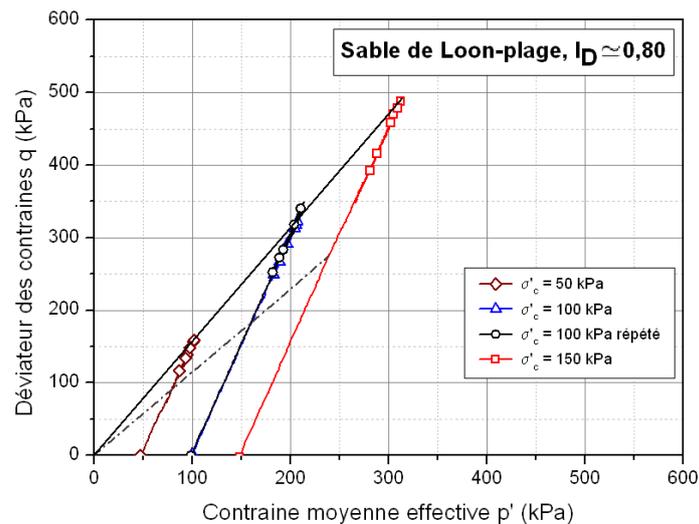
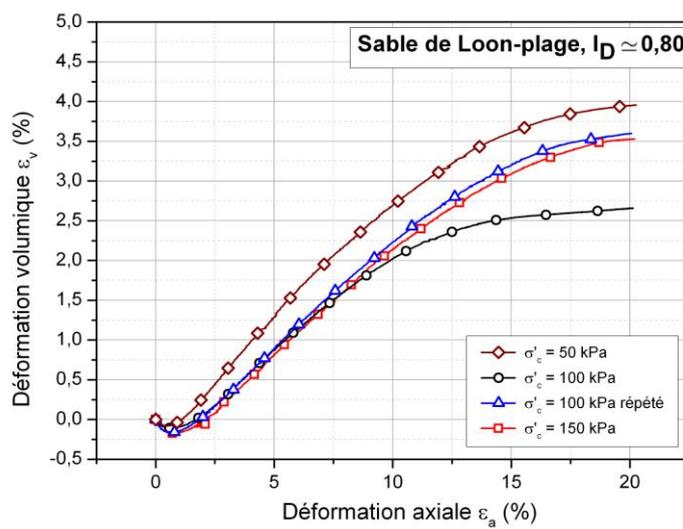
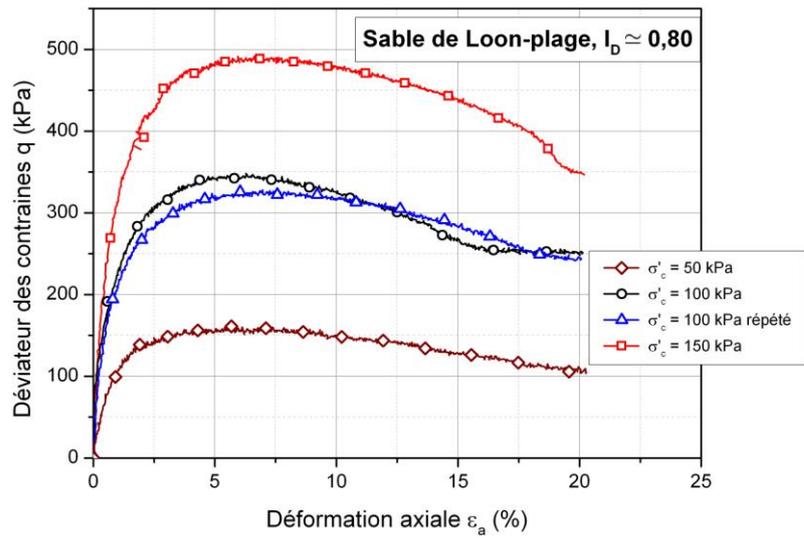


Figure 6 – Résultats des essais de cisaillement monotone : (a) courbes de cisaillement ; (b) courbes de déformation volumique ; (c) chemins de contrainte dans le plan (q, p')

A partir des essais réalisés et du tracé des cercles de Mohr de rupture et des cercles de Mohr correspondant au seuil de transition entre la contractance et la dilatance (seuil « caractéristique »), représentés ci-dessous sur la figure 7, on a pu déterminer les angles de frottement interne du sable, évalués au maximum de résistance (Φ'_{max}) et à l'état ultime (Φ'_{ult}) ainsi que l'angle caractéristique du matériau (Φ'_{car}). L'ensemble des valeurs obtenues est récapitulé dans le tableau 4.

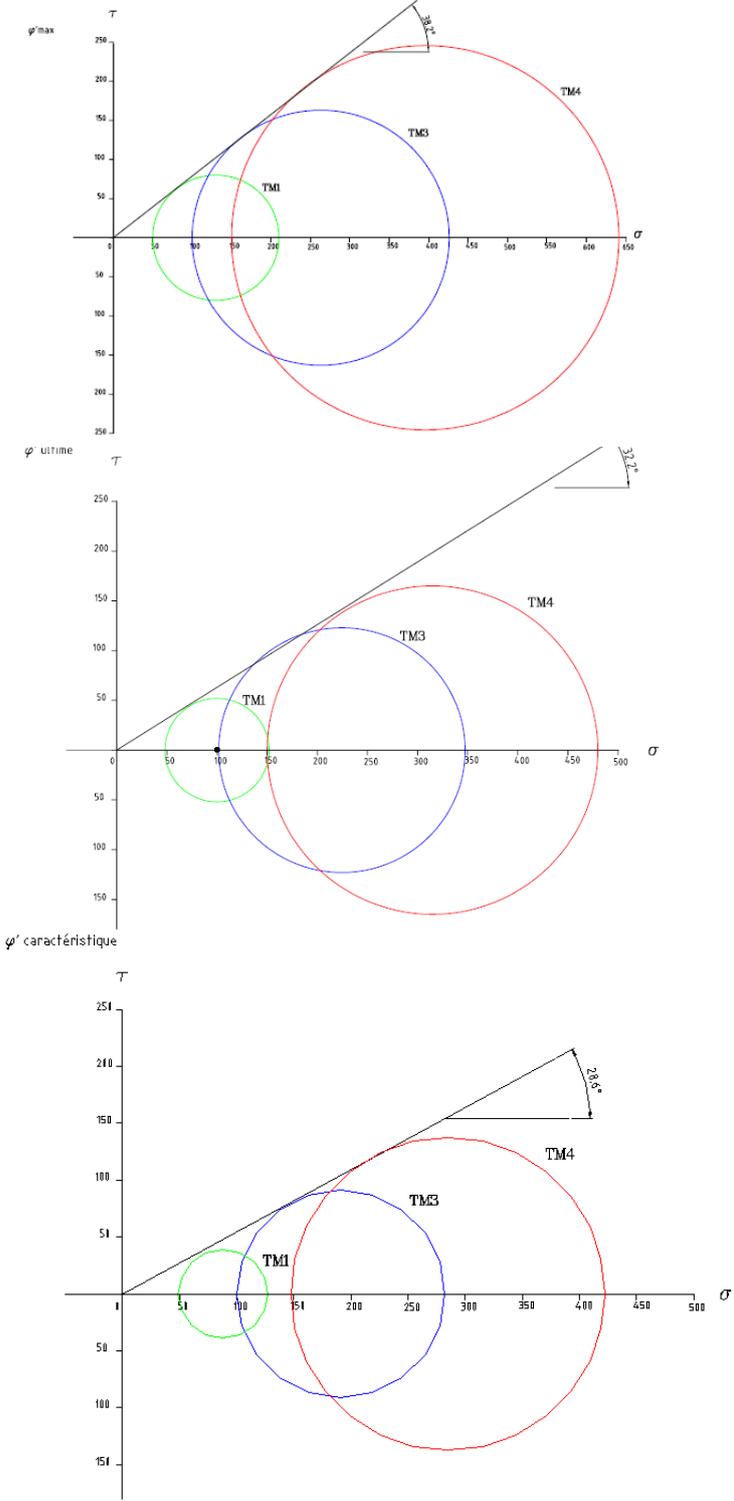


Figure 7 – Cercles de Mohr de rupture et tracé du critère de Mohr-Coulomb : (a) maximum de résistance (Φ'_{max}) ; résistance ultime (Φ'_{ult}) ; seuil caractéristique (Φ'_{car})

Tableau 4 – Caractéristiques de rupture et état caractéristique

Sable	I_D	Φ'_{max} (°)	Φ'_{ult} (°)	Φ'_{car} (°)
Loon-plage	0,80	38,2	32,2	28,6

4 – ETUDE DU COMPORTEMENT EN CISAILLEMENT CYCLIQUE A L'APPAREIL TRIAXIAL

4.1 – Dispositif d'essai

Pour réaliser les essais de cisaillement cyclique, on a utilisé un dispositif servo-pneumatique (système asservi) permettant de réaliser des essais de cisaillement cyclique pilotés en effort ou en déplacement (pilotage réalisé ici en effort) sur des éprouvettes de 70 mm de diamètre et 140 mm de hauteur. La figure 8 montre une vue d'ensemble du dispositif d'essai correspondant, avec la cellule d'essai sur la gauche de la photo, l'armoire de pilotage analogique au centre et l'ordinateur d'acquisition de données sur la droite.

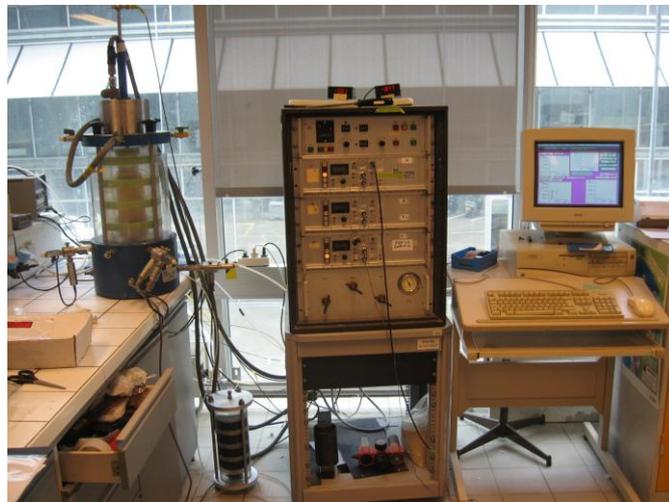


Figure 8 – Dispositif d'essai asservi utilisé pour les essais triaxiaux cycliques

4.2 - Protocole expérimental

Le protocole de reconstitution des éprouvettes est analogue à celui utilisé pour les essais monotones et décrit dans le paragraphe 3.2. En ce qui concerne l'état de consolidation initial de l'éprouvette, celui-ci peut être isotrope (comme pour les essais monotones) ou anisotrope (application d'un déviateur de contrainte initial, q_c). Ensuite le chargement cyclique est

appliqué à force contrôlée, en conditions non drainées, après avoir défini la fréquence des cycles et leur amplitude. Ici, la fréquence retenue pour les cycles est de 0,1 Hz (période de 10 s) et le taux de cisaillement cyclique est défini par le rapport $T_{cyc} = q_{cyc} / 2 p'_c$.

4.3 – Programme des essais réalisés

On a réalisé 7 essais correspondant à différentes combinaisons d'états initiaux et d'amplitude cyclique dans le diagramme ($q_{cyc} / 2p'_c$, $q_c / 2p'_c$) en vue de construire, par la suite, les diagrammes contours d'iso-déformations ou d'iso-valeurs de surpression interstitielle.

Le tableau 5 ci-dessous rappelle les caractéristiques des essais réalisés.

Tableau 5 – Caractéristiques des essais cycliques réalisés

essai	$\rho_{d,i}$ (t/m ³)	I_D	u_0 (kPa)	B (%)	p'_c (kPa)	q_c (kPa)	$q_c/2p'_c$	q_{cyc} (kPa)	$q_{cyc}/2p'_c$	f (Hz)	N_{tot}
TC1	1,56	0,80	200	98	200	0	0	80	0,20	0,1	25
TC2	1,56	0,80	200	100	200	0	0	60	0,15	0,1	50
TC3	1,56	0,80	200	98	200	0	0	48	0,12	0,1	193
TC4	1,56	0,80	200	98	200	0	0	80	0,20	0,1	52
TC5	1,56	0,80	200	98	267	200	0,75	63	0,12	0,1	902
TC6	1,56	0,80	200	98	233	100	0,42	52,5	0,11	0,1	520
TC7	1,56	0,80	200	98	233	100	0,42	72,5	0,15	0,1	918

4.4 Résultats d'essais typiques

Les essais sont réalisés en conditions non drainées et l'on observe, dans tous les cas, une génération de surpression interstitielle qui s'accumule progressivement au sein de l'éprouvette. Deux types de comportements sont alors généralement observés : un phénomène de rupture de l'éprouvette par phénomène de rochet (phénomène de mobilité cyclique) et accumulation rapide de grandes déformations dans les derniers cycles de chargement ; un phénomène d'accommodation avec stabilisation de la surpression interstitielle à une valeur résiduelle qui ne permet pas d'amorcer la rupture par rochet. On présente ci-dessous deux résultats typiques correspondant à ces deux phénomènes.

4.4.1 Rupture par mobilité cyclique

L'essai présenté est l'essai TC3 pour lequel la rupture de l'éprouvette est atteinte par mobilité cyclique. L'essai correspond à un état de consolidation isotrope ($\sigma'_c = p'_c = 200$ kPa) et un cisaillement cyclique alterné symétrique par rapport à l'axe des déviateurs nuls ($q_c = 0$).

La figure 9 (a, b et c) présente les résultats de l'essai en termes du signal de chargement appliqué, de la surpression interstitielle et de la déformation axiale en fonction du nombre de cycles appliqués ; la figure 10 (a, b) présente la courbe de cisaillement cyclique (q , ε_a) et le chemin de contrainte correspondant dans le plan (q , p').

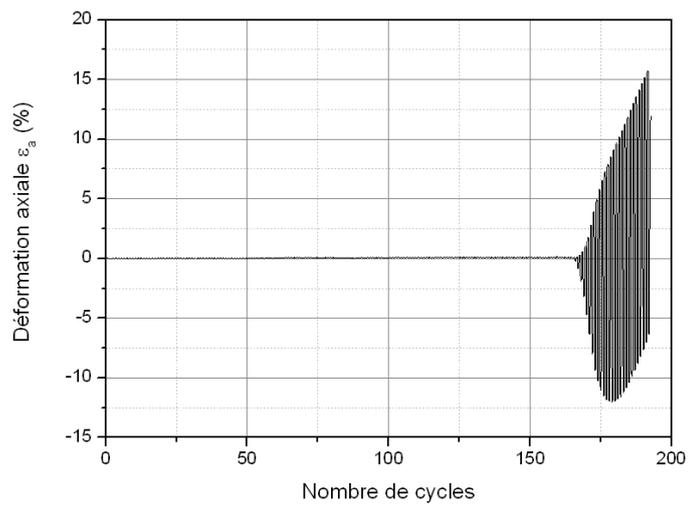
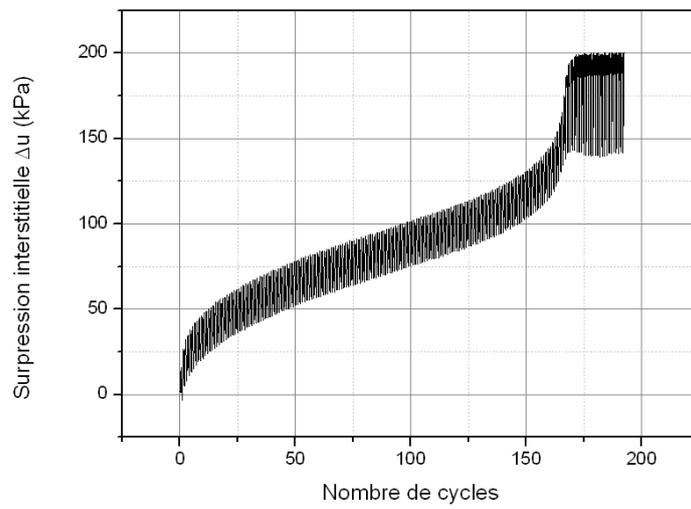
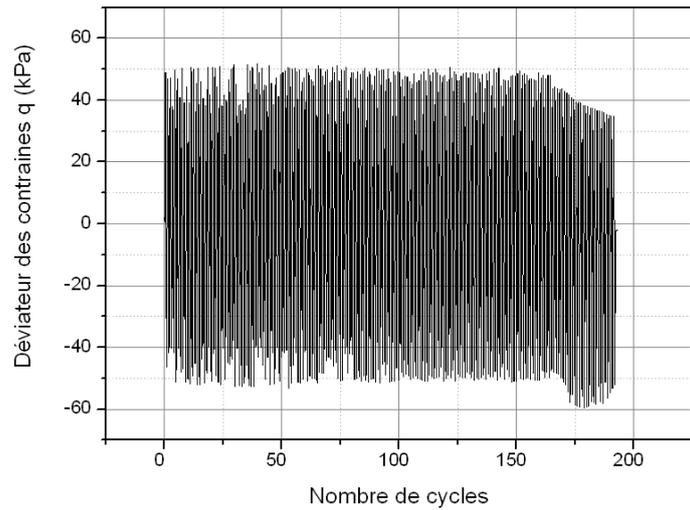


Figure 9 – Résultats de l'essai TC3 : (a) sollicitation appliquée ; (b) évolution de la surpression interstitielle ; (c) évolution de la déformation axiale

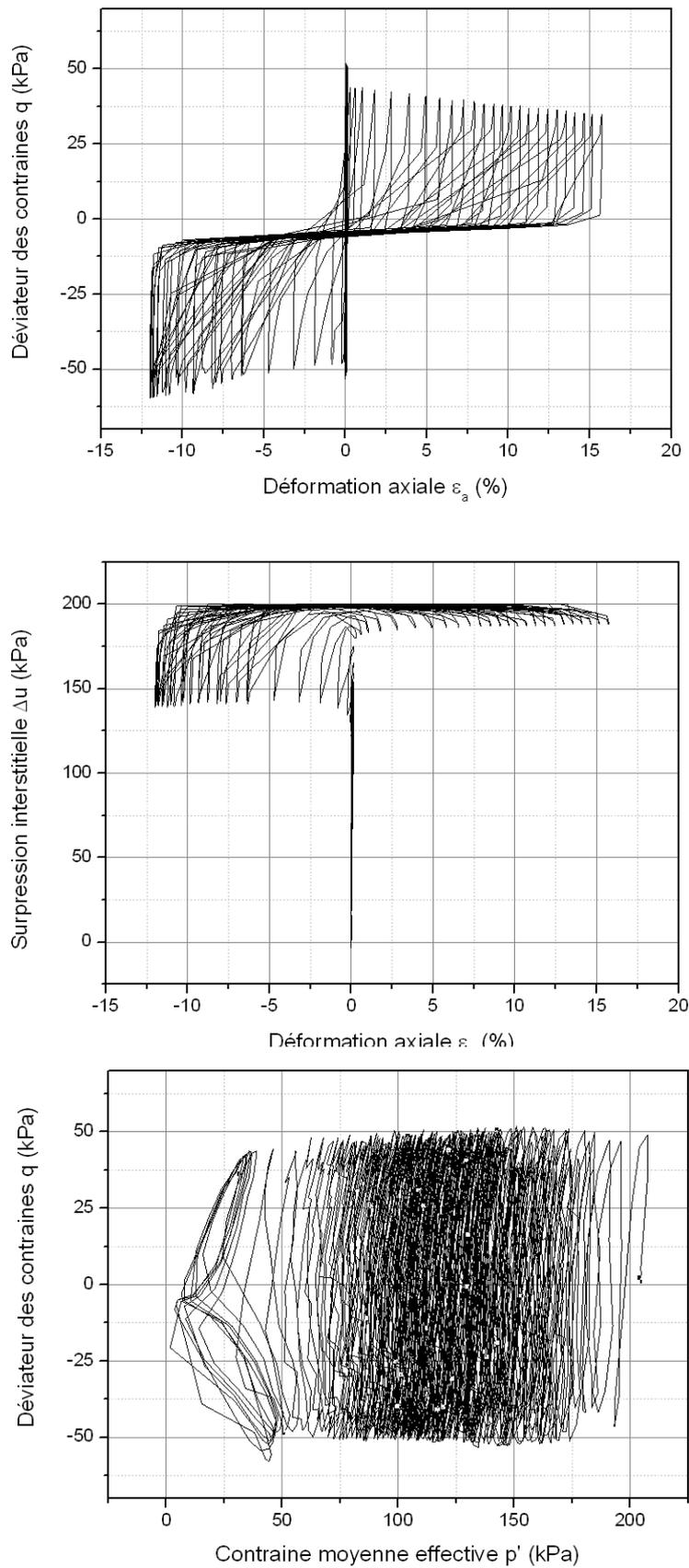


Figure 10 – Résultats de l'essai TC3 : (a) courbe de cisaillement cyclique ; (b) évolution de la surpression avec la déformation axiale ; (c) chemin des contraintes dans le plan (q, p')

Pendant toute la phase initiale de l'essai, jusqu'au cycle 165 environ, on n'observe pratiquement pas d'accumulation de déformation axiale (comportement apparemment accommodé), avec, ensuite, une augmentation rapide de ces déformations conduisant en quelques cycles à la rupture de l'éprouvette par rochet (fig. 9.b). Jusqu'au cycle 165, on constate par contre une accumulation régulière de la surpression interstitielle avec un taux qui accélère lorsque les grandes déformations commencent à se développer (fig. 9.c). On atteint finalement des pics transitoire de surpression de 200 kPa, correspondant à la pression de confinement appliqué. Le comportement observé correspond typiquement au phénomène de mobilité cyclique. La figure 10.a présente la courbe de cisaillement cyclique de l'éprouvette, confirmant le phénomène de mobilité cyclique, la figure 10.c présentant le chemin des contraintes effectives typique correspondant et, en particulier, les boucles de dilatance qui apparaissent et se développent en évoluant vers le mécanisme ultime en « ailes de papillon ».

4.4.2 Comportement d'accommodation

Pour des états de consolidation anisotrope, on observe généralement un phénomène d'accommodation avec stabilisation de la surpression interstitielle résiduelle, ne permettant pas d'aller jusqu'à la rupture par mobilité cyclique. Les figures 11 (a, b et c) et 12 (a, b et c) présentent les résultats d'un essai typique (essai TC5). Cet essai a été réalisé à partir d'un état de consolidation anisotrope ($p'_c = 200$ kPa, $q_c = 200$ kPa) et un taux de cisaillement cyclique T_{cyc} égal à 0,12. La figure 11.b montre, en particulier, la stabilisation progressive de la surpression interstitielle vers une valeur résiduelle de l'ordre de 45 kPa. La figure 11.c montre la stabilisation de la déformation axiale. On évolue donc ici vers un phénomène d'accommodation, la déformation axiale étant orientée, dès le début des cycles, par le chargement déviatorique initial. Le phénomène d'accommodation est aussi visible sur la courbe de cisaillement représentée sur la figure 12.a ainsi que sur la figure 12.c présentant le chemin des contraintes correspondant.

4.5 Synthèse des essais cycliques

Le tableau 6 présente une synthèse des résultats obtenus sous cisaillement cyclique en termes des comportements observés : soit rupture par mobilité cyclique, soit accommodation. Dans tous les cas, on mentionne le nombre de cycles réalisés et, dans le cas de la mobilité cyclique, le nombre de cycles N_{liq} nécessaire pour arriver à la rupture (critère de 5% de déformation axiale atteint crête à crête). Dans le cas de l'accommodation, on donne la déformation axiale cumulée atteinte à la fin de l'essai.

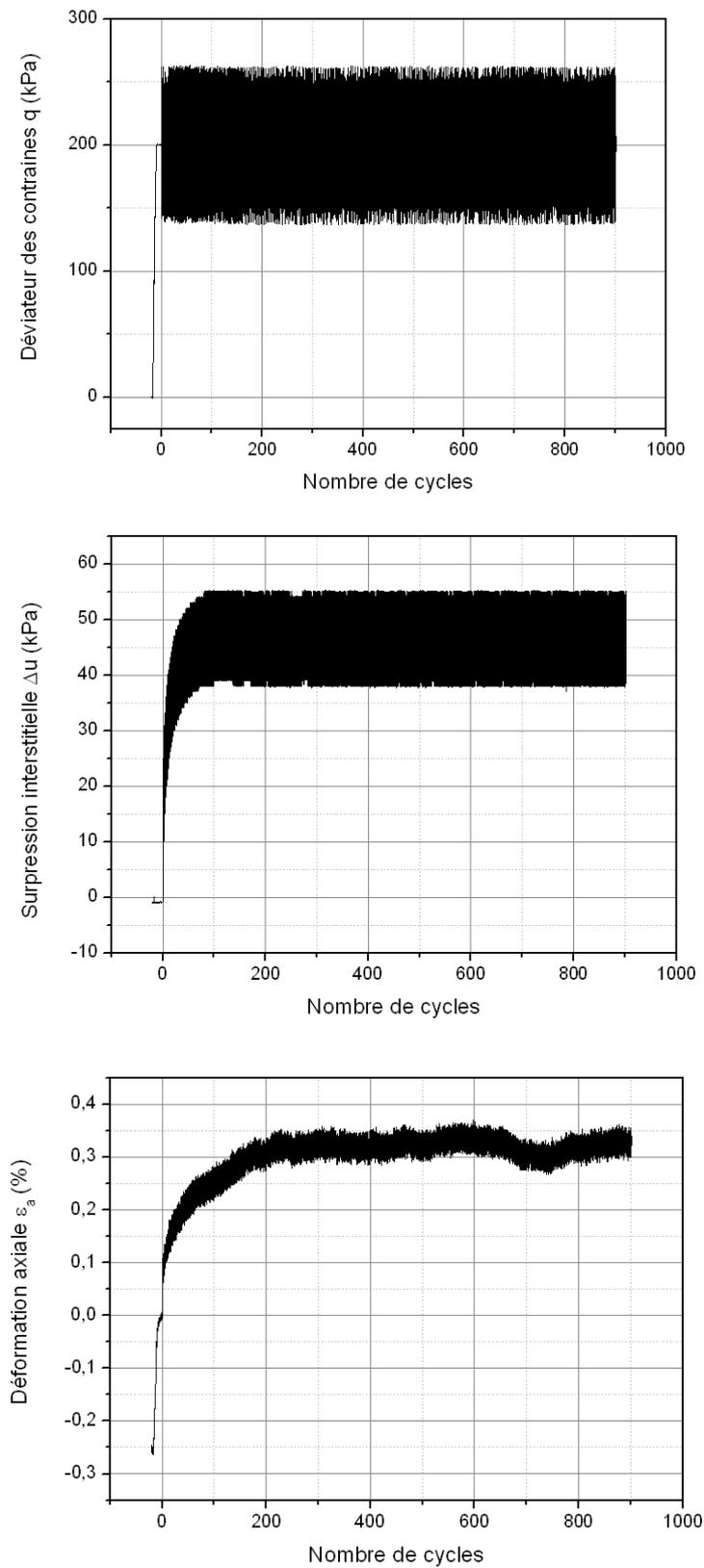


Figure 11 – Essai typique avec accommodation (essai TC5) : (a) sollicitation appliquée ; (b) évolution de la surpression interstitielle avec les cycles ; (c) évolution de la déformation axiale

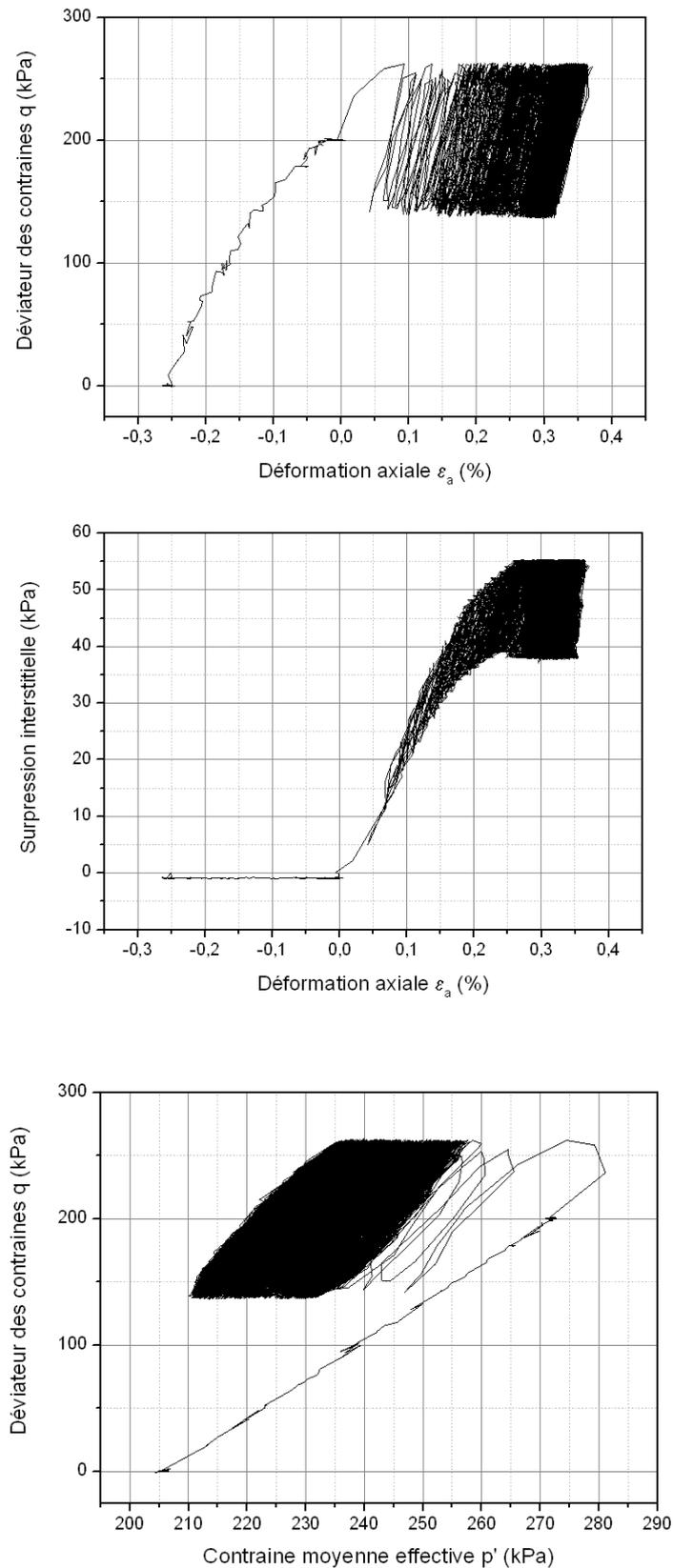


Figure 12 – Essai typique avec accommodation : (a) courbe de cisaillement cyclique ; (b) évolution de la surpression interstitielle avec la déformation ; (c) chemin des contraintes effectives dans le plan (q, p')

Tableau 6 – Synthèse des résultats obtenus en cyclique

essai	I_D	p'_c (kPa)	q_c (kPa)	$q_c/2p'_c$	q_{cyc} (kPa)	$q_{cyc}/2p'_c$	N_{tot}	N_{liq}	$\varepsilon_{a,fin}$ (%)
TC1	0,80	200	0	0	80	0,20	25	8	>25
TC2	0,80	200	0	0	60	0,15	50	28	>20
TC3	0,80	200	0	0	48	0,12	193	178	>24
TC4	0,80	200	0	0	80	0,20	52	8	>25
TC5	0,80	267	200	0,75	63	0,12	902	-	0,36
TC6	0,80	233	100	0,42	53	0,11	520	-	0,28
TC7	0,80	233	100	0,42	73	0,15	918	-	0,84

Les résultats obtenus ont été représentés dans le plan $(q_{cyc}/2p'_c, q_c/2p'_c)$ sur la figure 13, avec des symboles carrés pour les essais ayant présenté de la mobilité cyclique (rupture) et des symboles circulaires pour les essais ayant présenté de l'accommodation. On retrouve bien le fait que l'état de consolidation isotrope favorise l'apparition de la mobilité cyclique alors que l'état de consolidation anisotrope favorise la stabilisation par accommodation.

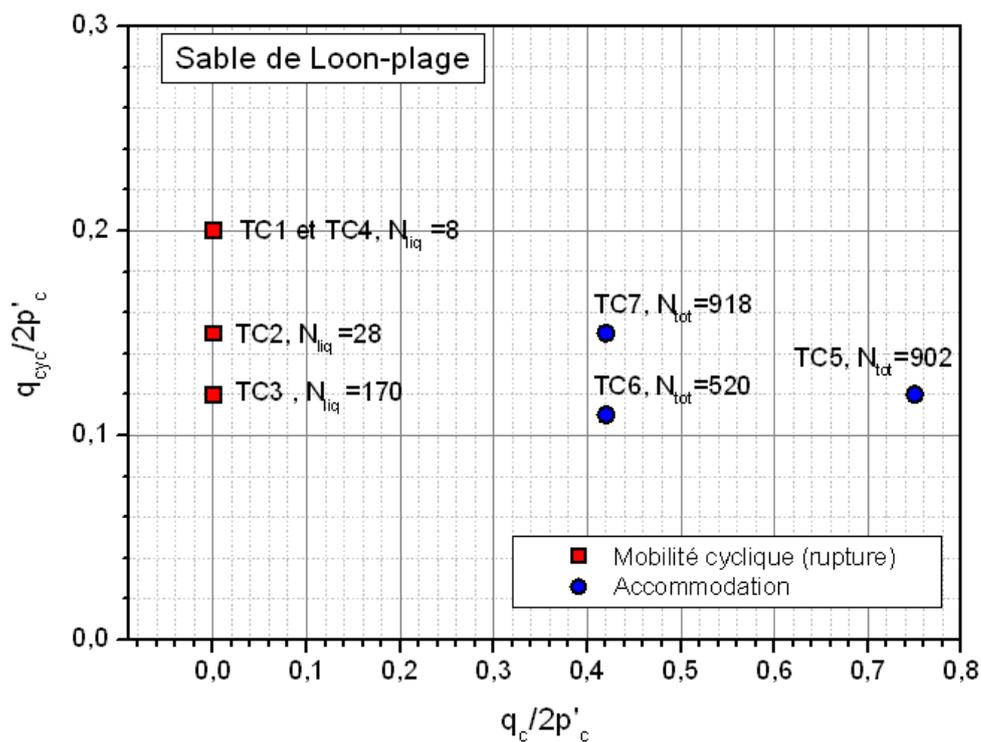


Figure 13 – Synthèse des résultats obtenus dans les essais cycliques pour le sable de Loon-plage

La figure 14 présente finalement les résultats des essais pour lesquels on a eu rupture par mobilité cyclique (essais TC1, TC2, TC3 et TC4) sous forme de la courbe de résistance au cisaillement cyclique (courbe de RCC) utilisée de manière classique dans le domaine du génie parasismique pour caractériser la « liquéfiabilité » d'un sol.

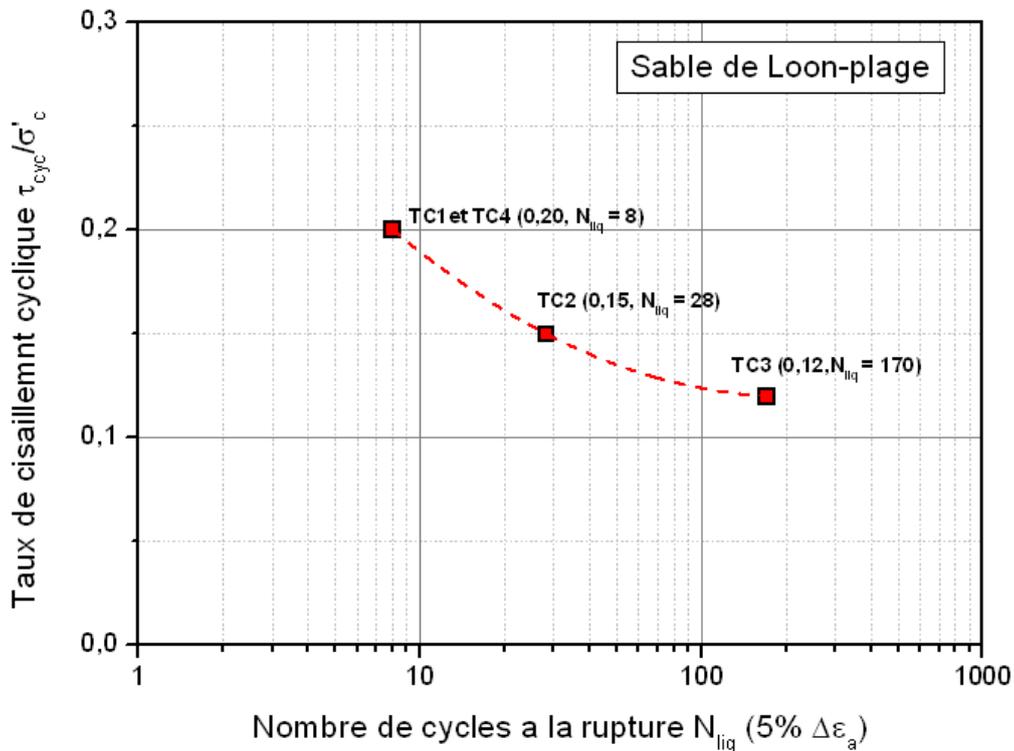


Figure 14 – Courbe de résistance au cisaillement cyclique (RCC) pour le sable de Loon-plage ($I_D = 0,80$)

CONCLUSIONS

Ce rapport a permis de présenter les travaux de caractérisation qui ont été réalisés sur le sable de Loon-plage, site sur lequel ont été réalisés les essais de chargement de pieux expérimentaux dans le cadre du Projet National SOLCYP. Après avoir présenté les caractéristiques physiques principales obtenues, le programme d'essais de cisaillement monotone a permis d'obtenir les caractéristiques de rupture de ce sable pour un indice de densité de 0,80 (sable dense). Les essais de cisaillement cyclique ont permis d'étudier la réponse de ce sable pour différentes combinaisons d'états initiaux (isotropes et anisotropes) et d'amplitudes de cisaillement cyclique. Comme pour le sable de Fontainebleau, dont on a réalisé la caractérisation dans le cadre de la partie ANR du projet, on montre, en particulier, qu'un état de consolidation anisotrope stabilise le matériau par rapport à la rupture par mobilité cyclique.