



Projet National

Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

OPERATION DU RESEAU GENIE CIVIL & URBAIN

# **Caractérisation de la grave utilisée sur le site de St-Ouen-l'Aumône**

**Juin 2007**

**Jean-Claude DUPLA, Jean CANOU, An Quan DINH  
CERMES (Institut Navier, ENPC/LCPC)**

# A.S.I.RI/FICH ESIGNALETIQUE

TITRE : Caractérisation de la grave utilisée sur le site de St-Ouen-l'Aumône

RAPPORT N° : 03.02

DATE D'ETABLISSEMENT : juin 2007

AUTEUR(S) : Jean-Claude DUPLA, Jean CANOU et An Quan DINH

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : CERMES (ENPC/LCPC)

THEME DE RATTACHEMENT : Thème 3 : Essais de laboratoire et en centrifugeuse

LETTRE DE COMMANDE : LC/05/ASI/2

## SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	5
I CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE LA GRAVE.....	5
I.1 Description générale.....	5
I.2 Analyse granulométrique .....	5
I.2.1 Objectif.....	5
I.2.2 Eléments de procédure.....	6
I.2.3 Résultats obtenus .....	7
I.3 Limites d'Atterberg .....	7
I.3.1 Objectif.....	7
I.3.2 Eléments de procédure.....	8
I.3.3 Résultats obtenus .....	8
I.4 Essai au bleu de méthylène .....	10
I.4.1 Objectif.....	10
I.4.2 Eléments de procédure.....	10
I.4.3 Résultats obtenus .....	10
I.5 Teneur en carbonate.....	11
I.5.1 Objectif.....	11
I.5.2 Eléments de procédure.....	11
I.5.3 Résultats obtenus .....	12
I.6 Masse volumique des grains.....	12
I.6.1 Objectif.....	12
I.6.2 Eléments de procédure.....	12
I.6.3 Résultats obtenus .....	13

II CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE DE LA GRAVE .....	15
II.1.1 Eléments de procédure .....	15
II.1.2 Résultats obtenus .....	16
III CARACTERISATION MECANIQUE DE LA GRAVE G1 .....	18
III.1 Le dispositif d'essai triaxial.....	18
III.2 Protocole d'essai utilisé pour la grave G1 .....	22
III.3 Programme expérimental .....	23
III.4 Essai avec mesure globale des déformations .....	26
III.4.1 Description d'un essai typique.....	26
III.4.2 Essais de répétabilité.....	31
III.4.3 Synthèse des comportement globaux observés .....	35
III.4.4 Caractéristiques élastiques .....	41
III.4.5 Caractéristiques de rupture .....	43
III.4.6 Influence de la teneur en eau .....	45
III.5 Essais avec mesure locale des déformations .....	47
III.5.1 Eléments de procédure spécifique .....	47
III.5.2 Synthèse des essais de compression isotrope .....	50
III.5.3 Synthèse des essais de cisaillement .....	55
III.5.4 Comparaison entre mesures globales et mesures locales (phases de cisaillement) .....	56
CONCLUSIONS .....	59

## **INTRODUCTION**

On présente dans ce rapport les travaux réalisés au CERMES dans le cadre de la tranche 1 du projet national ASIRI. Les travaux prévus au CERMES dans cette tranche concernent essentiellement la caractérisation physico-chimique et mécanique de la grave retenue par le projet national pour constituer le matelas de transfert de charge utilisé sur le site expérimental de Saint-Ouen-l'Aumône.

On présente, dans une première partie, les éléments de caractérisation physico-chimique du matériau, puis ses caractéristiques de compactage dans une deuxième partie. Dans la troisième partie du rapport, on présente le programme d'essais de caractérisation mécanique du matériau, réalisé à l'appareil triaxial pour éprouvettes de grand diamètre (300 mm).

## **I CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE LA GRAVE**

On présente dans cette partie les résultats des différents essais d'identification réalisés sur la grave retenue dans le cadre du projet national : analyse granulométrique, limites d'Atterberg, essai au bleu de méthylène, teneur en carbonate, masse volumique des particules solides.

### **I.1 Description générale**

La grave retenue dans le cadre du projet national ASIRI a été fournie par la société Eurovia. Deux tonnes du matériau ont été livrées par Eurovia au CERMES en juillet 2006 et stockées dans des caisses métalliques à proximité du laboratoire. La figure 1 présente une vue de la grave, appelée grave G1. Celle-ci se présente comme un matériau relativement hétérogène, comportant quelques gros éléments de 5 à 6 cm (blocs arrondis d'aspect crayeux et blocs de silex très anguleux), puis des éléments de taille assez variable, allant jusqu'à des sables fins, mélanges, là aussi, d'éléments arrondis de même nature que les plus gros blocs et d'éclats de silex, très anguleux et à arrêtes vives. Finalement, la grave comporte visiblement une partie fine significative (particules de taille inférieure à 80  $\mu\text{m}$ ), en faisant donc *a priori* un matériau sensible à l'eau.

### **I.2 Analyse granulométrique**

#### **I.2.1 Objectif**

L'analyse granulométrique constitue un élément d'information important concernant la grave étudiée. Cette analyse a été conduite par tamisage pour les particules de taille supérieure à 80  $\mu\text{m}$ , suivant la norme NF P 94-056 et par sédimentométrie pour les particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$ , suivant la norme NF P 94-057.

## *1.2.2 Eléments de procédure*

### *1-2.2.1 Préparation préalable du sol*

La quantité de matériau nécessaire (Figure 1) est tout d'abord lavée sous eau (Figure 2) puis séchée à l'étuve, à 105 ° pendant 24 heures. On tamise ensuite au tamis de 80 µm, tout en brossant les gros éléments afin de récupérer les fines. Le refus est replacé à l'étuve (105 °) et le passant est laissé dans un bac pour décantation, puis placé à l'étuve après avoir siphonné l'eau claire.

### *1-2.2.2 Tamisage*

L'analyse par tamisage est réalisée sur la fraction supérieure à 80 µm. On utilise une colonne de tamisage formée de 12 tamis à mailles carrées (tailles 31,5, 25, 20, 10, 8, 6,3, 4, 2, 0,8, 0,16, 0,125 et 0,08 mm), placée sur une table vibrante et soumise à une vibration normalisée. On utilise une masse de 12 kg de sol, nécessaire pour partir d'une quantité représentative du matériau (NORME NF P 94-056)

### *1-2.2.3 Sédimentométrie*

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est effectuée sur la partie fine du matériau (inférieure à 80 µm) selon la norme NF P 94-057. On utilise une masse de 80 g de fines, mise en suspension dans 500 cm<sup>3</sup> d'eau déminéralisée. La suspension est ensuite placée dans un tube gradué de 2000 cm<sup>3</sup> et l'on mesure la densité du mélange au densimètre à intervalles donnés (0, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 240 et 1440 s).



Figure 1 – Vue de la grave G1



Figure 2 – Lavage sous eau de la grave

### 1.2.3 Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 3. Deux courbes granulométriques ont été obtenues à partir de deux échantillonnages différents du matériau en vue de tester la répétabilité du processus.

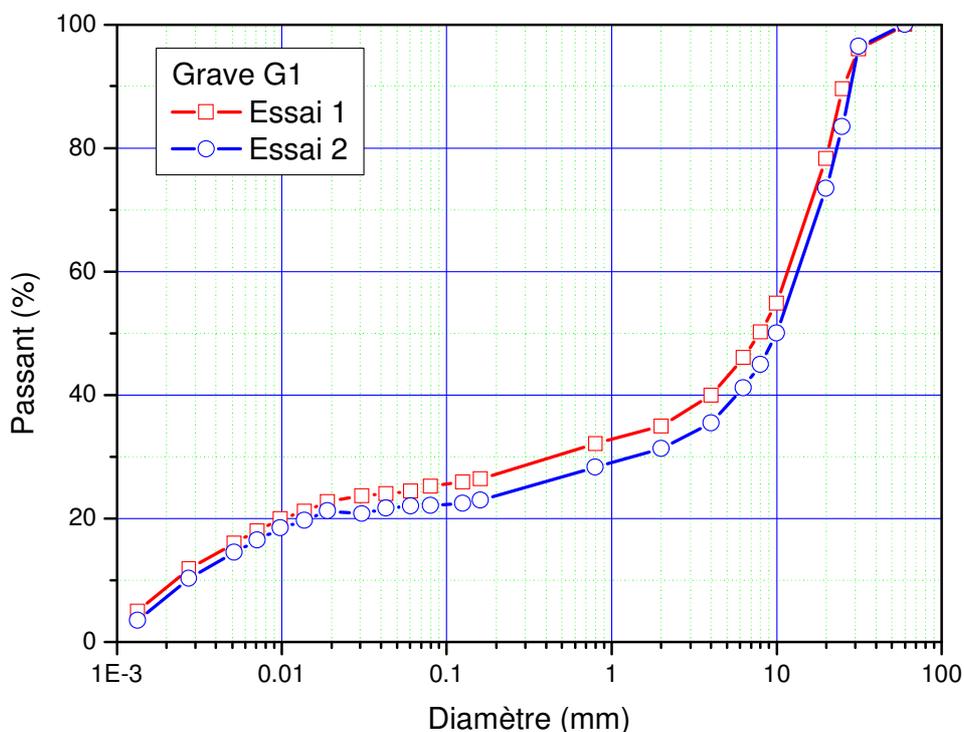


Figure 3 - Courbes granulométriques de la grave G1

Les courbes obtenues permettent de mettre en évidence une bonne répétabilité de la procédure d'essai. Les courbes granulométriques obtenues permettent de confirmer le pourcentage important de fines (particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$ ), de l'ordre de 23%. Selon la classification ASTM-LCPC, ce sol est donc bien une grave. Il convient de déterminer les limites d'Atterberg de la partie fine pour conclure sur la nature limoneuse ou argileuse de la grave G1.

## I.3 Limites d'Atterberg

### 1.3.1 Objectif

La quantité de fines étant de l'ordre de 18%, il est nécessaire de caractériser la partie fine du matériau. Pour cela, on va déterminer ses limites d'Atterberg : limite de plasticité et limite de liquidité.

### 1.3.2 Eléments de procédure

Les limites de plasticité  $w_p$  et de liquidité  $w_l$  sont déterminées suivant le protocole expérimental détaillé dans la norme NF P 94-051. Ces teneurs en eau spécifiques sont déterminées sur la partie du sol passant au tamis de 400  $\mu\text{m}$ . Elles permettent de caractériser la sensibilité à l'eau du sol et de le classer en utilisant le diagramme de Casagrande.

### 1.3.3 Résultats obtenus

- Limite de liquidité  $w_L$  :

Le Tableau I et la Figure 4 présentent les résultats obtenus pour  $w_L$ .

Nombre de coups	35	31	25	21	18
Teneur en eau $w(\%)$	21,70	21,53	22,03	22,13	22,50
Liquidité $w_L$ (%)	21,93				

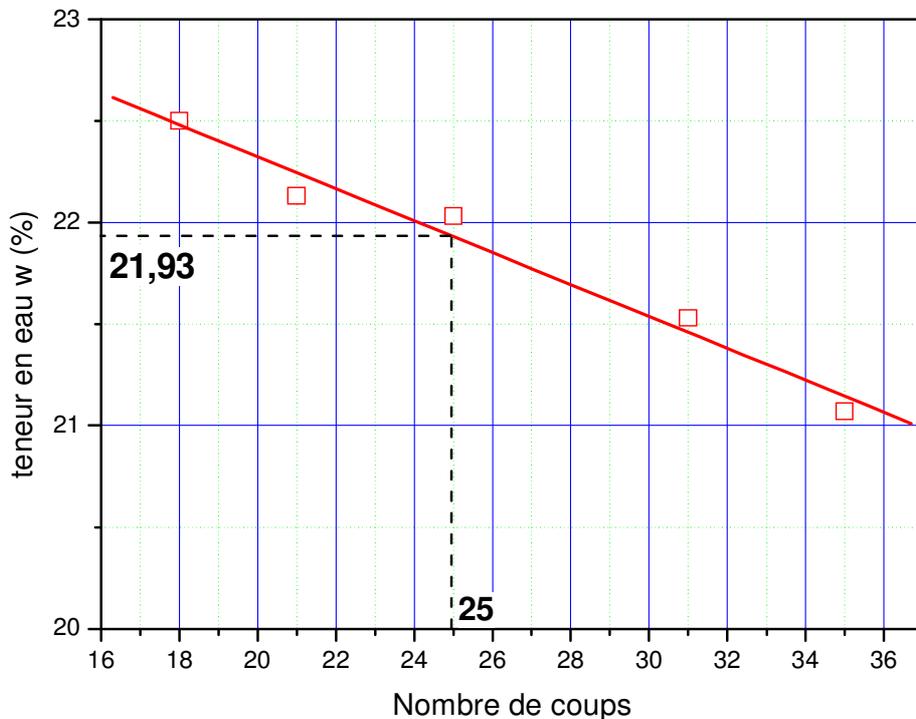


Figure 4 - Détermination de la limite de liquidité

- Limite de plasticité  $w_p$

Le Tableau II présente les résultats des deux essais réalisés pour évaluer  $w_p$ . Ces deux essais donnent des valeurs proches et l'on retiendra une valeur moyenne de 16,1% pour  $w_p$ .

Tableau II – Résultats des essais de limite de plasticité		
Essai N°1	Essai N°2	Valeur moyenne $w_p$
16,04	16,11	16,07

- Identification de la partie fine

A partir des limites d'Atterberg  $w_l$  et  $w_p$ , on détermine l'indice de plasticité  $I_p = w_l - w_p$  ( $I_p = 5,8$ ), ce qui permet de positionner le point représentatif correspondant dans le diagramme de Casagrande (Figure 5). On peut en conclure que la partie fine de la grave correspond à un limon peu plastique Lp. La grave est donc une grave limoneuse peu plastique.

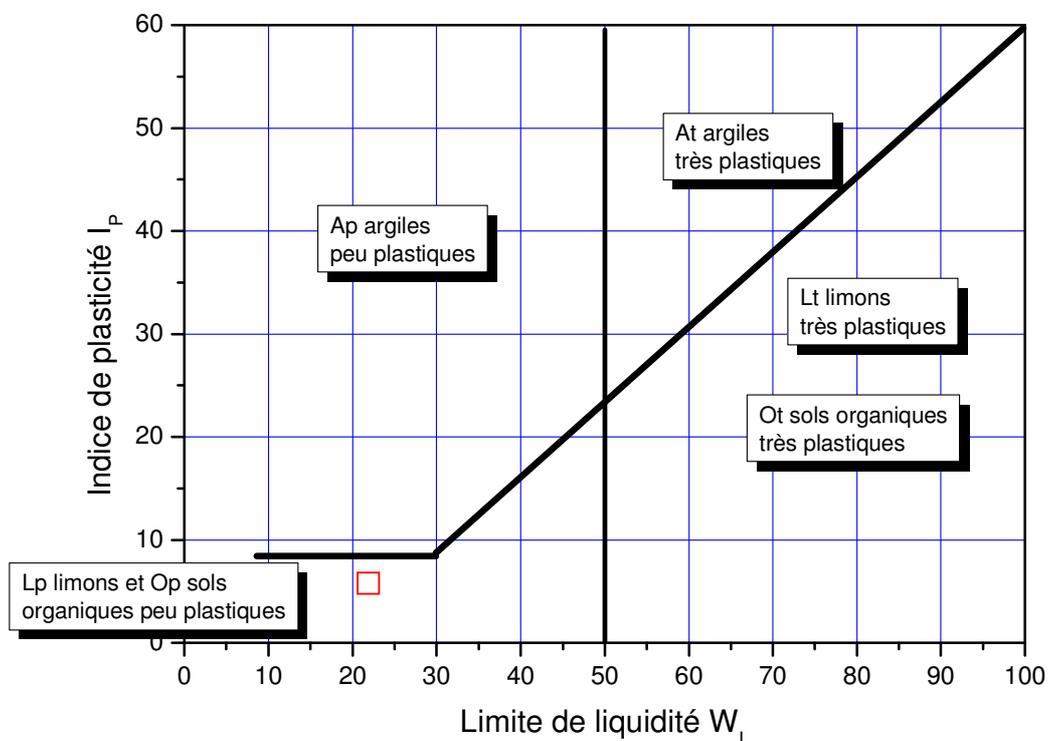


Figure 5 – Identification de la partie fine de la grave dans le diagramme de plasticité de Casagrande

## **I.4 Essai au bleu de méthylène**

### *I.4.1 Objectif*

Cet essai a pour objectif d'évaluer la quantité d'argile présente dans la partie fine du sol (mesure de la surface spécifique). La valeur au bleu, notée VBS, dépend de la surface spécifique des matériaux. On réalise donc deux essais sur les fractions 0/5 mm (norme P 94-068), mais également sur la fraction 0/0,08 mm pour comparaison.

### *I.4.2 Eléments de procédure*

On prépare tout d'abord la solution de bleu de méthylène à une concentration de 10 g par litre. Le diamètre maximal des particules du sol étant de 5cm, on doit prendre 10kg de sol sec. Le matériau est tamisé pour obtenir les fractions 0/5mm et 0/0,08mm, puis séché à l'étuve, à 50 °C.

On détermine la proportion pondérale C des deux fractions en prenant la valeur moyenne des deux essais granulométriques. On obtient, pour la fraction 0/5 mm : C = 0,40 ; et pour la fraction 0/0,08 mm, C = 0,231

Le sol est introduit dans un récipient de 3000 cm<sup>3</sup>, et mis en suspension dans 500 cm<sup>3</sup> d'eau déminéralisée à l'aide d'un agitateur magnétique. Le bleu de méthylène est alors introduit progressivement par incréments de 5 cm<sup>3</sup>. On prélève, à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de suspension et on la dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleu clair apparaît à la périphérie de la tâche, le bleu de méthylène est introduit par incréments de 2 cm<sup>3</sup>. L'essai est terminé lorsque l'auréole périphérique bleu clair atteint une épaisseur de l'ordre de 1 à 2mm

### *I.4.3 Résultats obtenus*

La valeur VBS est déterminée selon la formule suivante :

$$VBS = \frac{B}{m_o} \times C \times 100 \quad \text{où } B = V \times 0,01$$

V : volume de la solution de bleu de méthylène introduit en cm<sup>3</sup>

m<sub>o</sub> : masse de sol

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau III.

Tableau III – Résultats des essais au bleu de méthylène			
Fraction 0/5mm			
$C_{0/5mm} = 0,40$	$m_o$	V	VBS
1	60,85	18	0,12
2	43,98	15	0,14
3	119,48	36	0,12
Fraction 0/0,08 mm			
$C_{0/0,08mm} = 0,23$	$m_o$	V	VBS
1	113,44	58	0,12
2	119,3	62	0,12

Les essais réalisés permettent de mettre en évidence une valeur au bleu de méthylène très faible, correspondant à une nature non argileuse de la partie fine de la grave, confirmant les résultats obtenus à partir des limites d'Atterberg.

## **I.5 Teneur en carbonate**

### *1.5.1 Objectif*

L'objectif de cet essai est la détermination conventionnelle du pourcentage de la fraction carbonatée contenue dans un sol, une roche ou un autre matériau.

### *1.5.2 Eléments de procédure*

Après un séchage préalable, le matériau est broyé dans le mortier afin d'obtenir une poudre passant au tamis d'ouverture 0,4 mm. Le séchage du matériau est poursuivi, à une température de 105°C, jusqu'à ce que sa masse ne varie pas plus de 2/1000 entre deux pesées successives, espacées de 1 h.

On dispose environ 0,6 g de sol sec dans un flacon et on prépare une solution d'acide chlorhydrique concentrée de densité 1,19. Après avoir mis le sol au contact de l'acide, on note le volume de gaz dégagé au cours de la réaction chimique. La quantité du gaz dégagé est comparée avec la référence de la réaction entre du carbonate pur et l'acide chlorhydrique. On prépare successivement 0,2g ; 0,4g et 0,6g de carbonate pur dans 3 flacons afin de déterminer la courbe d'étalonnage.

### 1.5.3 Résultats obtenus

Trois essais ont été réalisés. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau IV. On met donc en évidence une quantité significative de carbonate de calcium contenue dans la grave.

Tableau IV – Résultats des mesures de teneur en carbonate							
Essai	$m_{\text{CaCO}_3 \text{ pur}}$ (g)	Volume de gaz dégagé (cm <sup>3</sup> )	$m_{\text{Sol sec}}$ (g)	Volume de gaz dégagé (cm <sup>3</sup> )	$m_{\text{CaCO}_3}$ (g)	Teneur en carbonate (%) d 0/0,4	Teneur en carbonate (%)
1	0,6	142	0,6022	110,0	0,46	77,01	22,0
2	0,4	96	0,6007	112,0	0,47	78,62	22,4
3	0,2	45	0,6001	111,5	0,47	78,34	22,3

## 1.6 Masse volumique des grains

### 1.6.1 Objectif

L'objectif ici est de déterminer la masse volumique des matériaux constitutifs des particules solides  $\rho_s$  ainsi que celle des gros éléments constitués de ces matériaux. La mesure de ces masses volumiques est particulièrement importante dans ce cas car on a affaire à un matériau très hétérogène avec deux constituants principaux : un matériau de type « crayeux » et du silex.

### 1.6.2 Éléments de procédure

Les masses volumiques sont déterminées à l'aide du pycnomètre et d'une cloche à vide, en utilisant la norme NF P 94-054 pour les particules passant au tamis de 2 mm.

Nous avons également effectué des mesures de masse volumique sur les gros éléments (>20 mm). Ces mesures nous serviront pour obtenir la courbe Proctor modifiée (cf. partie II). La méthode consiste à plonger un élément préalablement enduit de paraffine dans un bac rempli d'eau (ou de kerdane) et de mesurer la quantité d'eau (ou de kerdane) déplacée par pesée (Figure 6).

### I.6.3 Résultats obtenus

#### I-6.3.1 Particules de taille inférieure à 2 mm

La masse volumique  $\rho_s$  du matériau constitutif (passant à 2mm) est calculée selon la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w^{(t2)} \frac{m_2 - m_1}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3}$$

où  $\rho_w^{(t2)}$  la masse volumique de l'eau à la température t2

$m_1$  : masse du pycnomètre vide

$m_2$  : masse du pycnomètre contenant la prise d'essai

$m_3$  : masse du pycnomètre, du sol et de l'eau

$m_4$  : masse du pycnomètre plein d'eau

Dons, on obtient le résultat

$$\rho_s = 2,672 \text{ t / m}^3$$

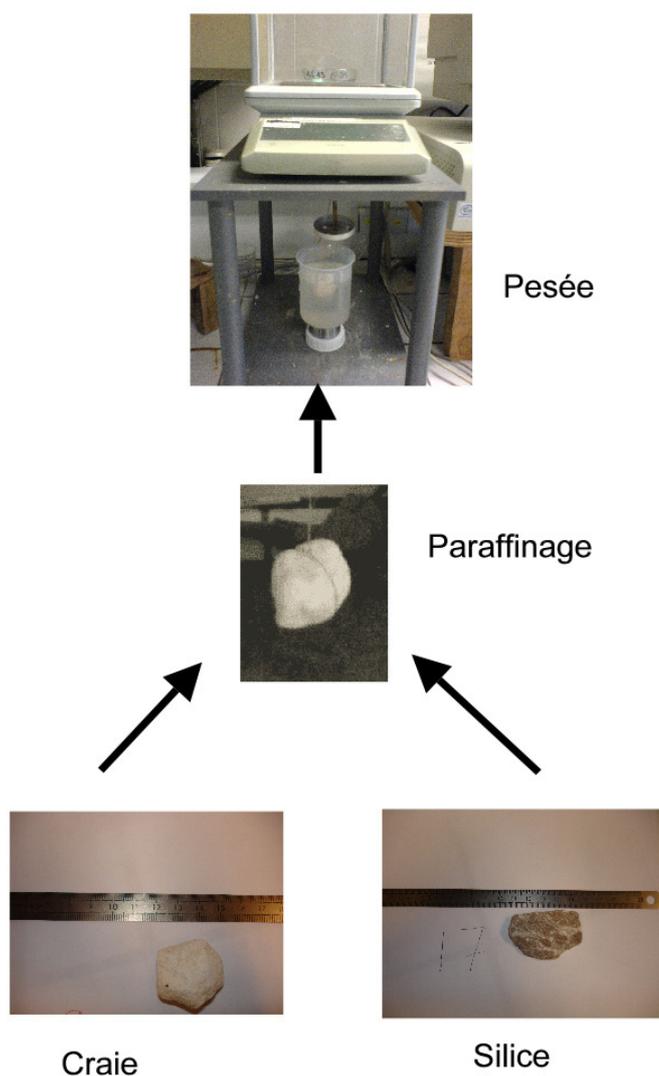


Figure 6 – Procédure pour la mesure de la masse volumique des gros éléments

### I-6.3.2 Gros éléments (taille supérieure à 2 cm)

Les résultats des essais sont synthétisés dans le Tableau V. Si l'on prend en compte une valeur moyenne à partir des trois essais réalisés, on obtient une valeur de  $2,60 \text{ t/m}^3$ , proche de celle de la silice pure ( $2,65 \text{ t/m}^3$ ). Par contre, on obtient des valeurs très faibles pour les éléments craeux (valeur moyenne de  $1,66 \text{ t/m}^3$ ), ce qui indique une porosité importante de ces éléments.

Tableau V – Résultats des mesures de masse volumique des particules de grandes dimensions (>20 mm)				
Type de particule	Essais	Taille de la particule	Masse volumique t/m <sup>3</sup>	
				Moyenne
Silice	1	>20 mm	2,51	2,60
	2	>20 mm	2,62	
	3	>20 mm	2,69	
Craie	1	>20 mm	1,66	1,66
	2	>20 mm	1,64	
	3	>20 mm	1,68	

## II CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE DE LA GRAVE

La grave retenue pour le projet national, comportant un pourcentage important de fines, est un matériau sensible à l'eau, dont les caractéristiques mécaniques vont dépendre de sa teneur en eau et de sa masse volumique sèche. Il est donc nécessaire de déterminer sa courbe Proctor en vue ensuite de déterminer ses caractéristiques mécaniques pour des états initiaux bien définis, aussi proches que possible de l'état du matériau mis en place sur le site expérimental.

### II.1.1 Eléments de procédure

La procédure suivie est celle correspondant à la norme NF P94-093. On a choisi le moule CBR et la dame Proctor modifiée car la taille des plus gros éléments atteint 50 mm. On tamise le sol naturel à l'aide du tamis d'ouverture 20 mm. On répartit également la masse de sol dans 8 récipients (environ 6kg de sol par récipient). On humidifie le sol dans chaque boîte jusqu'à la teneur en eau choisie (entre 6% et 14%). La teneur en eau est contrôlée avant et après l'essai. Puis le sol est compacté dans le moule CBR en 5 couches d'environ 1,2 kg. Le compactage est réalisé en 8 séquences de 7 coups par couche. Après le compactage de la dernière couche, on enlève la rehausse et on arase l'éprouvette.

### II.1.2 Résultats obtenus

Comme le diamètre des plus gros éléments  $D_{max}$  dépasse 20mm et la fraction volumique  $D_{0/20}$  est de l'ordre de 30% (voir la courbe granulométrique – Partie II.1), il faut appliquer une correction aux caractéristiques mesurées :

$$\rho_d^{corrigée} = \frac{m_F + m_G}{\frac{m_F}{\rho_d^{0/20}} + \frac{m_S^C}{\rho_d^C} + \frac{m_S^S}{\rho_d^S}} = \frac{1}{\frac{1-\alpha}{\rho_d^{0/20}} + \frac{\alpha}{\rho_d^C} f_m^C (20/60) + \frac{\alpha}{\rho_d^S}}$$

$$w^{corrigée} = w_F (1 - \alpha) + w_G \alpha = w_F (1 - \alpha) + w_{max}^C f_m^C (20/60) \alpha$$

avec

$m_F$  : masse sèche du sol écrêté

$m_S^S$  : masse des particules de silice sèches (> 20 mm)

$m_S^C$  : masse des particules de craie sèches (> 20 mm)

$m_G = m_S^S + m_S^C$  : masse sèche des particules supérieures à 20 mm

$\rho_d^{0/20}$  : densité sèche du sol écrêté

$\rho_d^C$  : densité sèche des particules de craie (> 20 mm)

$\rho_d^S$  : densité sèche des particules de silice (> 20mm)

$\rho_d^C$  : densité sèche des particules de craie (> 20 mm)

$\rho_d^S$  : densité sèche des particules de silice (> 20mm)

$\alpha$  : fraction massique des particules > 20mm

$f_m^C$  : fraction massique des particules de craie dans la partie > 20mm

$w_F$  : teneur en eau du sol écrêté (valeur mesurée à l'essai Proctor)

$w_{max}^C$  : teneur en eau max des particules de craie > 20 mm

$w_G = w_{max}^C f_m^C$  : teneur en eau des particules > 20 mm

Dans le cas de la grave G1 étudiée :

$$\alpha = 0,217$$

$$f_m^C = 0,15$$

$$\rho_d^S = 2,60 \quad t/m^3$$

$$\rho_d^C = 1,66 \quad t/m^3$$

$$w_{max}^C = 0,22$$

Tableau VI – Résultats des essais Proctor								
	Ech 1	Ech 2	Ech 7	Ech 8	Ech 6	Ech 5	Ech 3	Ech 4
w (%)	6,19	9,17	9,98	10,10	10,25	10,92	11,13	13,30
$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,920	2,007	2,052	2,035	2,067	2,058	2,054	1,971
w <sub>corrigée</sub> (%)	4.86	7.19	7.83	7.92	8.04	8.56	8.73	10.42
$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) corrigée	1.956	2.026	2.062	2.064	2.074	2.067	2.064	1.997
$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) ; Sr = 100%	2,387	2,262	2,229	2,225	2,219	2,194	2,186	2,108
$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) ; Sr = 80%	2,320	2,173	2,136	2,131	2,124	2,095	2,086	1,998

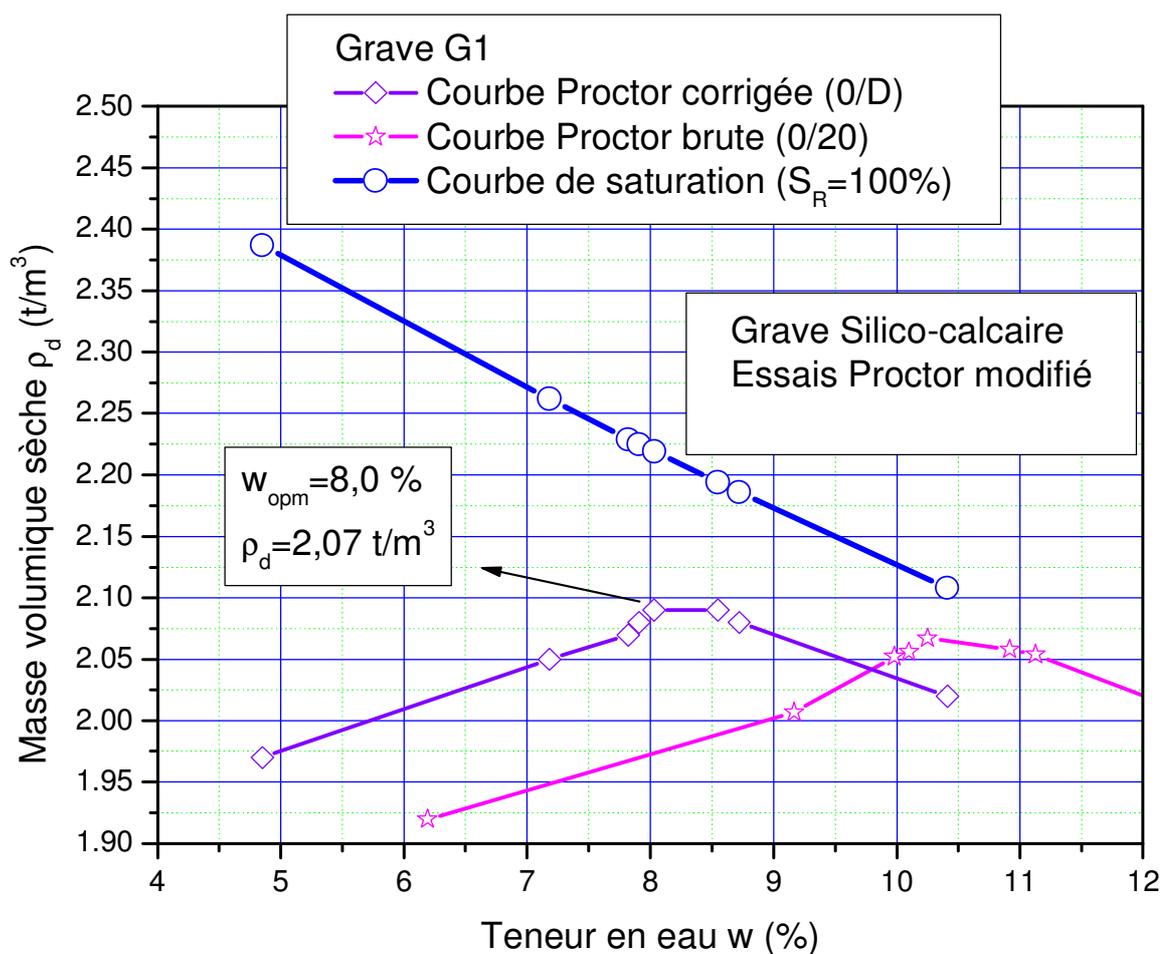


Figure 7 - La courbe Proctor modifiée pour la grave G1

La teneur en eau et la densité sèche correspondant à l'optimum Proctor sont donc :

$$w_{\text{opt}} = 8 \% ; \rho_{d, \text{opt}} = 2,07 \text{ (t/m}^3\text{)}.$$

### **III CARACTERISATION MECANIQUE DE LA GRAVE G1**

#### **III.1 *Le dispositif d'essai triaxial***

Ce dispositif permet de réaliser des essais de chargement triaxiaux sur des matériaux comportant des éléments de grande taille. Les éprouvettes de 600mm de hauteur et 300 mm de diamètre peuvent être testées sur des trajets de chargement asservis, sous sollicitations monotones ou cycliques.

Le dispositif est constitué de la cellule triaxiale proprement dite, fixée sur un chariot reposant sur une dalle d'essai (2,5 m x 2,0 m), équipée d'un bâti de chargement 4 colonnes (Figure 8).

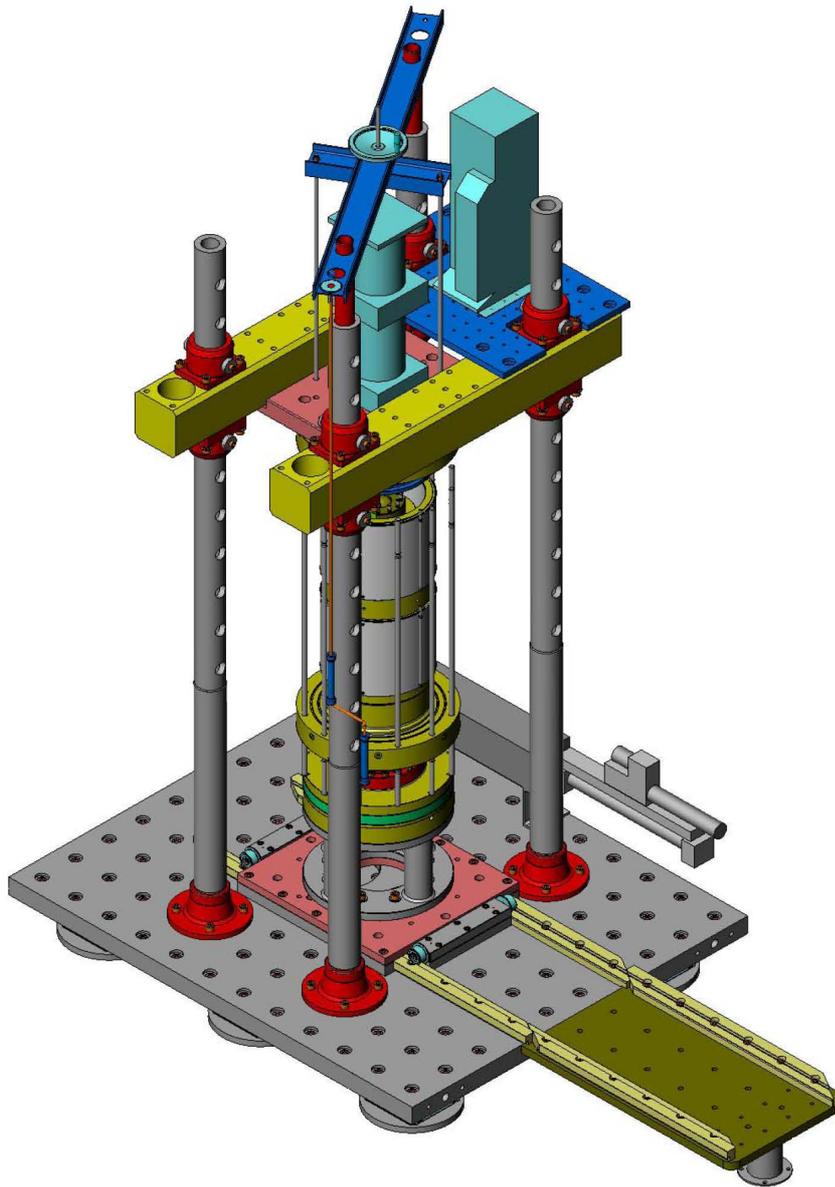


Figure 8 – Schéma du dispositif d'essai triaxial 300 mm.

La cellule triaxiale, solidaire du chariot, est mobile en translation et rotation. Pour la préparation des éprouvettes, le chariot est positionné à l'extérieur du bâti 4 colonnes, sur la plate-forme adjacente (Figure 8). L'ensemble est ensuite positionné sous le bâti de chargement pour solidarisation avec le couvercle (Figure 9) de la cellule et le servovérin.

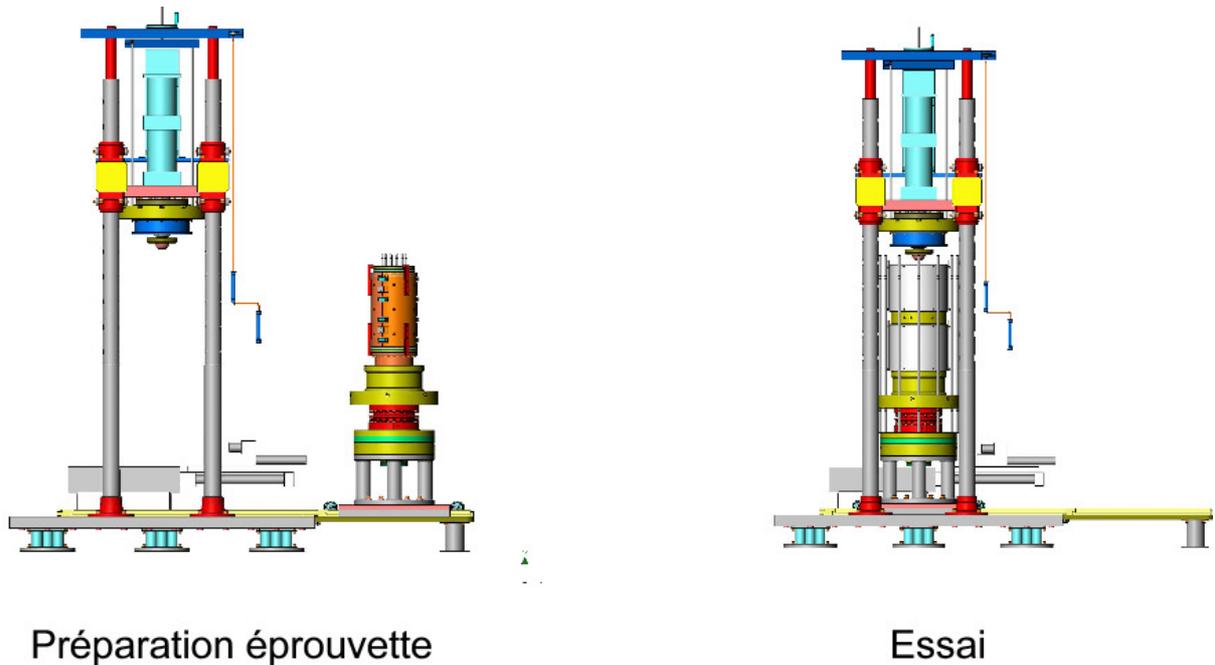


Figure 9 - Phase de préparation de l'éprouvette et phase d'essai

La Figure 10 présente un schéma de principe ainsi qu'une vue de la cellule triaxiale. Le chargement axial est appliqué grâce à un servovérin de 500 kN. On dispose également d'un second servovérin qui contrôle et asservit la pression de cellule (0-2 MPa). Le système peut donc être utilisé en asservissement « biaxial », qui permet de réaliser des chemins de contrainte  $q/p'=cte$  sous sollicitations monotones et cycliques.

Dans les essais triaxiaux classiques (pression de cellule constante au cours de l'essai), la mesure de la variation de volume de l'éprouvette est réalisée à l'aide du servovérin d'asservissement de la pression de cellule. En effet, le déplacement de ce vérin permet d'avoir accès, moyennant certaines corrections, au volume qui sort ou entre dans l'enceinte triaxiale, qui correspond aux variations de volume de l'éprouvette.

Dans le cas des essais de compression isotrope, la déformation volumique de l'éprouvette est obtenue à partir des mesures locales (cf. partie III.6.3).

L'ensemble du pilotage et de l'acquisition des données est géré par un système digital FlexTest de MTS.

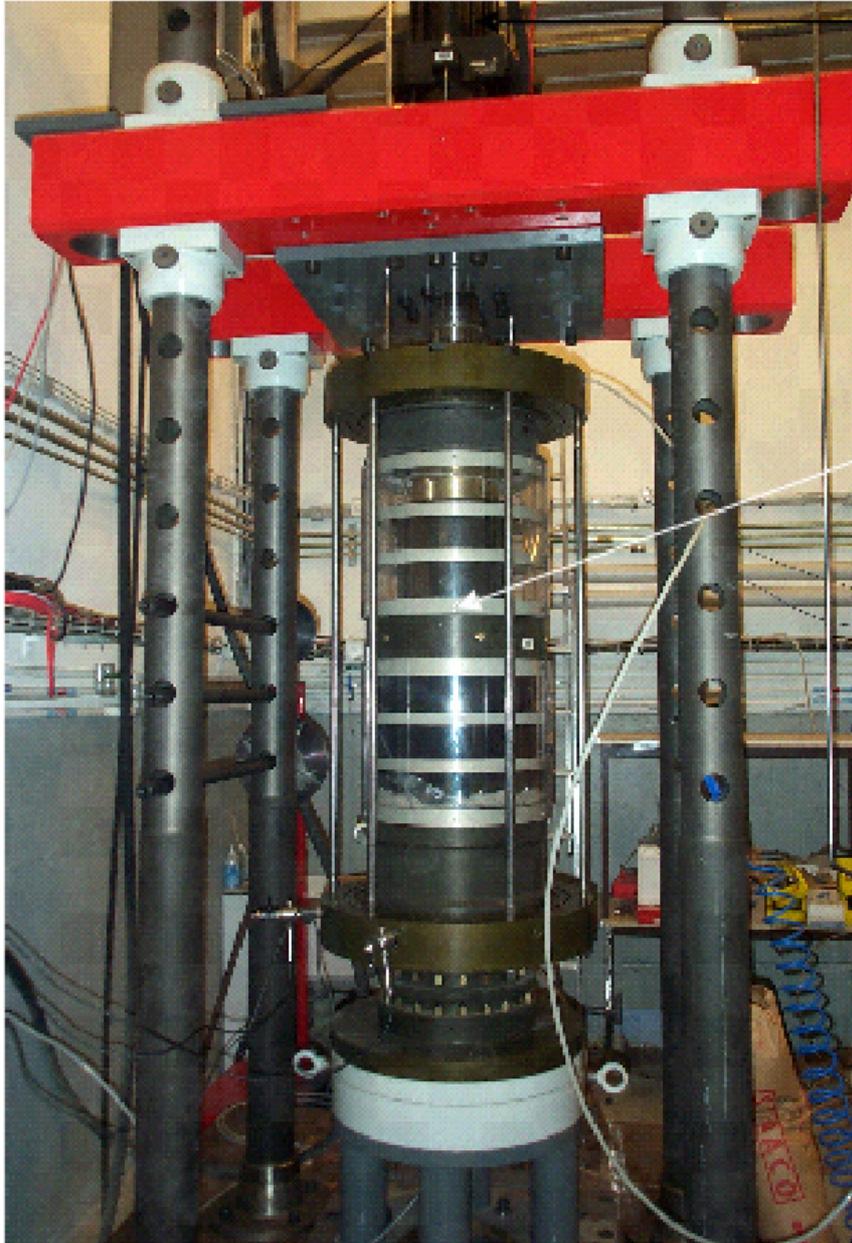


Figure 10 - Le dispositif triaxial 300 mm

La Figure 11 présente une vue de l'ensemble du dispositif. On peut voir en particulier sur la droite la cabane qui regroupe l'ensemble de pilotage et d'acquisition des données.



Figure 11 - Vue d'ensemble du dispositif d'essai

### **III.2 Protocole d'essai utilisé pour la grave G1**

La procédure d'essai consiste à préparer l'éprouvette en 10 couches de 6 cm à la compacité voulue. A partir de la courbe de compactage déterminée précédemment, on définit la teneur en eau de l'éprouvette et on calcule la masse de sol à mettre en place pour atteindre la compacité voulue. Cette masse est divisée en 10 parties, qu'on humidifie pour atteindre la teneur en eau choisie. On compacte ensuite les couches à l'aide d'une première dame pour aplanir la surface, puis avec la dame Proctor jusqu'à atteindre la bonne hauteur (Figure 12). Une fois que le matériau a été mis en place, on démoule l'éprouvette (Figure 12), puis on met en place l'enceinte de confinement (en deux parties) et les tirants de serrage. Dans le cas des essais avec mesure locale des déformations, on vient placer les systèmes de mesure avant la mise en place de l'enceinte de confinement (cf. partie III.5.1)

L'ensemble est ensuite positionné sous le vérin. Celui-ci est descendu au contact de l'embase supérieure de l'éprouvette, puis on descend le couvercle de la cellule, solidaire du servovérin et on bloque les tirants. La cellule est alors remplie d'eau, et on applique la

pression de confinement sélectionnée à l'aide du servo-vérin de confinement. L'essai de cisaillement peut ensuite être lancé.

### **III.3 Programme expérimental**

Le programme expérimental a été défini en accord avec les autres membres du projet national selon un cahier des charges (Dupla et al., 2006). Ce programme comporte des essais de compression et d'extension triaxiales classiques, avec mesures globales des déformations (pas de mesures locales), menés jusqu'à la rupture (6 essais de compression (2 compacités x 3 contraintes), 6 essais d'extension (2 compacités x 3 contraintes) et deux essais de répétabilité, soit 14 éprouvettes), ainsi que des essais avec mesure locale des déformations (dispositifs du type LTD, sollicitations isotrope et de cisaillement) menés jusqu'à une déformation axiale maximale de l'ordre de 1%, et dont l'objectif est d'obtenir des modules réalistes dans la gamme des petites déformations (trois essais en compression et trois essais en extension, soit 6 éprouvettes au total, avec, pour chaque éprouvette, mesures sous sollicitation isotrope, puis de cisaillement). Le programme complet comporte donc la réalisation de 20 éprouvettes.

On présente dans ce rapport les résultats d'une première série d'essais réalisés, récapitulés dans le Tableau VII. Le programme d'essais présenté comprend une série de 11 éprouvettes. Les éprouvettes 1 à 9 correspondent aux essais de cisaillement avec mesures globales des déformations, dont deux essais de répétabilité (éprouvettes 7 et 8) et un essai supplémentaire (éprouvette 9) réalisé à une teneur en eau supérieure (8,8%). Les éprouvettes 10 et 11 correspondent à des essais réalisés avec mesure locale des déformations (chargements isotropes puis cisaillement) (Tableau VII). Le Tableau VIII donne le détail des séquences de chargement isotrope réalisées. Les essais de cisaillement ont été réalisés à déformation contrôlée à une vitesse de 0,05 % de déformation axiale par minute jusqu'à une déformation de l'ordre de 10%. On a également réalisé des phases de décharge/recharge pour 5 niveaux de déformation (0,1 – 0,3 – 0,5 – 1 et 4%). Ces phases doivent permettre de déterminer les caractéristiques élastiques du sol (module d'Young). La procédure des essais de compression isotrope est décrite dans la partie III.5.1.



Figure 12 - Vues des différentes phases de préparation d'une éprouvette triaxiale 300 mm

Tableau VII – Caractéristiques principales des essais de cisaillement en compression réalisés sur la grave G1								
No	Sol	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Type <sup>(1)</sup>	$p_{conf}$ (kPa)	Vitesse $\varepsilon_a$ (%/min)	Décharge/recharge	Remarques
1	Grave G1	7,7	1,96	C	100	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	
2		7,5	1,97	C	50	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	
3		7,9	1,96	C	25	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	
4		7,5	1,76	C	100	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	
5		7,4	1,76	C	50	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	
6		7,5	1,76	C	25	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	
7		7,4	1,76	C	100	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	Répétabilité
8		7,8	1,96	C	50	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1 - 4 -10	Répétabilité
9		8,8	1,76	C	100	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 – 1 – 4 -0	Variation de la teneur en eau
10 <sup>(1)</sup>		7,4	1,76	C	100	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 – 1	Mesures locales des déformations
11 <sup>(1)</sup>		7,5	1,76	C	100	0,05	0,1- 0,3 - 0,5 - 1	Mesures locales des déformations

Tableau VIII – Caractéristiques principales des essais de compression isotrope réalisés sur la grave G1								
No	Sol	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Type <sup>(1)</sup>	$p_{conf}$ (kPa)	Vitesse $p_{conf}$ (kPa/min)	Décharge/recharge	Remarques
10 <sup>(2)</sup>	Grave G1	7,4	1,76	C	25	0,1	25 : 5 -10 50 : 5 10 20 100 : 5 10 20 30	Isotrope - Mesures locales des déformations
11 <sup>(2)</sup>					50			

<sup>(1)</sup> C : Compression

<sup>(2)</sup> Les essais 10 et 11 sont des essais où l'on a installé le système de mesures locales des déformations. La première phase de l'essai consiste à réaliser des essais de compression isotrope, puis dans un second temps on effectue un essai de cisaillement jusqu'à environ 1% de déformation axiale (cf. partie III.5.1)

### **III.4 Essai avec mesure globale des déformations**

#### *III.4.1 Description d'un essai typique*

La Figure 13 présente les résultats obtenus pour l'essai 3.

Dans le plan  $(q, \varepsilon_a)$ , on observe une augmentation initiale rapide du déviateur quasi linéaire, puis la courbe s'incurve jusqu'à un maximum de résistance marqué suivi d'un radoucissement très significatif. Il est intéressant de noter la faible déformation axiale mesurée au maximum de résistance (environ 1%), rendant compte d'un comportement relativement « fragile » du matériau compacté. En termes de déformations volumiques, on obtient une phase de contractance initiale relativement faible suivie par une phase de dilatance très marquée.

La Figure 14 présente un zoom sur la partie initiale des courbes précédentes où l'on peut observer les différentes phases de décharge-recharge réalisées jusqu'à 1 % de déformation axiale.

On peut également noter que le passage de la contractance à la dilatance se produit pour une déformation de l'ordre de 0,4 %.

La Figure 15 présente un zoom de chacune des phases de décharge-recharge. On calcule la pente des courbes de recharge qui donne accès au module d'Young. L'évolution de ce module est présentée de façon synthétique sur la Figure 16. On observe une phase de décroissance jusqu'à 0,5 % de déformation puis une stabilisation. Cette évolution n'est pas classique, car on s'attend plutôt à une augmentation avec le niveau de déformation (densification du sol). Cependant, la compacité du sol est proche de l'optimum, et on peut penser que pour cet état, le module d'Young est peu sensible à l'état de déformation axiale.

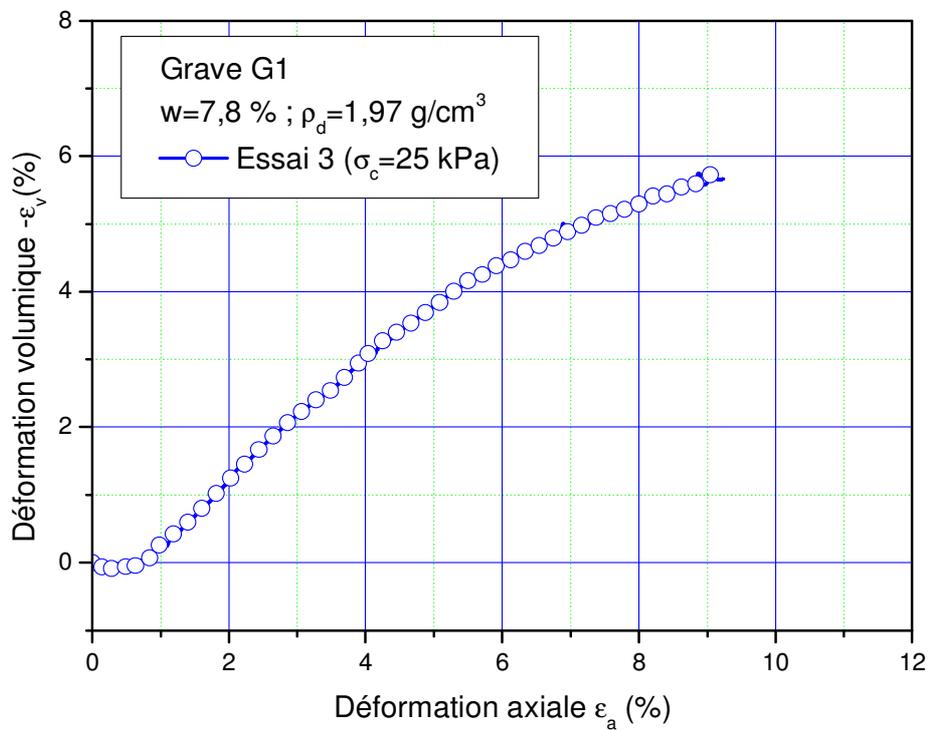
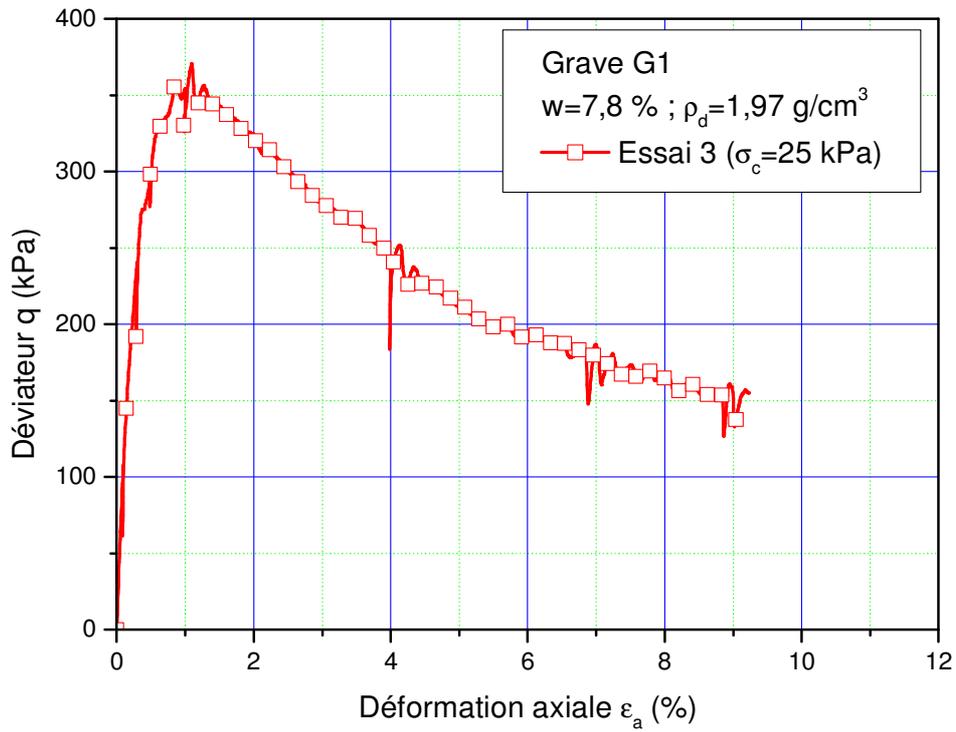


Figure 13 – Courbes de cisaillement ( $q, \varepsilon_a$ ) et de déformation volumique ( $-\varepsilon_v, \varepsilon_a$ ) pour l'essai

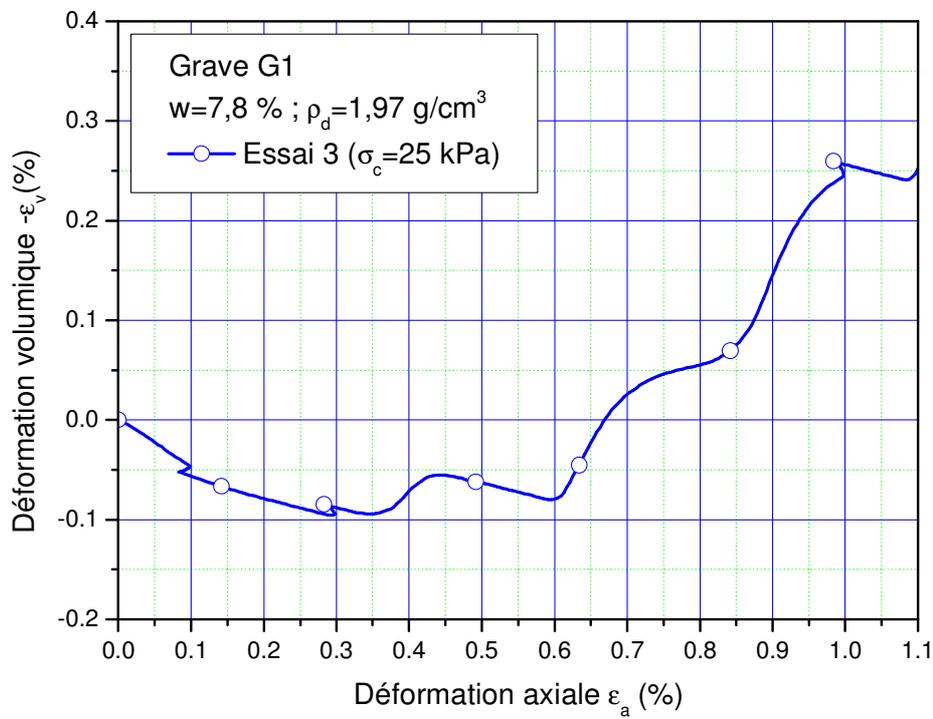
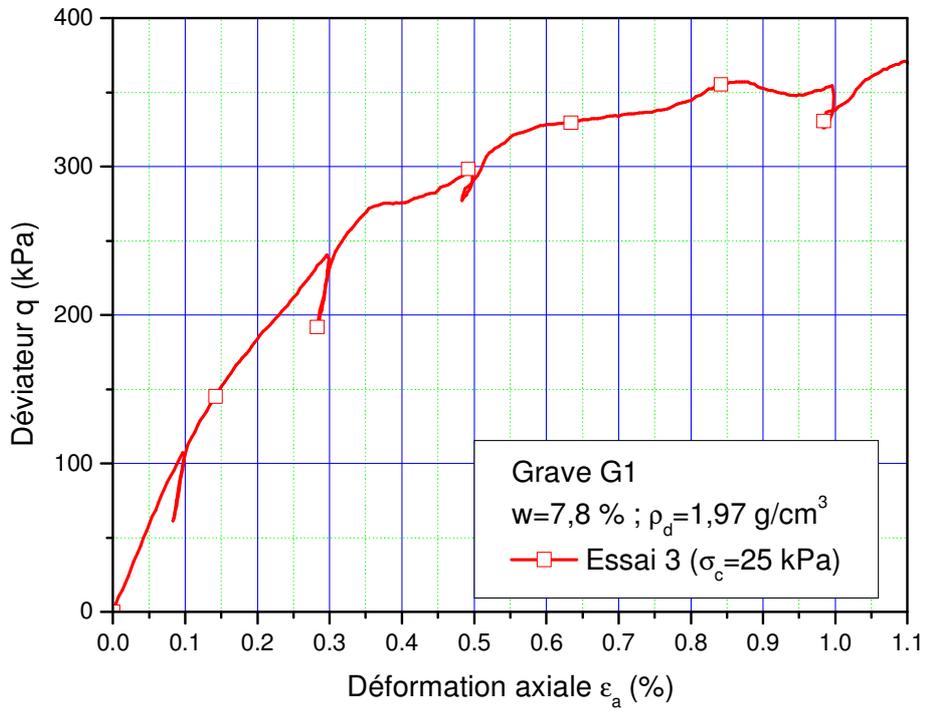


Figure 14 – Zoom sur la partie initiale des courbes ( $q, \epsilon_a$ ) et ( $-\epsilon_v, \epsilon_a$ ) (essai 3)

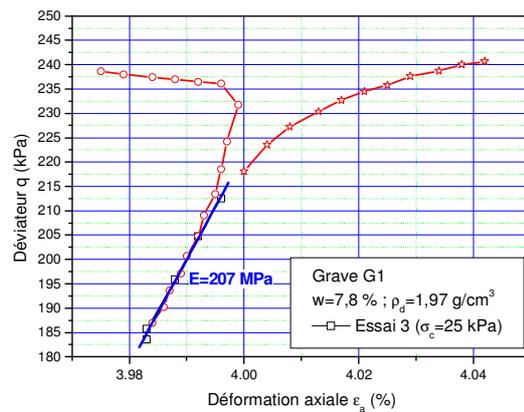
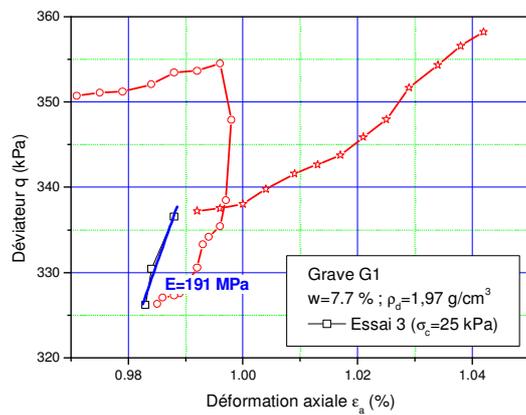
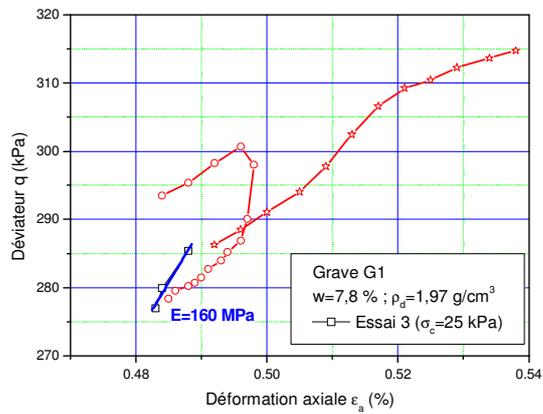
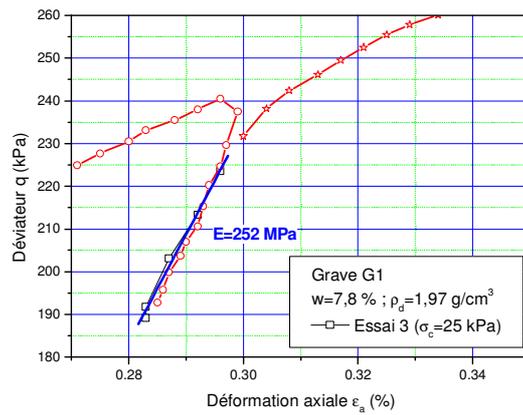
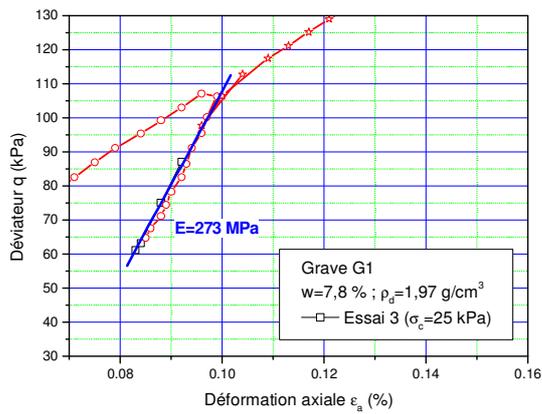


Figure 15 – Courbes de décharge-recharge à différents niveaux sur la courbe de cisaillement(essai 3)

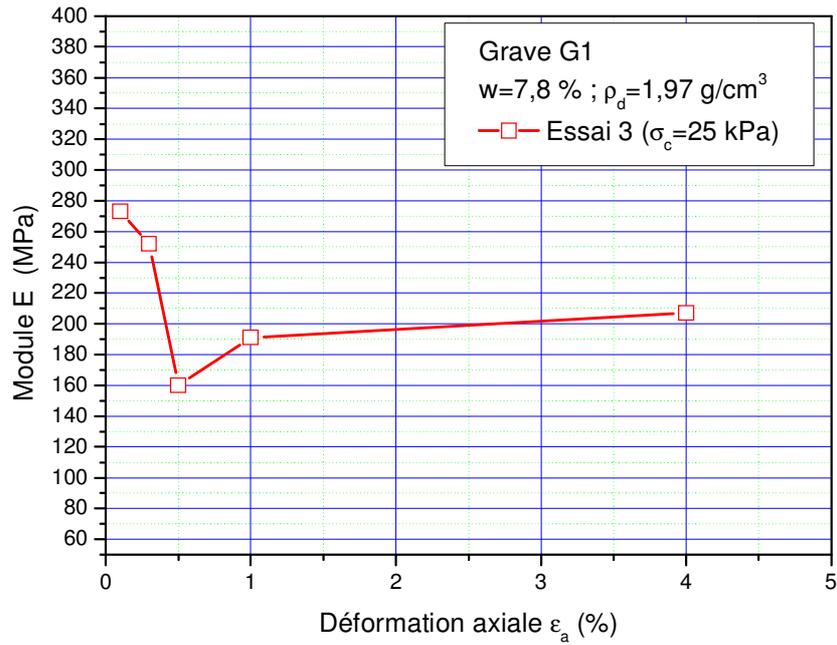


Figure 16 – Evolution des modules mesurés lors des phases de décharge-recharge (essai 3)

La Figure 17 présente une vue de l'éprouvette après essai. On observe une forme en tonneau caractéristique de l'éprouvette, ainsi qu'une surface de cisaillement localisée.



Figure 17 - Vue de l'éprouvette après essai (essai 3)

### *III.4.2 Essais de répétabilité*

La Figure 18 présente les résultats de deux essais réputés identiques pour l'état le plus dense ( $\rho_d=1,97 \text{ g/cm}^3$ ), destinés à tester la répétabilité de l'essai. On observe, sur la figure, un niveau de répétabilité correct, à la fois en terme de résistance au cisaillement et de déformation volumique. En ce qui concerne le module d'Young, on obtient également une bonne répétabilité (Figure 19).

On peut faire les mêmes observations (Figure 20 et Figure 21) en ce qui concerne l'état le plus lâche ( $\rho_d=1,76 \text{ g/cm}^3$ ).

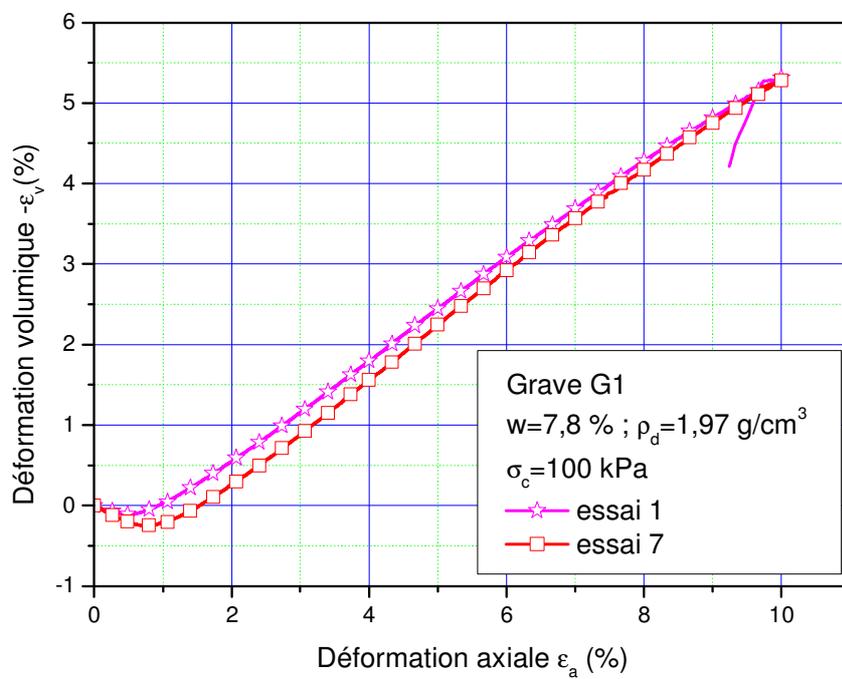
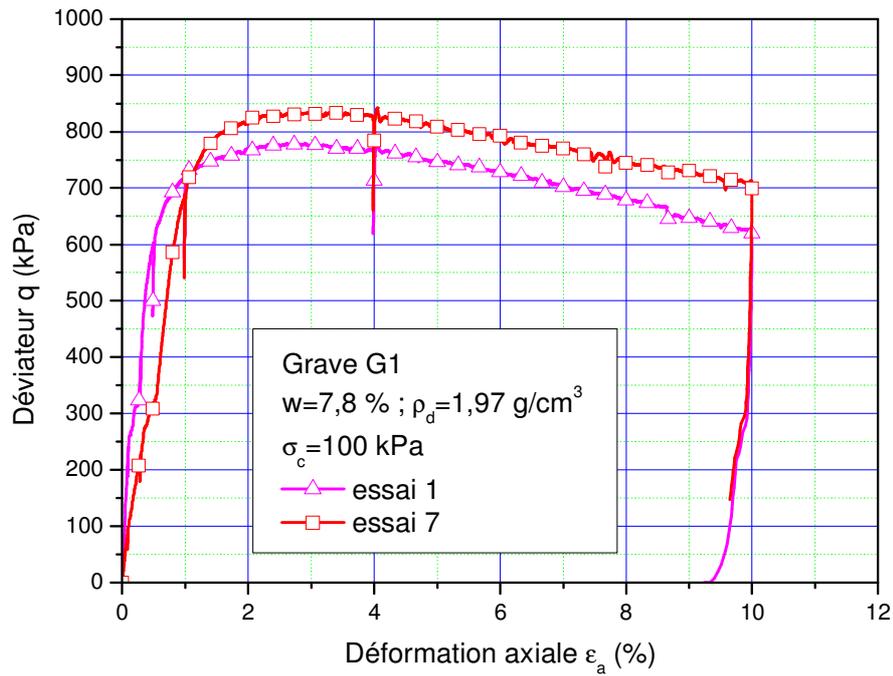


Figure 18 – Essais de répétabilité pour  $\rho_d=1,97\text{ g/cm}^3$  (95% de l'optimum Proctor)

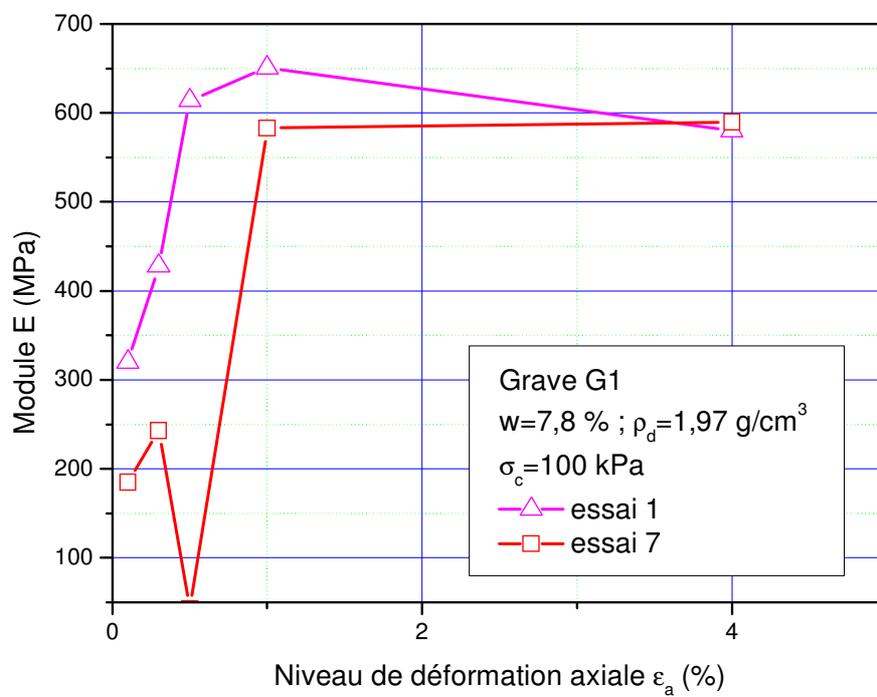


Figure 19 – Essais de répétabilité pour  $\rho_d=1,97\text{ g/cm}^3$  (95% de l'optimum Proctor)

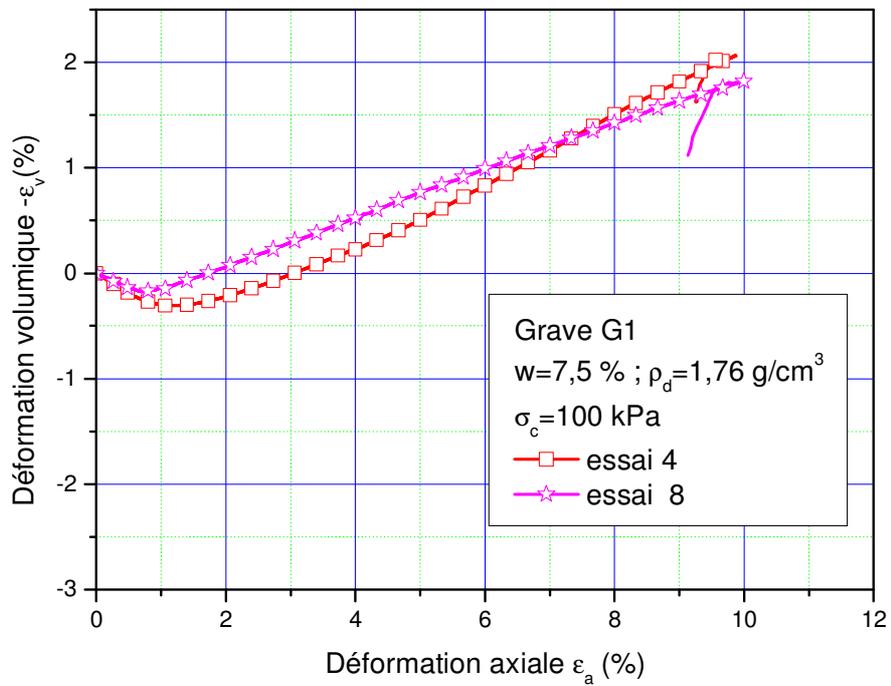
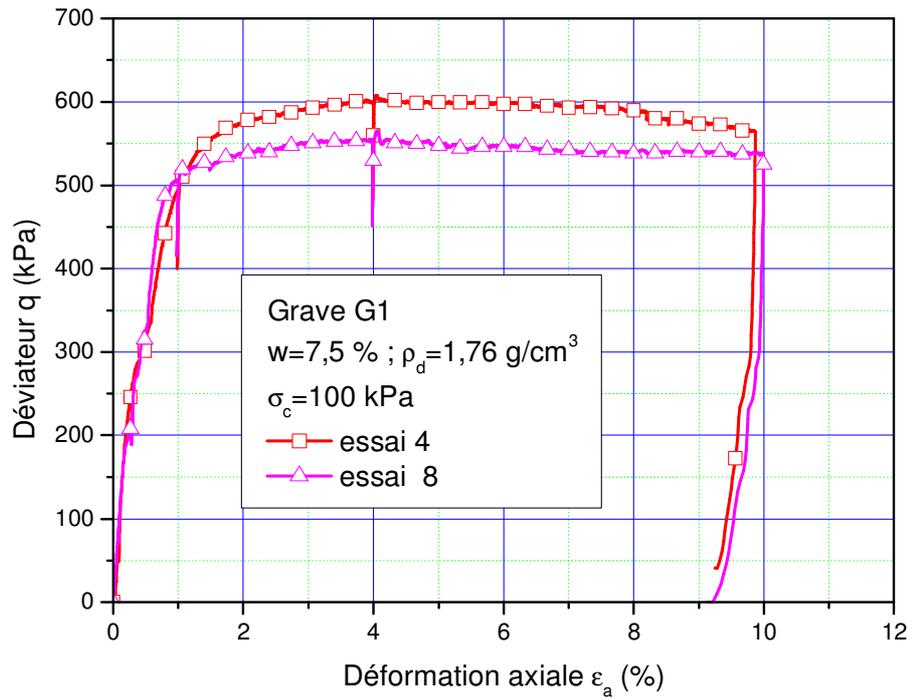


Figure 20 – Essais de répétabilité pour  $\rho_d=1,76 \text{ g/cm}^3$  (85% de l'optimum Proctor)

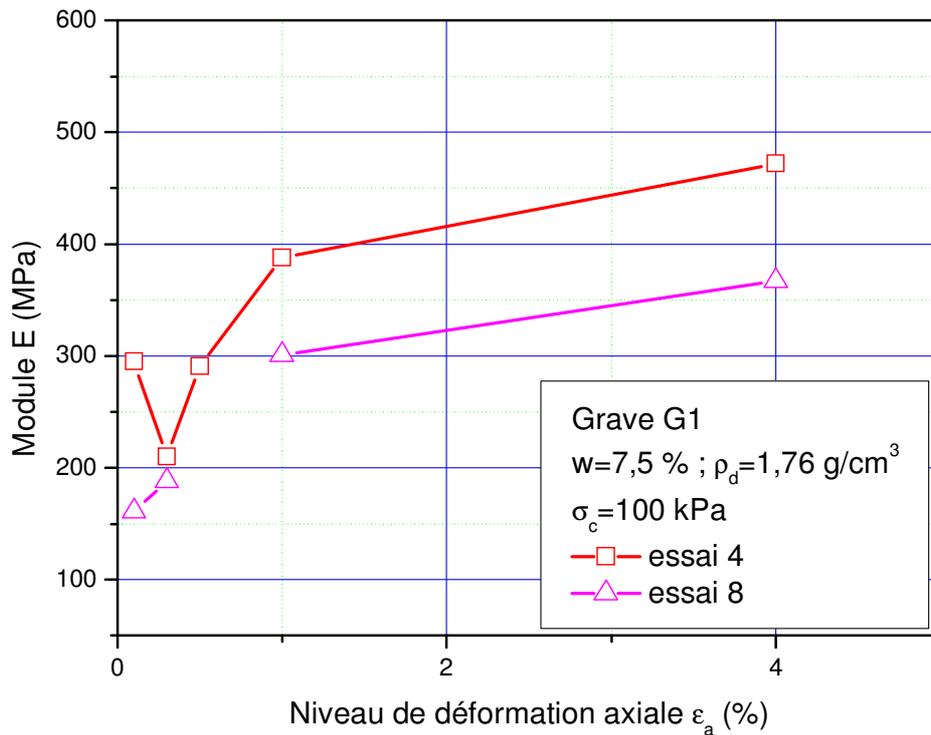


Figure 21 – Essais de répétabilité pour  $\rho_d=1,76\text{ g/cm}^3$  (85% de l'optimum Proctor)

### III.4.3 Synthèse des comportements globaux observés

#### III-4.3.1 Essais réalisés à 95% de l'optimum Proctor

La figure 22 présente les trois essais réalisés (essais 1,2 et 3) pour des confinements de 25, 50 et 100 kPa. On observe bien une augmentation de la résistance au cisaillement et de la phase de contractance avec la pression de confinement (Figure 22). Ces résultats sont analogues aux résultats que l'on obtient de manière classique sur les sols sableux. On n'observe cependant pas de proportionnalité des courbes de cisaillement avec la pression de confinement, rendant compte de l'influence du compactage sur les comportements observés (comportement du type « surconsolidé »). On passe, en effet, d'un déviateur de 350 kPa pour une pression de 25 kPa à 790 kPa pour une pression de 100 kPa.

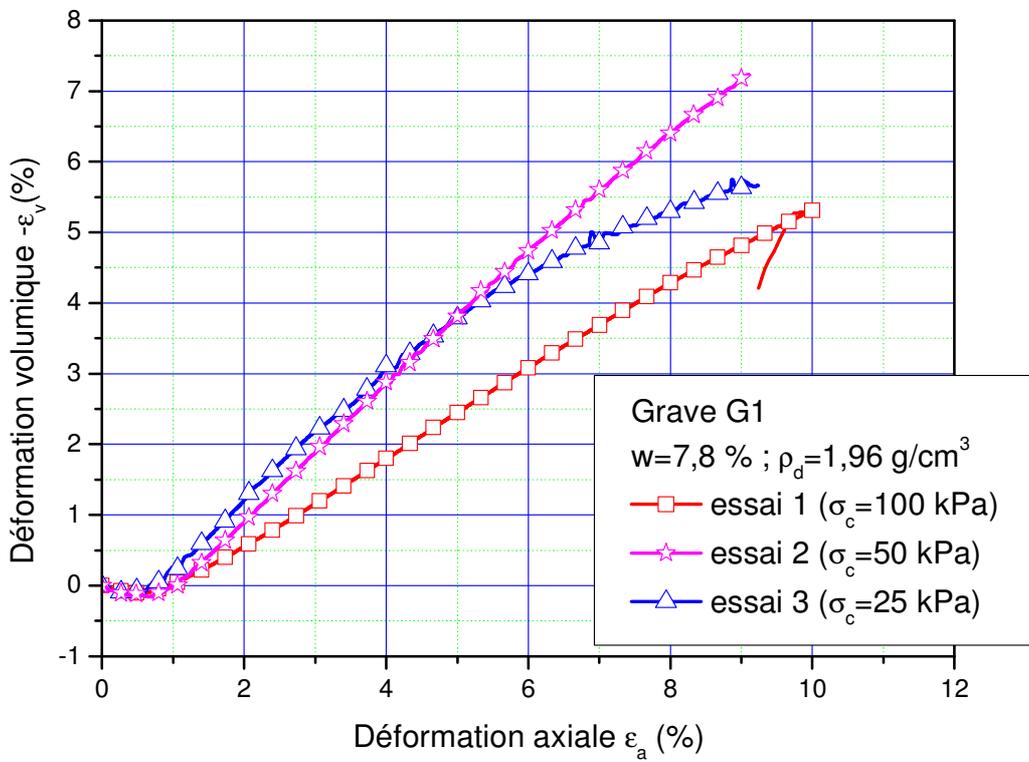
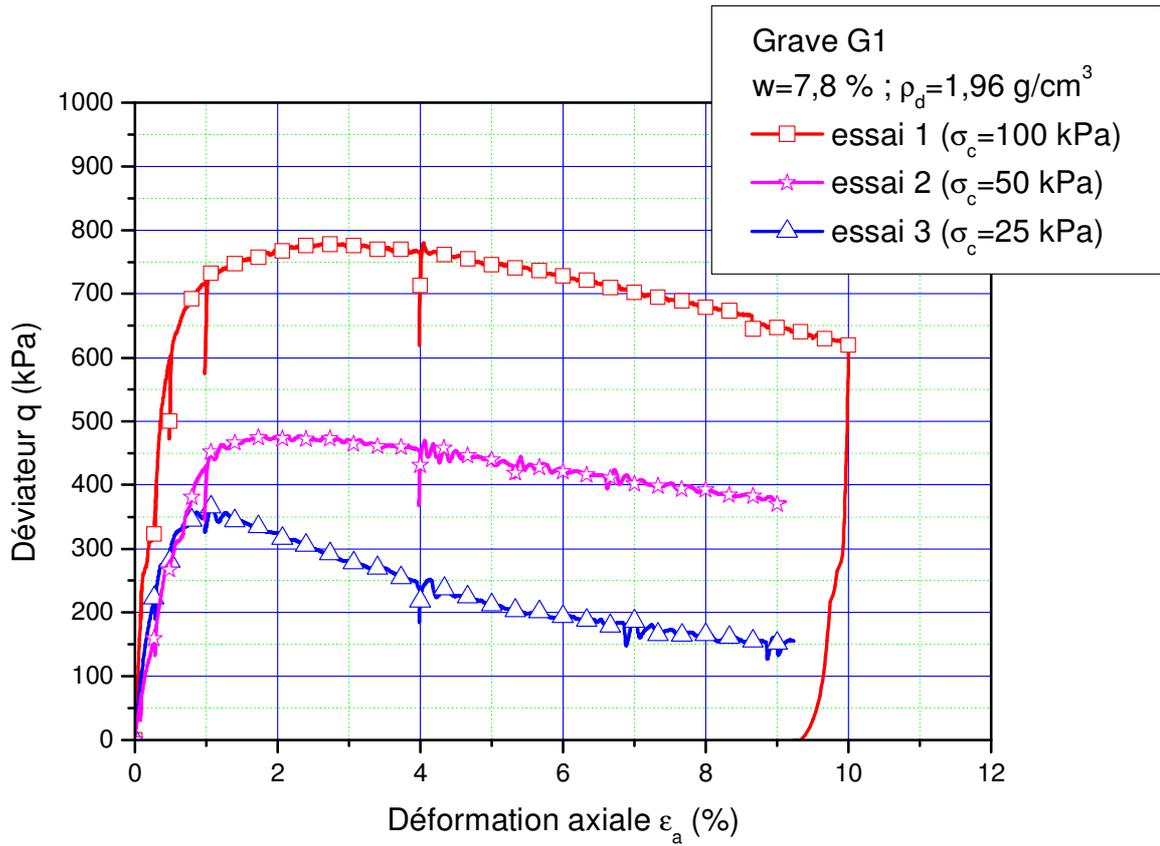


Figure 22 – Courbes de synthèse pour les essais 1, 2 et 3 (95% de l'optimum Proctor)



Figure 23 - Vues des éprouvettes 1,2 et 3 après essai

#### *III-4.3.2 Essais réalisés à 85% de l'optimum Proctor*

On présente dans cette partie les trois essais réalisés à la compacité la plus faible (essais 4, 5 et 6). On observe, comme pour la compacité la plus forte, une augmentation de la résistance et de la phase contractante avec la pression de confinement (Figure 24). De

même, on n'obtient pas de proportionnalité des courbes de cisaillement par rapport à la contrainte de confinement. En effet, on passe d'un déviateur de 20 kPa pour une pression de 25 kPa à 600 kPa pour une pression de 100 kPa.

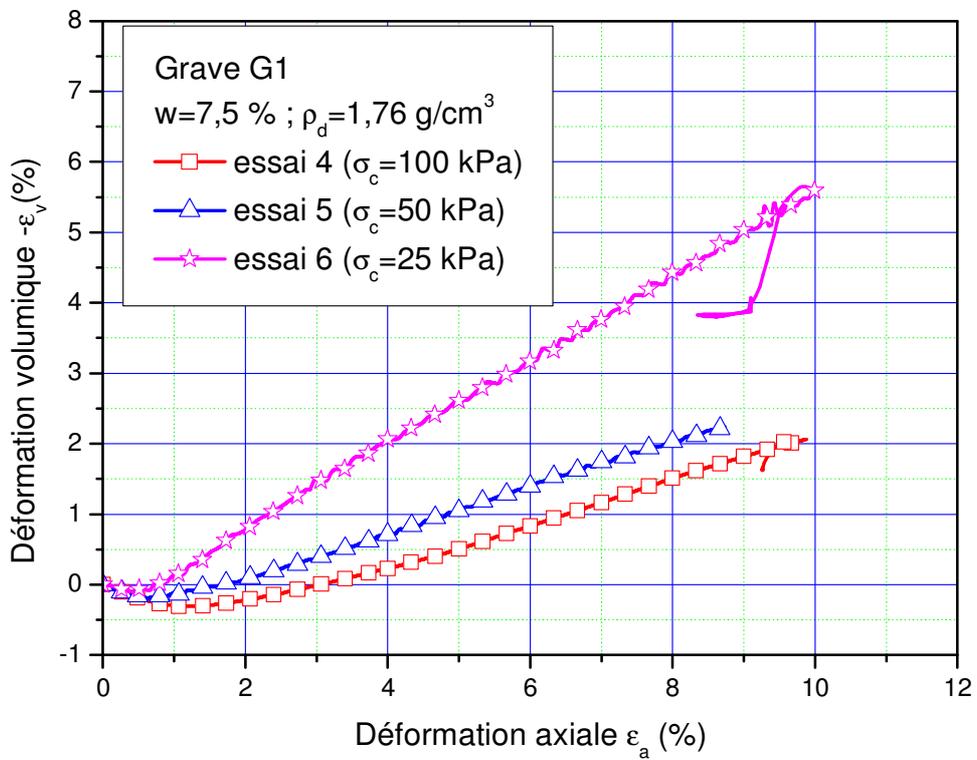
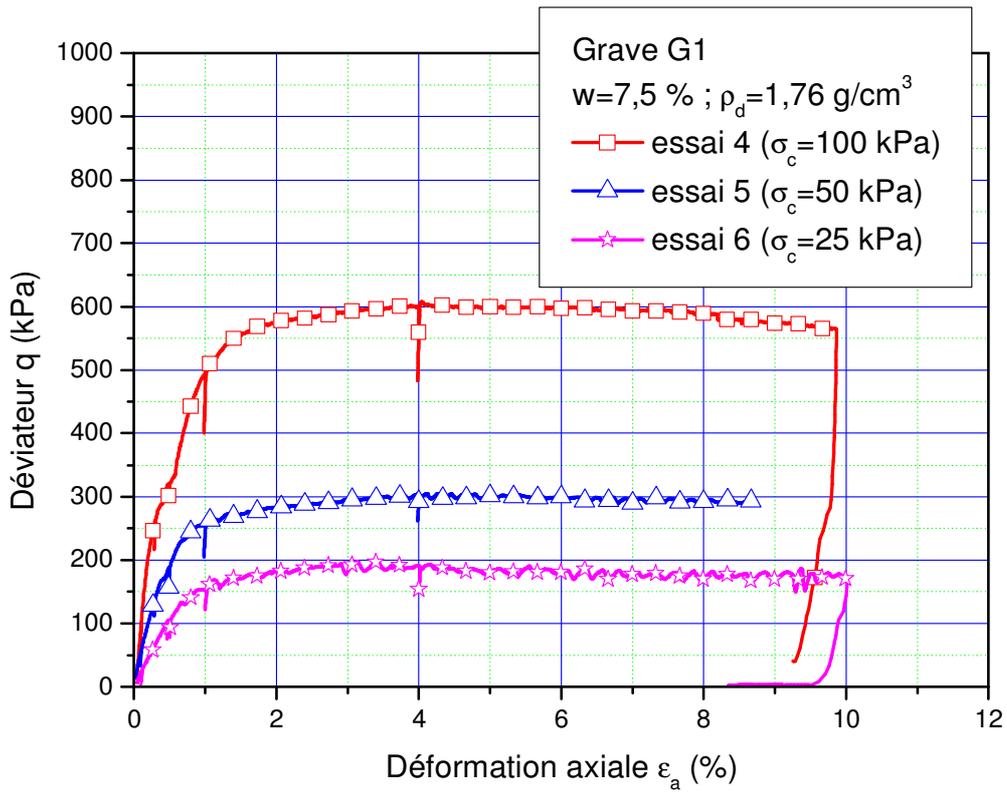


Figure 24 – Courbes de synthèse pour les essais 4, 5 et 6.

La Figure 25 présente des vues des éprouvettes 4, 5 et 6 après essai.

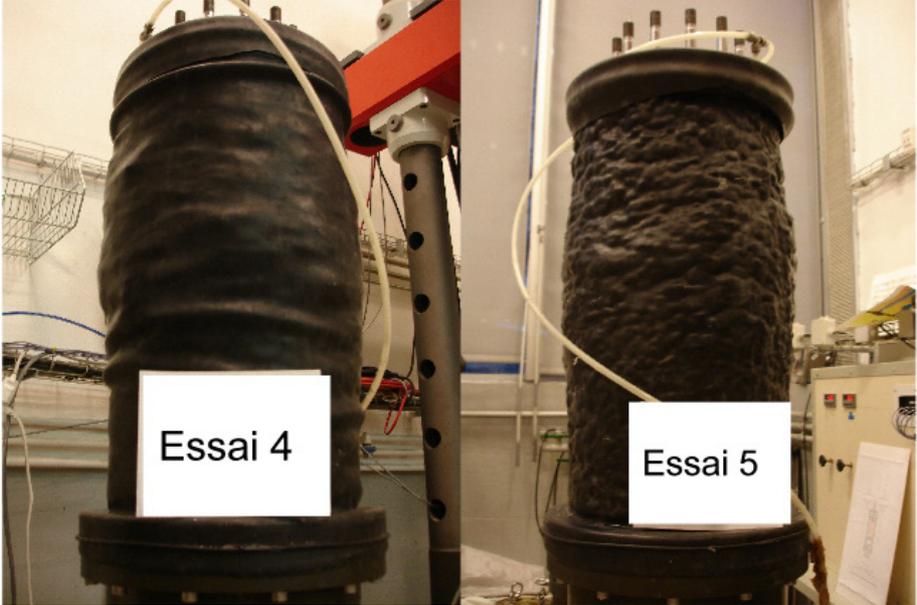


Figure 25 - Vues des éprouvettes 4, 5 et 6 après essai

### III.4.4 Caractéristiques élastiques

En utilisant la méthode présentée dans le paragraphe 3.4.1, nous avons déterminé les modules d'Young sur les phases de décharge-recharge pour les deux compacités.

La Figure 26 présente une synthèse des résultats obtenus pour la compacité la plus forte. Les évolutions ont une allure analogue pour les niveaux de contrainte les plus faibles : diminution du module suivie d'une réaugmentation puis une stabilisation. On observe, par contre, une croissance continue pour l'essai 1 réalisé à 100 kPa, qui serait en meilleur accord avec l'augmentation de la contrainte moyenne au cours de l'essai ainsi qu'à la densification du sol. Si on choisit comme valeur caractéristique celle mesurée lors de la première phase de charge-décharge (0,1 %), on obtient la courbe de la Figure 27.

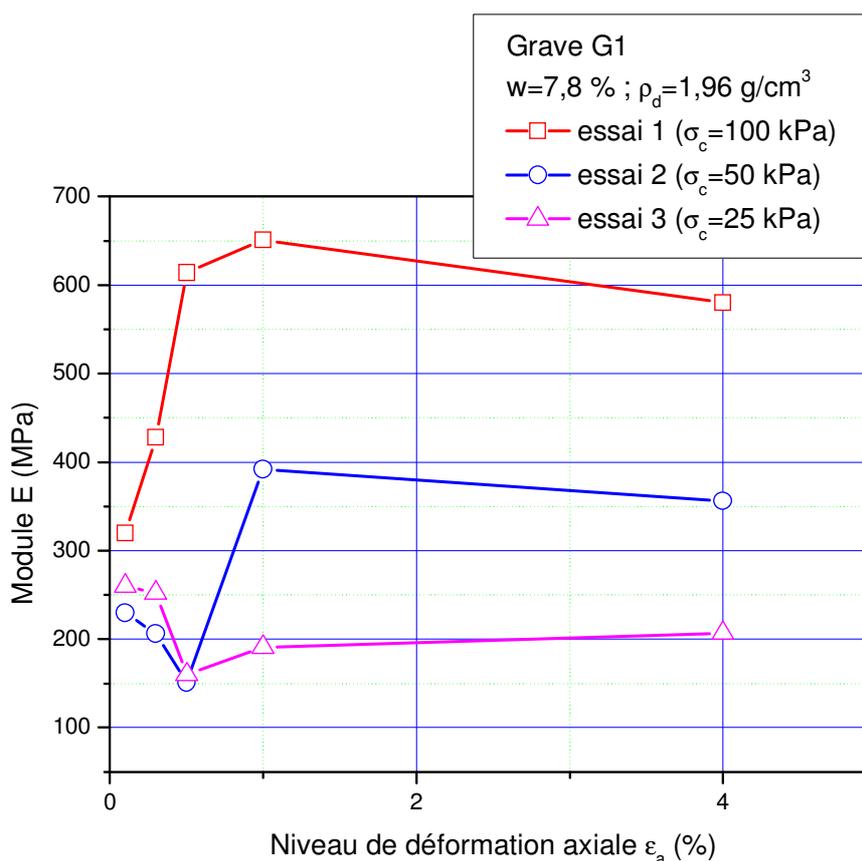


Figure 26 – Evolution du module d'Young en fonction de la position du point de décharge-recharge

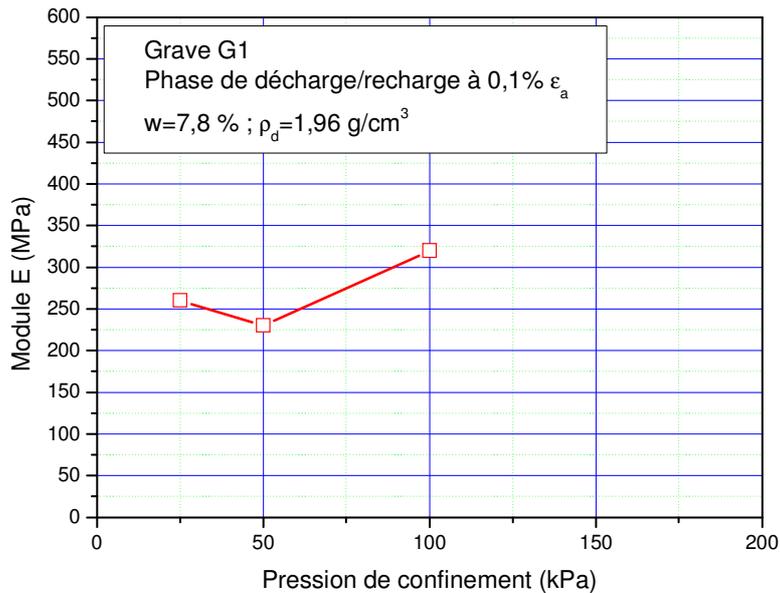


Figure 27 - Evolution du module d'Young en fonction de la pression de confinement (mesuré à  $\epsilon_a=0,1\%$ )

Pour la compacité la plus faible, les résultats sont synthétisés sur la Figure 28. Les évolutions sont similaires pour les niveaux de contraintes les plus faibles : augmentation rapide (sauf essai 4 pour la déformation axiale de 0,3%) qui va vers une stabilisation. Si on choisit comme valeur de référence celle mesurée lors de la première phase de décharge-recharge (0,1% de déformation axiale), on observe une augmentation du module avec la pression de confinement (Figure 29). Ce résultat est classique pour les sables.

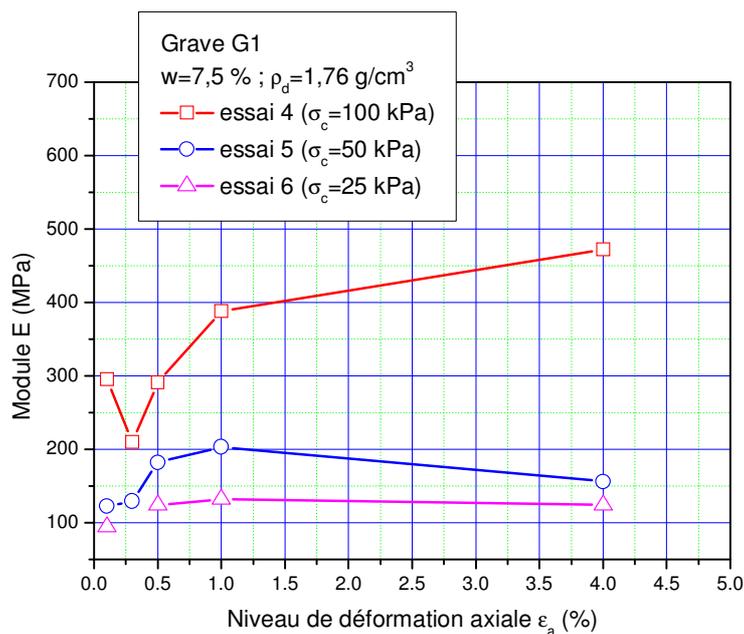


Figure 28 – Evolution des modules d'Young évalués pour les essais 4, 5 et 6

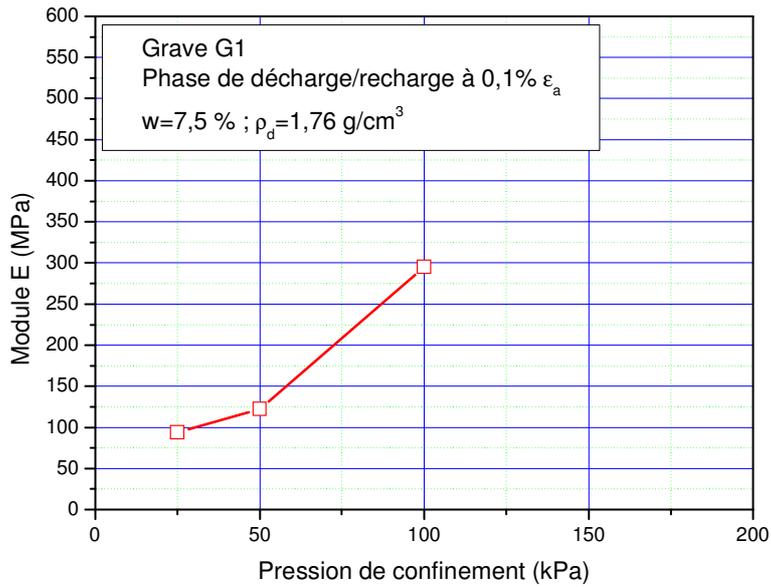


Figure 29 - Evolution du module d'Young en fonction de la pression de confinement (mesuré à  $\epsilon_a=0,1\%$ )

### III.4.5 Caractéristiques de rupture

La Figure 30 présente les cercles de Mohr de rupture (au maximum de résistance) correspondant aux essais 1, 2 et 3 (95% de l'optimum). Les trois cercles permettent de tracer une droite de rupture moyenne et de déterminer les paramètres de rupture de Mohr-Coulomb suivants :

$$c'=50 \text{ kPa}$$

$$\varphi'=48,9^\circ$$

En ce qui concerne la deuxième compacité étudiée (85 % de l'optimum), les résultats sont présentés sur la Figure 31. On obtient les paramètres de rupture suivants :

$$c'=10 \text{ kPa}$$

$$\varphi'=46,8^\circ$$

Par rapport à la compacité la plus élevée, il semble que l'angle de frottement ne soit pas beaucoup plus faible. Par contre, la cohésion diminue fortement, car on passe de 50 à 10 kPa.

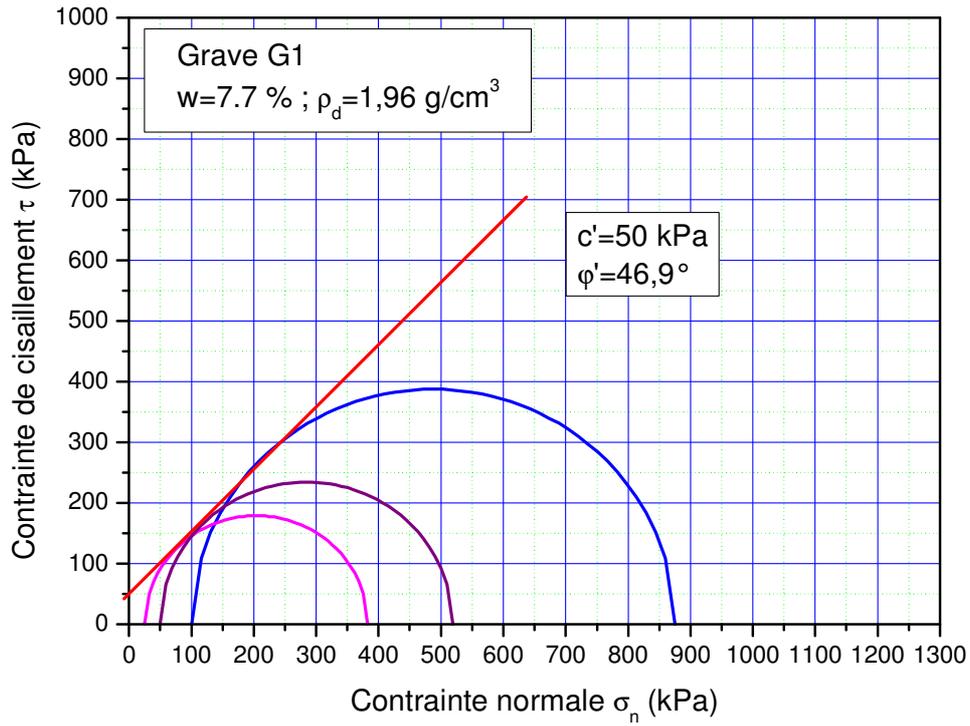


Figure 30 – Cercles de Mohr de rupture et droite de rupture de Mohr-Coulomb (95% de l'optimum)

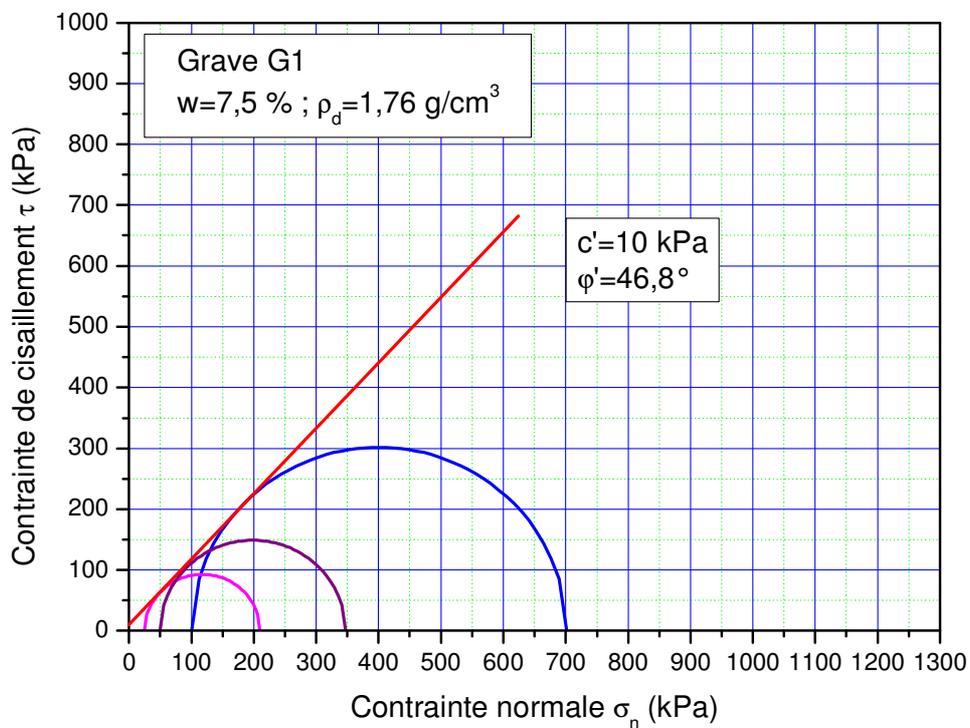


Figure 31 – Cercles de Mohr de rupture et droite de rupture de Mohr-Coulomb (85% de l'optimum)

### *III.4.6 Influence de la teneur en eau*

On n'avait pas prévu initialement d'étudier ce paramètre, mais les aléas expérimentaux ont fait qu'un essai (essai 9) présentait une teneur en eau plus importante que prévu ( $w=8,8\%$  au lieu de  $7,5\%$ ). On présente donc sur la Figure 32 la comparaison des résultats expérimentaux obtenus pour cet essai avec ceux présentés précédemment, en particulier l'essai 4. On observe, pour l'essai 9, une diminution significative des caractéristiques de résistance du matériau par rapport à l'essai 4, avec un comportement volumique très différent : on observe une contractance marquée au lieu de la dilatance observée dans l'essai 4. Cette comparaison montre l'influence significative de la teneur en eau du matériau sur ses caractéristiques mécaniques.

En terme de module d'Young (Figure 33), on obtient, là aussi, des valeurs sensiblement plus faibles pour la teneur en eau la plus élevée. Dans ce dernier cas, le module ne semble pas dépendre de manière significative du point à partir duquel on mesure ce module (séquence de décharge-recharge).

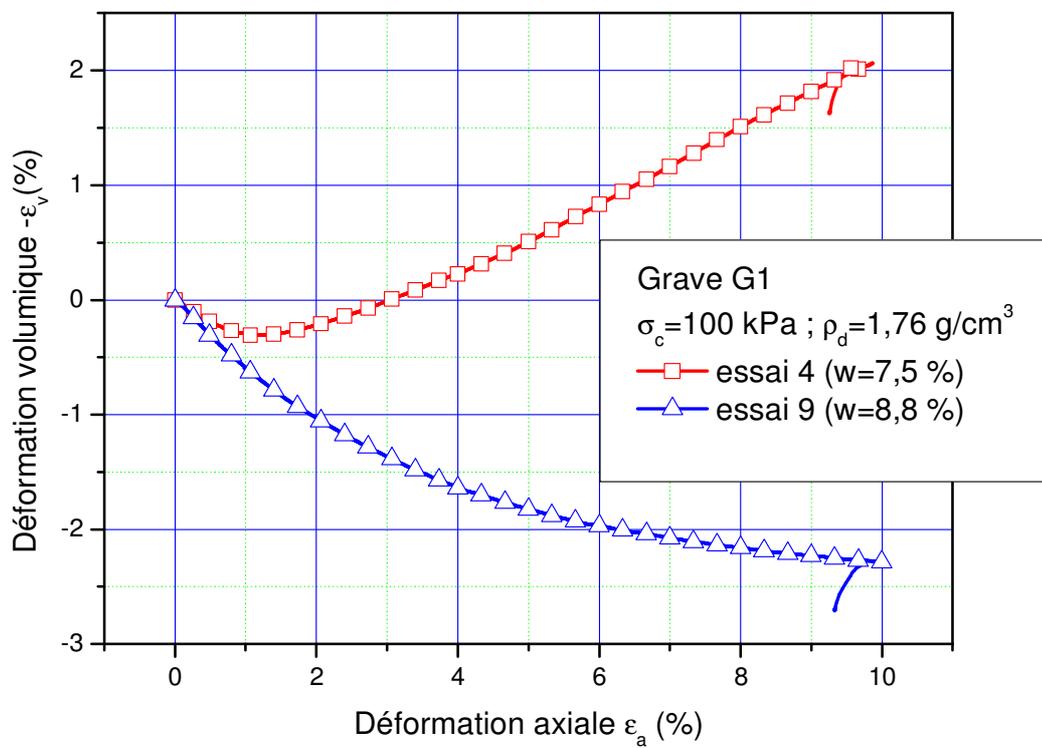
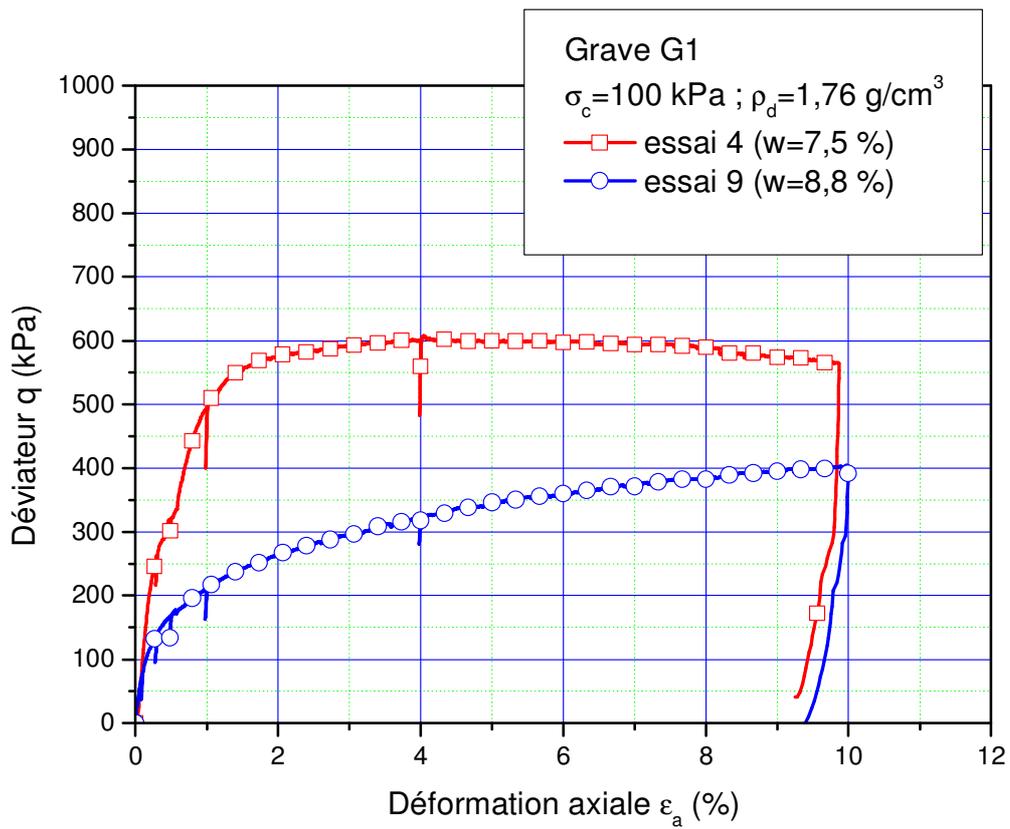


Figure 32 – Influence de la teneur en eau sur les caractéristiques mécaniques de la grave

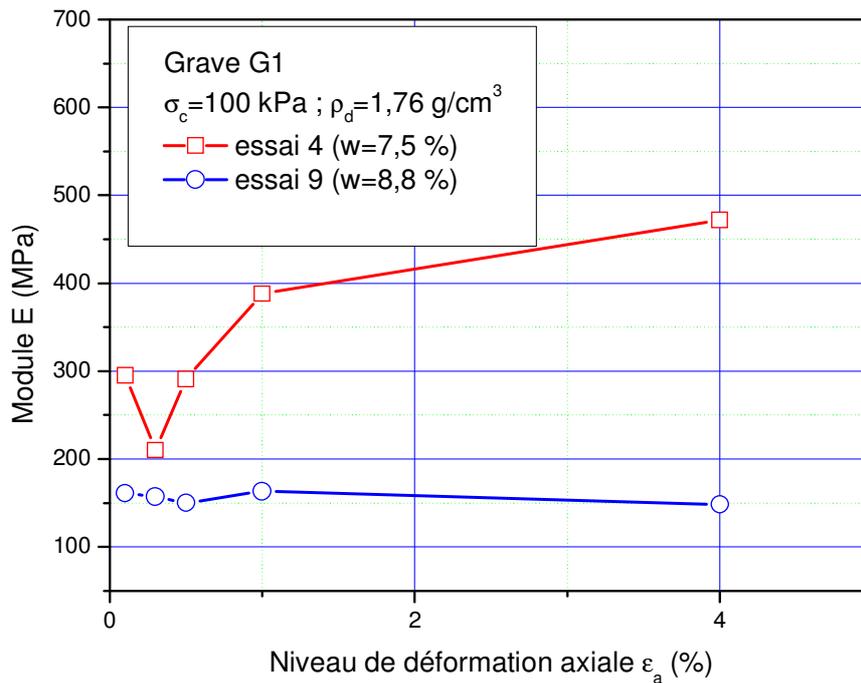


Figure 33 – Synthèse de l'évolution du module d'Young au cours des essais triaxiaux

### III.5 Essais avec mesure locale des déformations

#### III.5.1 Eléments de procédure spécifique

Dans le cas des essais avec mesure locale des déformations (essais 10 et 11), on place sur l'éprouvette deux lames verticales (Figure 34 a) et trois anneaux radiaux. (Figure 34 b).

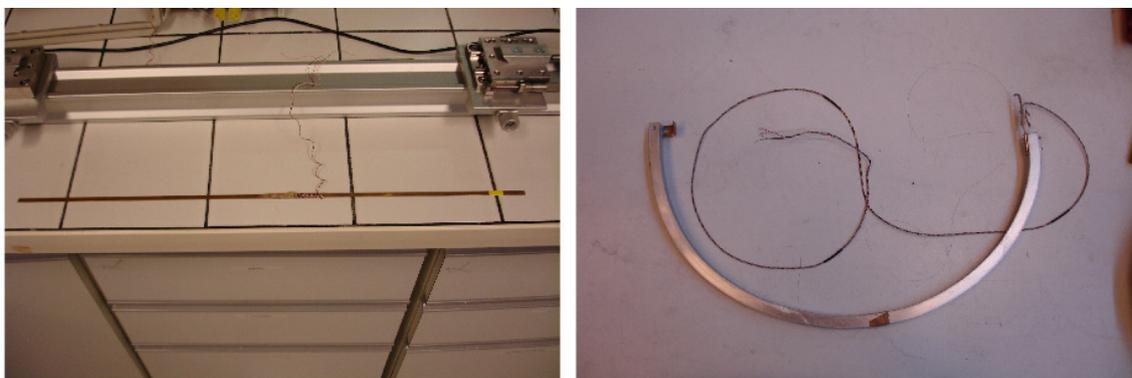


Figure 34 – Système de mesure locale des déformations : a) mesure axiale ; b) mesure radiale





Figure 36 – Vues du dispositif de mesure locale des déformations installé sur une éprouvette (essai 10)

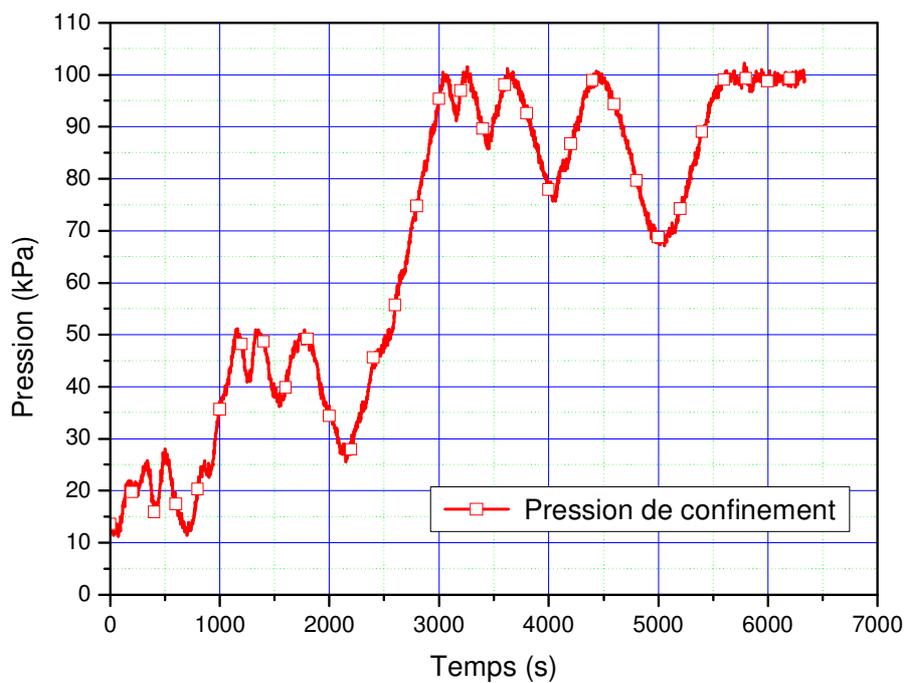


Figure 37 – Variation de la pression de confinement lors d'un essai de compression isotrope

A partir des mesures on obtient :

-  $\varepsilon_1 = -\Delta L/L_0$  ( $\varepsilon_1 > 0$ , si  $\Delta L < 0$ ). On prend la moyenne des deux mesures.  $L_0$  est la distance initiale entre les deux points d'ancrage des lames axiales (Figure 35), et  $\Delta L$  est la variation de longueur mesurée à partir des jauges de mesure des lames. Les valeurs du déplacement sont déduites des courbes d'étalonnage réalisées au préalable.

-  $\varepsilon_3 = -\Delta D/D_0$  ( $\varepsilon_3 > 0$ , si  $\Delta D < 0$ ). On prend la moyenne des trois mesures.  $D_0$  est le diamètre initial de l'éprouvette, et  $\Delta D$  est la variation du diamètre mesurée à partir des jauges de mesure des anneaux. Comme pour les lames, les jauges ont été étalonnées.

On déduit de ces deux mesure la déformation volumique de l'éprouvette :  $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ .

Lors des essais de compression isotrope, on déduit le module de compression  $K (= \Delta p_{conf} / \Delta \varepsilon_v$  sur un cycle de décharge-recharge), et lors d'un essai de cisaillement le module d'Young  $E (= \Delta q / \Delta \varepsilon_1$  sur un cycle de décharge-recharge).

On présente tout d'abord les résultats des essais de compression isotrope, puis ceux des essais de cisaillement.

### *III.5.2 Synthèse des essais de compression isotrope*

Deux essais de compression isotrope ont été réalisés : essais 10 et 11. La Figure 38 présente les résultats obtenus pour l'essai 10. Deux capteurs locaux n'ont pas fonctionné correctement pour cet essai (un axial et un radial). Ce problème a ensuite été résolu pour l'essai 11 (voir ci-après). Les déformations axiale et radiale ont été calculées à partir des mesures disponibles. On observe que, lors des phases d'augmentation de la pression de confinement, on obtient un accroissement des déformations axiale et radiale (diminution de volume) et inversement.

Grave silico-calcaire  
 Compression isotrope  
 Essai 10 -  $w=7,4\%$  -  $\rho_d=1,76\text{ g/cm}_3$

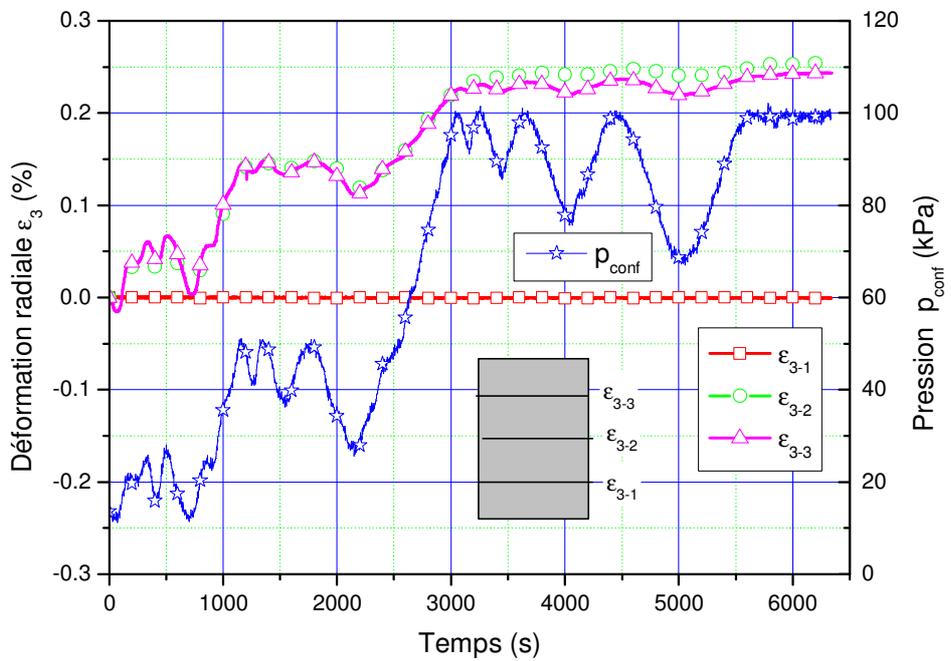
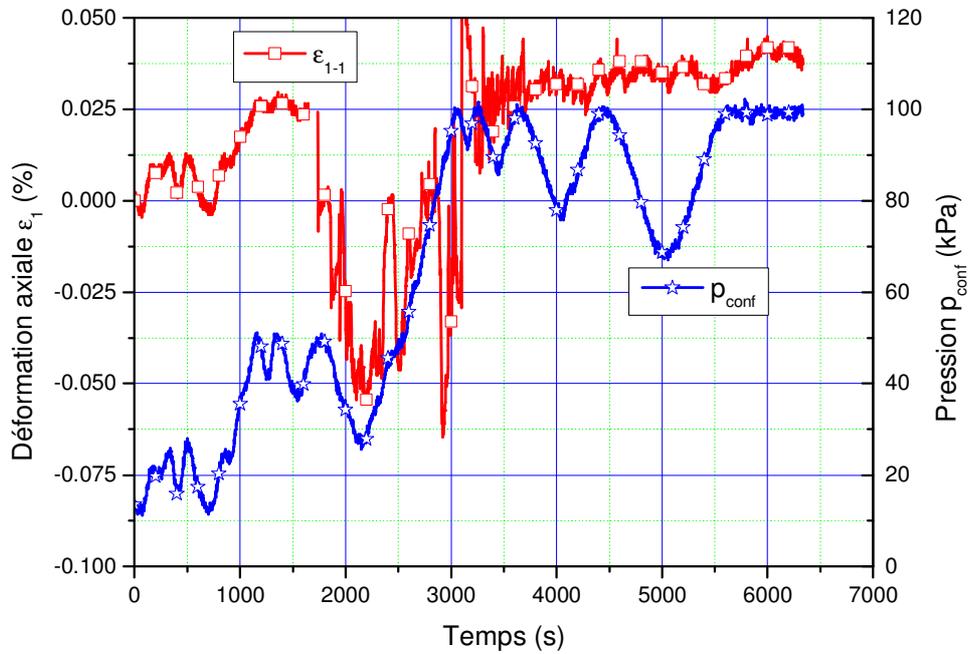


Figure 38 – Résultats de l'essai 10 (compression isotrope)

La Figure 39 présente les résultats obtenus en termes des déformations axiale, radiale et volumique.

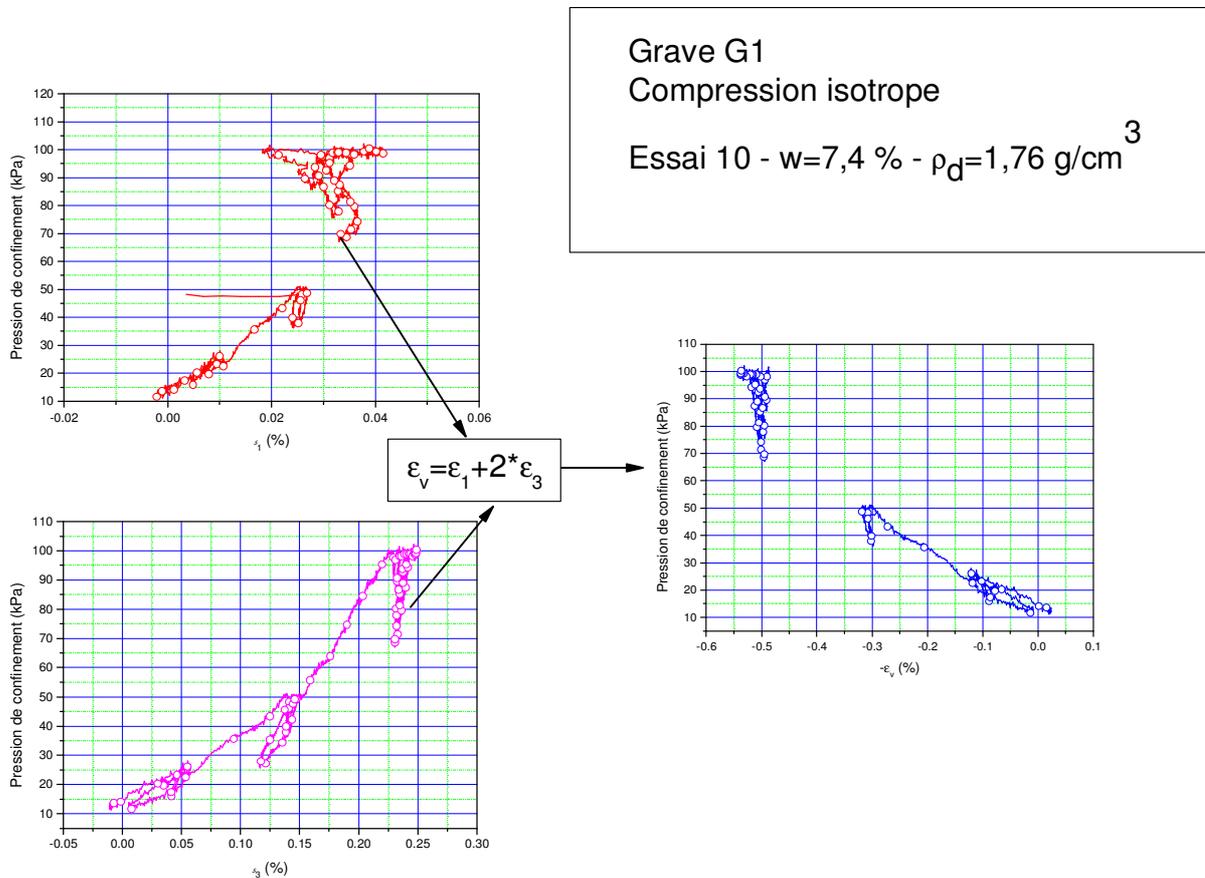


Figure 39 – Résultats de l'essai 10 (compression isotrope) : courbes  $(p_{\text{conf}}, \varepsilon_1)$ ,  $(p_{\text{conf}}, \varepsilon_3)$  et  $(p_{\text{conf}}, -\varepsilon_v)$

Comme signalé plus haut, suite aux problèmes de mesure sur deux capteurs lors de l'essai 10, on a répété cet essai. La Figure 40 et la Figure 41 présentent les résultats obtenus pour l'essai 11. On observe cette fois que tous les capteurs locaux ont fonctionné, et que les mesures sont parfaitement cohérentes entre elles. En effet, les évolutions des capteurs axiaux (ou radiaux) suivent bien les mêmes variations en fonction de la variation de la pression de confinement :  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_3$  augmentent avec l'accroissement de la pression de confinement et inversement.

Grave G1  
 Compression isotrope  
 Essai 11 -  $w=7,5\%$  -  $\rho_d=1,76\text{ g/cm}_3$

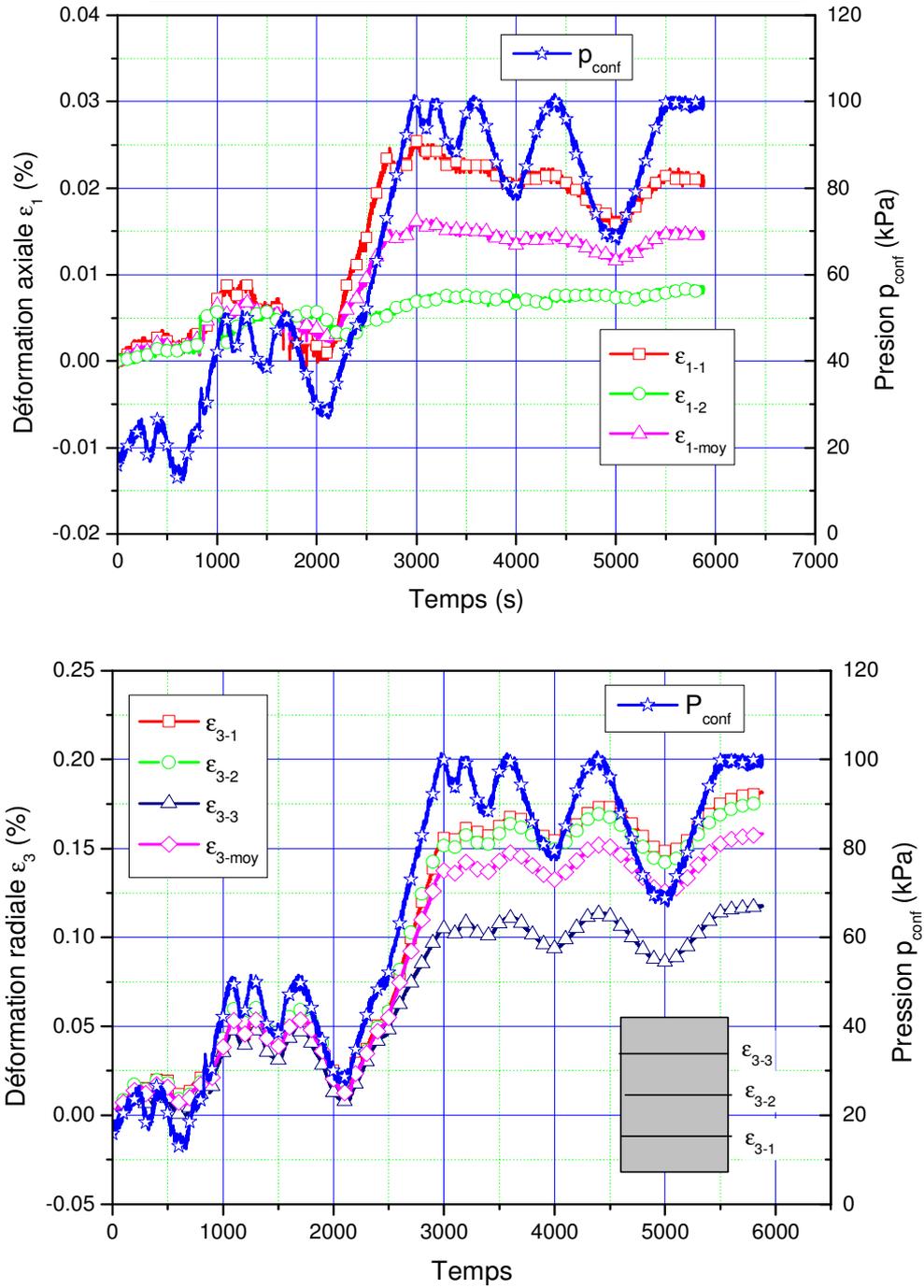
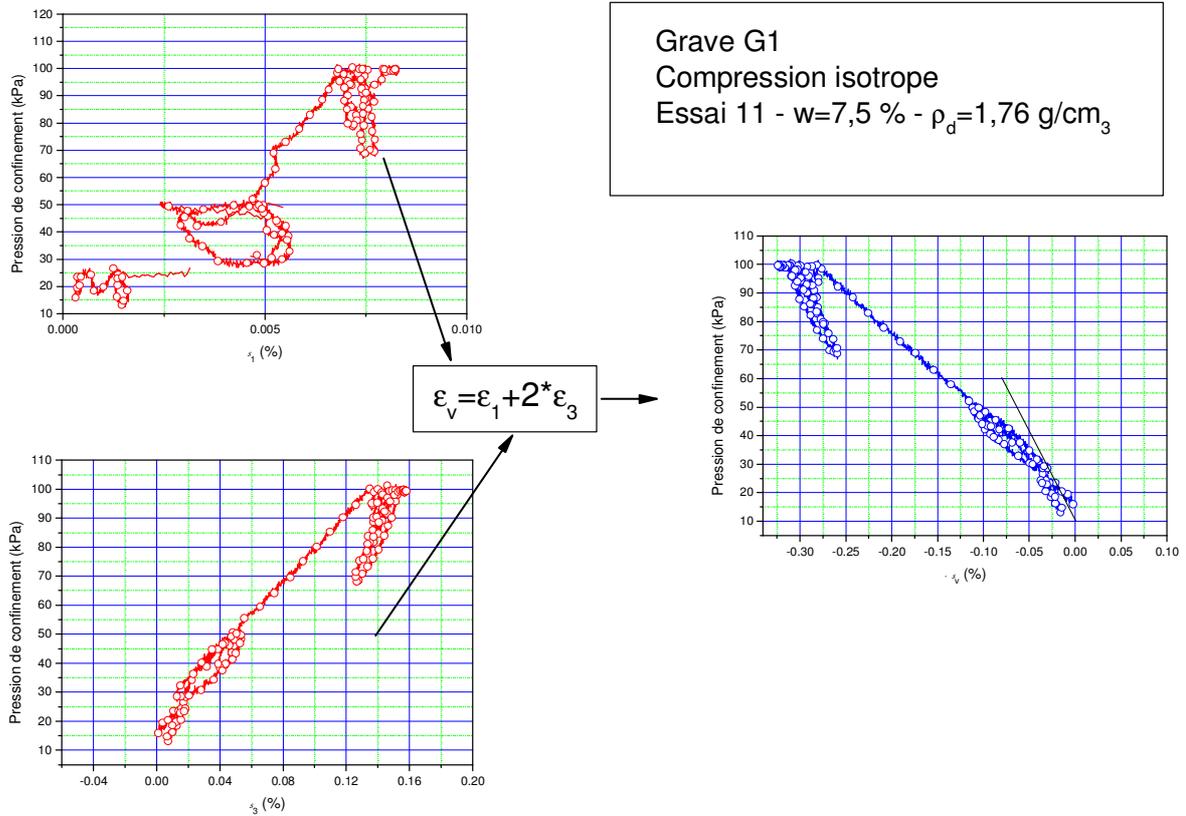


Figure 40 – Résultats de l'essai 10 (compression isotrope)



Grave G1  
 Compression isotrope  
 Essai 11 - w=7,5 % -  $\rho_d=1,76 \text{ g/cm}_3$

Figure 41 – Résultats de l’essai 10 (compression isotrope) : courbes  $(p_{\text{conf}}, \varepsilon_1)$ ,  $(p_{\text{conf}}, \varepsilon_3)$  et  $(p_{\text{conf}}, -\varepsilon_v)$

A partir des mesures de  $\varepsilon_v$  et  $p_{\text{conf}}$ , on déduit le module de compression isotrope (Figure 42). Comme on pouvait s’y attendre, on observe des différences entre les deux essais, mais ceci est dû aux problèmes de mesure sur l’essai 10.

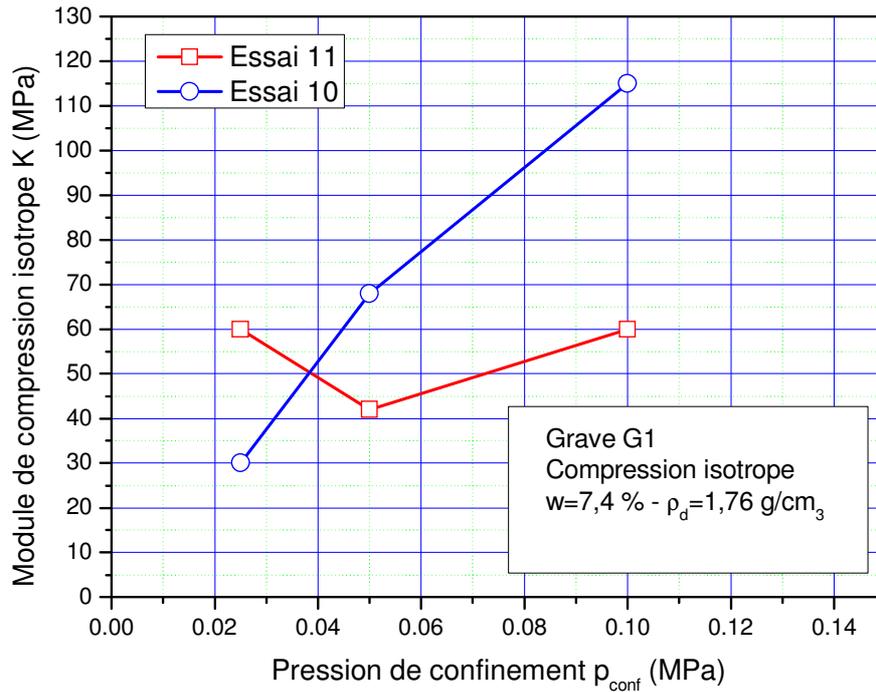
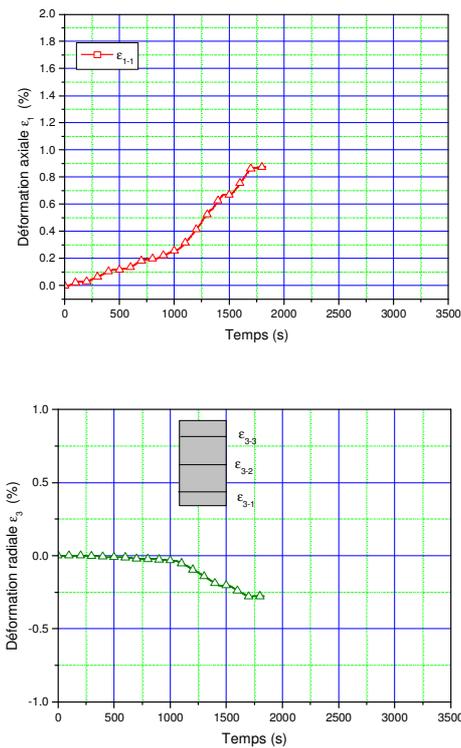


Figure 42 – Evolution du module de compression isotrope K avec la pression de confinement

### III.5.3 Synthèse des essais de cisaillement

Après la phase de compression isotrope, on réalise un essai de cisaillement avec les mêmes caractéristiques que ceux présentés dans la partie III.3 (vitesse de cisaillement et phases de décharge-recharge). Cependant, l'essai est arrêté après 1% de déformation axiale car on atteint la limite de mesure des capteurs locaux.

La Figure 43 et la Figure 44 présente la synthèse des résultats obtenus pour les deux essais.



Grave G1  
 Essai triaxial 300 mm  
 Essai 10 - w=7,4 % -  $\rho_d=1,76 \text{ g/cm}_3$

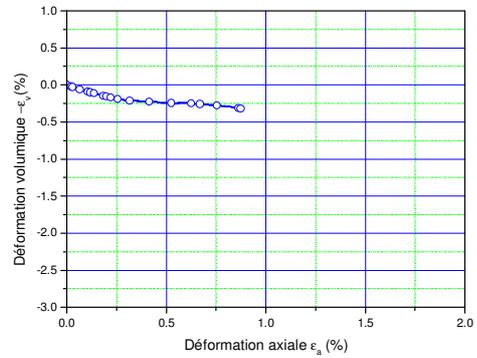
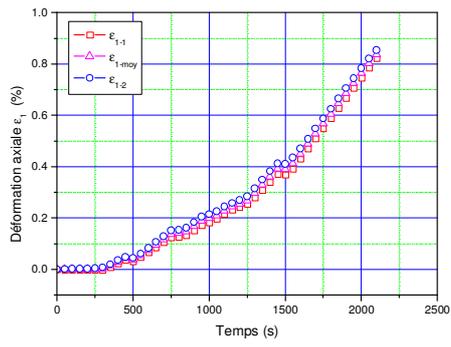


Figure 43 – Résultats de l’essai 10 (phase de cisaillement) : courbes ( $p_{\text{conf}}$ , temps), ( $p_{\text{conf}}$ , temps) et  $(-\varepsilon_v, \text{ temps})$

### III.5.4 Comparaison entre mesures globales et mesures locales (phases de cisaillement)

La Figure 45 présente une comparaison des résultats obtenus pour les deux essais en termes de mesures globales et locales. On met en évidence un résultat relativement classique, à savoir que les mesures locales, plus réalistes que les mesures globales pour ce qui est des petites déformations, permettent d’identifier une réponse plus rigide du matériau, plus proche de la réalité.



Grave G1  
 Triaxial 300 mm  
 Essai 11 -  $w=7,4\%$  -  $\rho_d=1,76\text{ g/cm}_3$

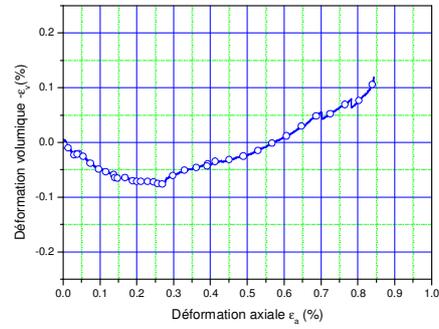
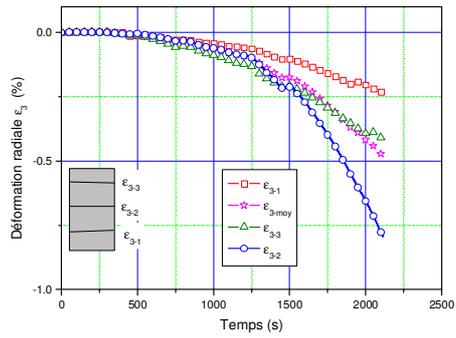


Figure 44 – Résultats de l'essai 11 (phase de cisaillement) : courbes ( $\rho_{conf}$ , temps), ( $\rho_{conf}$ , temps) et  $(-\varepsilon_v, \text{ temps})$

Grave G1  
 Triaxial 300 mm  
 $w=7,4\%$  -  $\rho_d=1,76\text{ g/cm}_3$

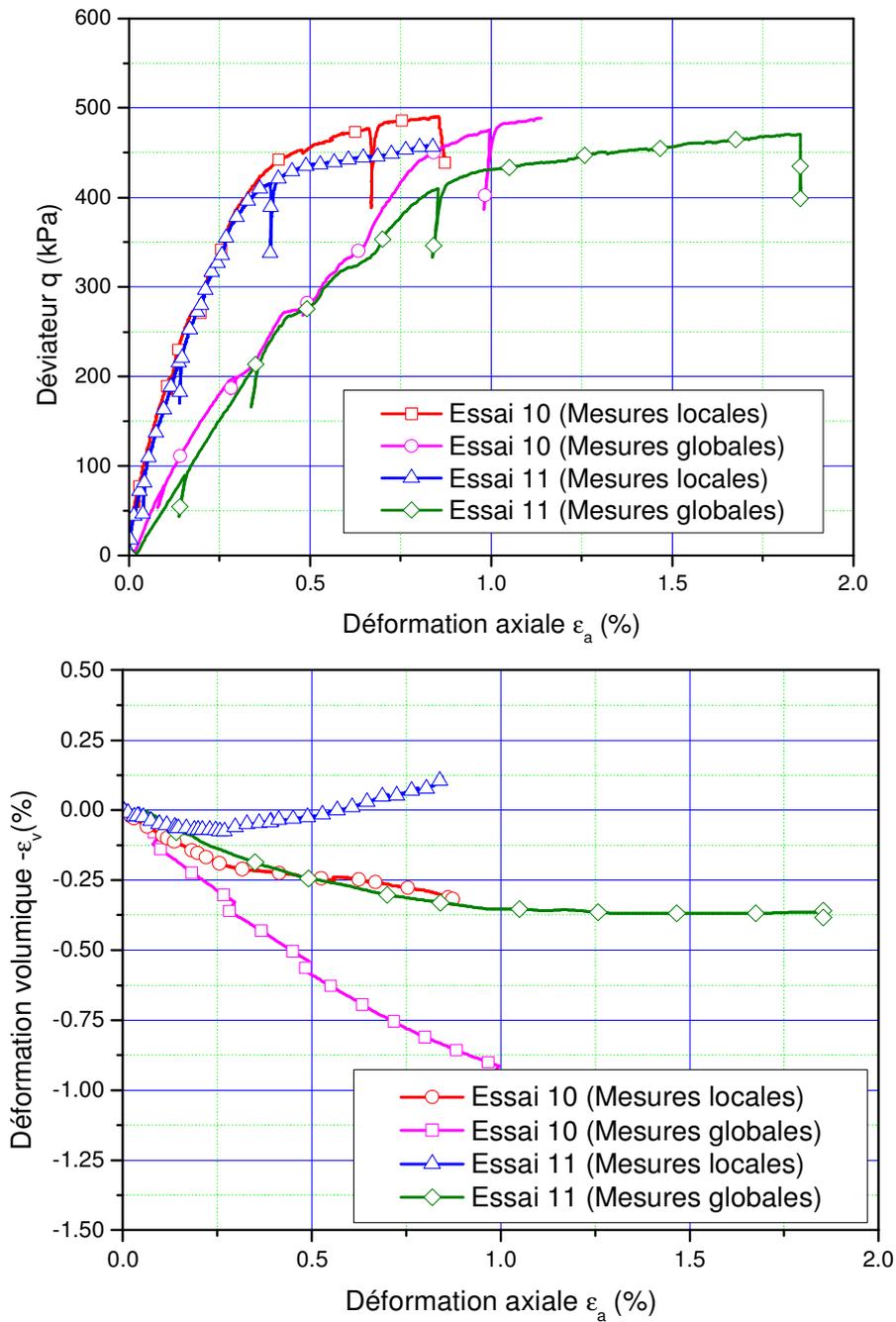


Figure 45 – Résultats des essais 10 et 11 (phases de cisaillement) : courbes ( $q, \epsilon_1$ ) et ( $\epsilon_v, \epsilon_1$ )

En termes de module d'Young (Figure 46), on obtient des modules significativement plus élevés à partir des mesures locales de la déformation axiale.

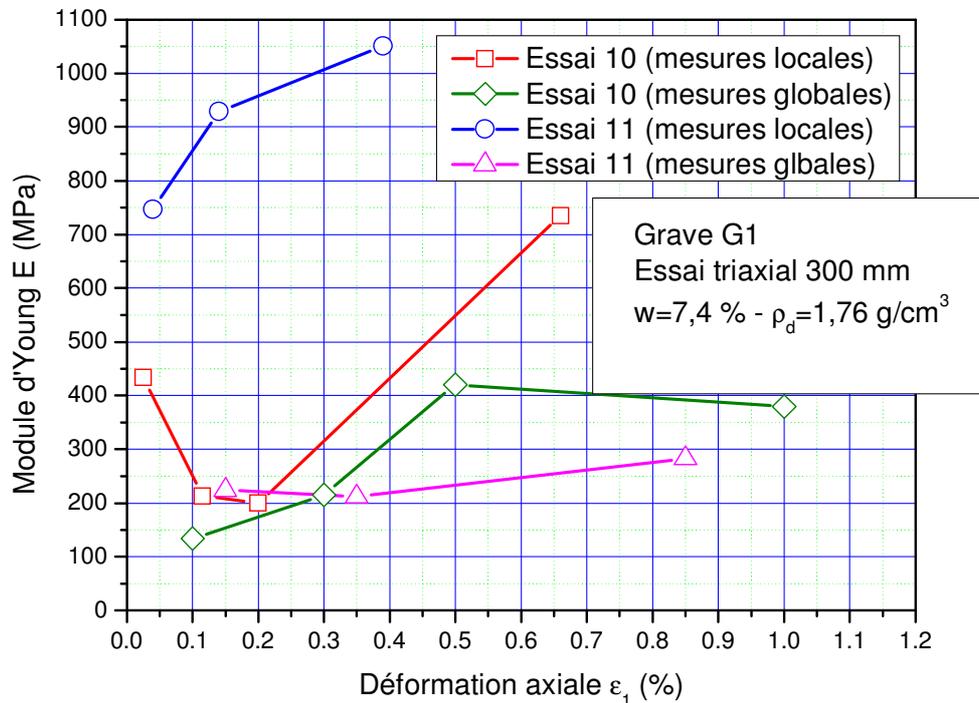


Figure 46 – Résultats des essais 10 et 11 (cisaillement) : modules d'Young E

## CONCLUSIONS

Les travaux prévus au CERMES dans le cadre de la tranche 1 du Projet National ASIRI ont permis de fournir différents éléments de caractérisation physico-chimique de la grave retenue pour le site de St-Ouen-l'Aumône (appelée grave G1), ainsi que de réaliser un programme d'essais à l'appareil triaxial de grand diamètre à partir de deux états de compacité initiale du matériau (95% et 85% de l'optimum Proctor). En ce qui concerne les essais mécaniques, on a tout d'abord vérifié la bonne répétabilité de la procédure expérimentale. Puis, pour chaque compacité, on a réalisé trois essais de cisaillement à trois contraintes de confinement différentes (25, 50 et 100 kPa). Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer des caractéristiques mesurées en petites déformations (module d'Young E) et les caractéristiques de rupture de la grave ( $c'$ ,  $\phi'$ ). En ce qui concerne les paramètres de rupture, seule la cohésion semble être affectée de manière significative par l'état initial du sol (l'angle de frottement interne évoluant peu). Le module d'Young du sol est

une fonction croissante du niveau de déformation à partir duquel il est mesuré, ainsi que de la compacité du sol.

Finalement, on a réalisé deux essais avec mesure locale des déformations, comprenant une première phase de compression isotrope suivi d'une phase de cisaillement classique. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer le module de compressibilité en fonction de la pression de confinement et le module d'Young en fonction du niveau de déformation à partir duquel il est mesuré. Les résultats obtenus à partir des mesures locales permettent de mettre en évidence une augmentation significative de la rigidité initiale du matériau (accroissement du module d'Young) par rapport aux mesures globales.