

Comportement d'un limon compacté

■ RÉSUMÉ

Un programme d'essais a été réalisé en laboratoire sur un limon compacté pour mesurer les propriétés mécaniques du matériau en fonction de son état de compactage, puis examiner la sensibilité de ses déformations aux variations de teneur en eau. Le programme d'essais repose sur un plan d'expérience de neuf points d'état, définis par rapport aux caractéristiques Proctor du limon. En chacun de ces points d'état, différents types d'essais ont été effectués : essais triaxiaux, essais œdométriques de sensibilité en parallèle, essais de retrait en continu. Le programme expérimental est complété par des essais réalisés sur le limon saturé. Les courbes de compactage semi-statique ont été enregistrées pour chacune des éprouvettes, en considérant que ce mode de densification constitue l'histoire du sol au laboratoire. Les paramètres représentatifs de chaque type d'essais sont déduits des courbes expérimentales. Les essais mettent en évidence l'influence des caractéristiques d'état sur les propriétés mécaniques du limon compacté, puis sa sensibilité aux variations de teneur en eau.

Behaviour of a compacted silt

■ ABSTRACT

A laboratory test programme on compacted silt samples was carried out in order to measure their mechanical properties for various compaction states, then assess the sensitivity of their deformations to water content variations. The test programme relies on an experiment design based on nine state points, referred to the Proctor characteristics of the silt. At each of these state points, various tests were performed: triaxial tests, parallel expansion tests in oedometers, continuous shrinkage tests. The experimental programme was complemented by tests on saturated silt samples. The semi-static compaction process in oedometers was monitored, considering that this densification mode serves as the laboratory soil history. Representative parameter values were obtained from the experimental curves. The tests highlight the influence of state parameters on the mechanical properties of the compacted silt and their sensitivity to water content variations.

1. INTRODUCTION

Des essais de laboratoire ont été réalisés sur un limon compacté (limon de Goderville) en vue de déterminer l'influence de l'état de compactage sur les propriétés mécaniques du matériau, puis d'examiner l'effet des variations de teneur en eau en termes de déformations. Ce travail s'inscrit dans un cadre général visant à optimiser l'emploi des sols fins dans les remblais routiers et ferroviaires (Ferber, 2006). Parmi les questions posées, figurent notamment celles des déformations causées par les variations d'état hydrique dans les sols compactés. Une partie des réponses à ces questions se trouve dans l'étude du comportement mécanique des sols fins compactés.

Le programme expérimental présenté ici s'inscrit donc dans une démarche de recueil de paramètres mécaniques au laboratoire, à l'aide d'essais œdométriques et d'essais triaxiaux. Le programme d'essais réalisé sur le limon de Goderville est basé sur un plan d'expérience qui compte neuf points d'état, définis par rapport aux caractéristiques Proctor du limon. En chacun de ces points d'état,

différents types d'essais ont été effectués : essais triaxiaux, essais œdométriques de sensibilité en parallèle, essais de retrait en continu. Les éprouvettes compactées sont préparées au moyen d'une procédure d'humidification sans malaxage et de compactage semi-statique (Camapum de Carvalho et al., 1987). Le programme expérimental est complété par des essais réalisés sur le limon saturé (essais de compressibilité œdométrique et essai de retrait). Les courbes de compactage semi-statique ont été systématiquement enregistrées pour chacune des éprouvettes, en considérant que ce mode de densification constitue l'histoire du sol au laboratoire. Les paramètres représentatifs de chaque type d'essais sont déduits des courbes expérimentales.

Les essais triaxiaux réalisés sur des sols compactés montrent que leurs propriétés mécaniques (modules de déformation, coefficient de Poisson, résistance) dépendent directement des caractéristiques d'état du sol compacté, représentées par le couple « teneur en eau, indice des vides ». Globalement, les performances mécaniques du sol compacté augmentent avec sa densité. Dans ce sens, les résultats obtenus sur le limon de Goderville compacté confirment les nombreux résultats déjà publiés dans la littérature et complètent des résultats antérieurs obtenus sur une argile (Serratrice, 1995a) et une craie (Serratrice, 1995b).

L'effet des variations de teneur en eau sur les déformations des sols compactés dépend de la nature du sol, de son état initial et du niveau de chargement. Suivant l'état de compactage du sol (teneur en eau, densité) et le niveau de chargement, l'imbibition provoque un effondrement ou un gonflement, qui résultent pour l'essentiel de la modification de l'état de succion (Delage et Fry, 2000) et de la présence d'une fraction argileuse. L'imbibition a aussi pour effet d'augmenter la déformabilité du sol compacté et de diminuer sa résistance, du fait de la réduction de la succion.

La procédure d'essai développée au LRPC de Toulouse (Mieussens, 1993) et destinée à qualifier la sensibilité des matériaux compactés aux variations d'état hydrique a été mise en œuvre sur le limon de Goderville. Cette méthode d'essai de sensibilité se pratique à l'aide d'œdomètres et s'inspire des méthodes d'essais de gonflement en parallèle, où plusieurs éprouvettes identiques, chargées sous différents niveaux de contraintes, sont soumises simultanément à une imbibition. Cette méthode constitue l'une des nombreuses méthodes d'essais de gonflement (Serratrice et Soyez, 1996). Même si l'interprétation des essais s'effectue en contraintes totales, les indices comportementaux qui s'en déduisent, en termes de déformations ou d'énergies, permettent de distinguer facilement les sols compactés selon leur nature et leur état.

Le retrait constitue un autre aspect de la sensibilité des sols fins aux variations d'état hydrique. Au laboratoire, les essais se pratiquent sur les sols dans leur état naturel ou compacté, ou sur des sols déstructurés. L'amplitude des déformations de retrait et la limite de retrait dépendent de l'état initial du sol, comme le montrent les essais réalisés dans le cadre de ce programme expérimental sur le limon de Goderville.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL, COMPACTAGE DU LIMON, COMPRESSIBILITÉ DU LIMON SATURÉ

■ 2.1. Programme expérimental

Le programme d'essais en laboratoire est basé sur un plan d'expérience qui compte neuf points d'état, définis par rapport à l'optimum Proctor normal (OPN) du limon. La teneur en eau et la masse volumique sèche de cet optimum sont : $w_{OPN} = 17 \%$ et $\rho_{d,OPN} = 1,71 \text{ g/cm}^3$. Les points du plan d'expérience sont répartis dans le plan d'état (w, ρ_d), comme indiqué dans le [tableau 1](#), où w est la teneur en eau massique et ρ_d la masse volumique sèche.

En chacun de ces points d'état, différents types d'essais ont été effectués : essais œdométriques de sensibilité en parallèle (six éprouvettes par essai), essais de retrait en continu (une éprouvette par essai), essais triaxiaux (trois éprouvettes par essai). Le programme expérimental est complété

tableau 1
Points d'état visés dans le plan d'expérience.

	sec	moyen	humide
OPN	w = 14 % $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$	w = 17 % $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$	w = 20 % $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$
92 % de l'OPN	w = 14 % $\rho_d = 1,57 \text{ g/cm}^3$	w = 17 % $\rho_d = 1,57 \text{ g/cm}^3$	w = 20 % $\rho_d = 1,57 \text{ g/cm}^3$
85 % de l'OPN	w = 14 % $\rho_d = 1,45 \text{ g/cm}^3$	w = 17 % $\rho_d = 1,45 \text{ g/cm}^3$	w = 20 % $\rho_d = 1,45 \text{ g/cm}^3$

par des essais réalisés sur le limon saturé (essais de compressibilité œdométrique et essai de retrait). Les propriétés géotechniques du limon de Goderville sont données dans le **tableau 2** (Ferber, 2006).

■ 2.2. Préparation et compactage du limon

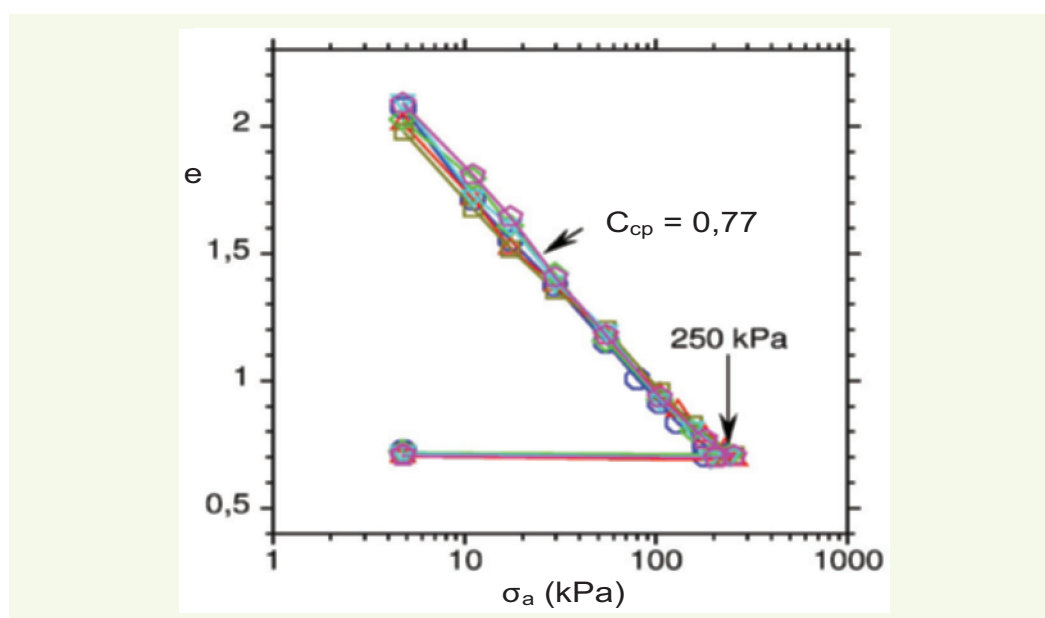
Le compactage des éprouvettes de limon est effectué par une méthode semi-statique. Le limon déstructuré et conditionné en sacs se trouve à une teneur en eau initiale comprise entre 5 et 6 %. En chacun des points d'état, il est humidifié préalablement par une méthode d'humidification sans malaxage. Pour cela, le sol est étalé sur une plaque et il est humidifié par vaporisation de la masse d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau visée, puis il est laissé dans cet état foisonné à l'intérieur d'un sac étanche pendant 48 heures avant de procéder au compactage des éprouvettes. Cette méthode permet de limiter la formation de mottes pendant la préparation du sol.

Les éprouvettes œdométriques sont compactées directement dans les cellules d'essai. Les éprouvettes triaxiales sont compactées entre deux pistons flottants dans des tubes de 50 mm de diamètre revêtus intérieurement par une membrane en latex graissée, de façon à limiter le frottement latéral (Camapum de Carvalho et al., 1987). Dans les deux cas, le limon est porté à la densité visée par un chargement continu au moyen d'une presse. Les courbes de compactage sont enregistrées pour chacune des éprouvettes, considérant que le compactage représente l'histoire mécanique du sol. La **figure 1** donne un exemple de courbes obtenues pendant le cycle de compactage semi-statique

tableau 2
Propriétés géotechniques
du limon de Goderville
(Ferber, 2006).

$C_{400\mu\text{m}}$ (%)	$C_{80\mu\text{m}}$ (%)	$C_{2\mu\text{m}}$ (%)	ρ_s (g/cm ³)	w_L (-)	w_P (-)	I_P (-)	V_{bs} (g/100g)	w_{OPN} (%)	$\rho_{d\text{ OPN}}$ (g/cm ³)
97	87	35	2,67	41	22	19	3,5	17	1,75

figure 1
Courbes de compactage
de six éprouvettes
œdométriques pour
atteindre le point d'état
w = 20 %, $\rho_d = 1,57 \text{ g/cm}^3$.



de six éprouvettes œdométriques (point d'état visé : 20 %, 1,57 g/cm³). Ces courbes sont représentées dans le plan (lg σ_a , e) où σ_a est la contrainte axiale et e l'indice des vides. En moyenne, pour les six éprouvettes, le coefficient de compressibilité déduit de la phase de densification vaut $C_{cp} = \Delta e / \Delta \lg(\sigma_a) = 0,77$, le coefficient de gonflement obtenu au déchargement vaut $C_{sp} = 0,016$, la contrainte maximale de compactage est $\sigma_{ap} = 250$ kPa et l'indice des vides correspondant $e_p = 0,71$.

Le **tableau 3** rassemble les propriétés moyennes de compactage des six éprouvettes oedométriques par point d'état (e_p , σ_{ap} , C_c , C_s).

La **figure 2** montre le plan d'état (w, e) où les points visés sont représentés par des disques rouges, les points d'état obtenus par des triangles bleus pour les éprouvettes œdométriques et des losanges verts pour les éprouvettes triaxiales. Le plan d'état (w, e) présente l'intérêt d'entrer en correspondance avec le plan (lg σ_a , e) où sont reportées les courbes de compressibilité iso-teneur en eau (Serratrice, 1995a ; Serratrice, 1995b). Le plan (w, e) est paramétré par les droites de saturation :

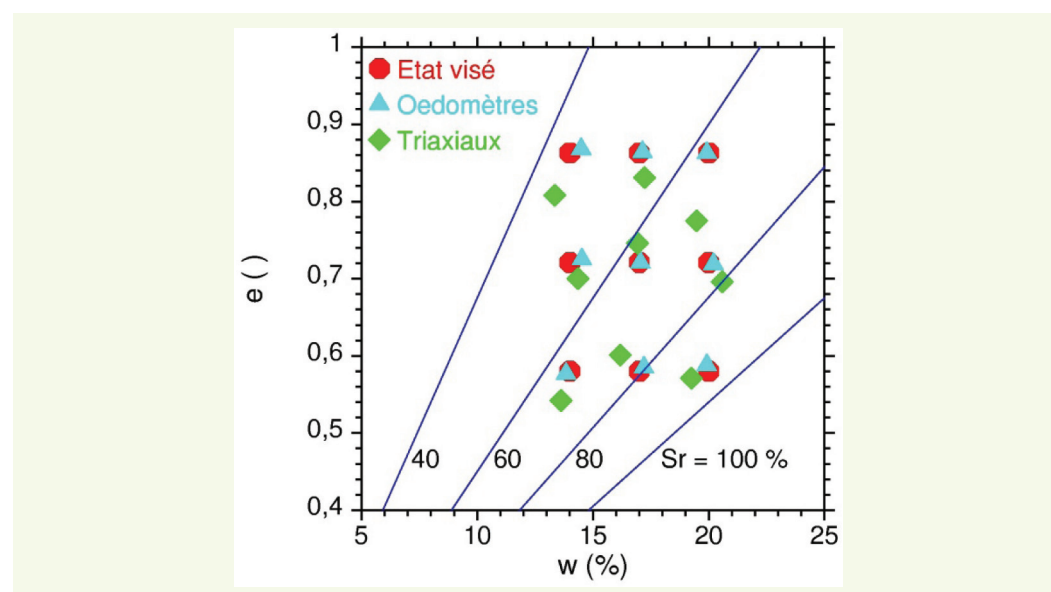
$$e = w \rho_s / S_r \rho_w$$

où S_r est le degré de saturation, ici compris entre 0,4 et 1 à un pas de 0,1, ρ_s la masse volumique des particules solides (**tableau 2**) et ρ_w la masse volumique de l'eau. Ces droites correspondent aux

tableau 3
Caractéristiques
de compactage
par point d'état.

Point d'état visé		Propriétés de compactage			
w (%)	ρ_d (g/cm ³)	e_p (-)	σ_{ap} (kPa)	C_c (-)	C_s (-)
14	1,45	0,86	320	0,73	0,011
17	1,45	0,85	220	0,88	0,012
20	1,45	0,85	130	0,90	0,010
14	1,57	0,71	575	0,64	0,010
17	1,57	0,71	400	0,71	0,012
20	1,57	0,69	250	0,77	0,016
14	1,71	0,55	1310	0,60	0,011
17	1,71	0,55	1060	0,60	0,008
20	1,71	0,55	520	0,64	0,014

figure 2
Comparaison des points
visés et des points obtenus
dans le plan d'état (w, e)
pour les éprouvettes
œdométriques et triaxiales.



hyperboles $\rho_d = S_r / (S_r / \rho_s + w / \rho_w)$ du plan (w, ρ_d) , qui est utilisé habituellement pour représenter les courbes de compactage. On constate que les écarts entre les points obtenus et les points visés sont plus grands pour les éprouvettes triaxiales (moyenne de trois éprouvettes par point), qui sont plus élancées que les éprouvettes œdométriques (moyenne de six éprouvettes par point).

Pendant le compactage semi-statique en condition œdométrique au laboratoire, la contrainte σ_{ap} représente la contrainte axiale nécessaire pour porter le sol à la densité visée. Elle est liée directement à l'énergie de compactage. En effet, en admettant que la courbe contrainte-déformation prend une allure exponentielle pendant la phase de densification (donc linéaire dans une représentation semi-logarithmique) et en admettant que les déformations élastiques sont quasi-nulles pendant le retour à contrainte nulle (déchargement), il y a effectivement proportionnalité entre σ_{ap} et l'énergie de déformation.

Les contraintes de compactage œdométrique obtenues en chacun des points du plan d'expérience sont reportées dans le plan d'état (w, e) de la **figure 3**, paramétré par des droites de saturation. Le plan d'état peut être paramétré aussi au moyen de la contrainte σ_{ap} (courbes vertes). Il apparaît ainsi que les courbes iso-contraintes de compactage et, plus généralement, les courbes iso-énergie de compactage, sont orientées comme les branches des courbes de compactage côté sec. La densification du sol s'effectue au prix d'une dépense d'énergie et les sols secs appellent une énergie plus forte pour être compactés. Le paramétrage du plan (w, e) par la contrainte de compactage peut être exprimé sous la forme d'une relation générale qui sera présentée plus loin.

■ 2.3. Compressibilité du limon saturé

Deux essais œdométriques ont été effectués en marge du programme expérimental afin d'obtenir les propriétés de compressibilité du limon saturé. Dans le premier essai, le limon est malaxé à une teneur en eau de 58 %, donc totalement déstructuré, puis il est mis en place dans une cellule œdométrique et chargé par paliers successifs de 48 heures et plus (un cycle de chargement-déchargement jusqu'à la contrainte maximale $\sigma_a = 820$ kPa). La courbe contrainte-déformation ($\lg \sigma_a, e$) ainsi obtenue est représentée sur la **figure 4**. La densification du limon saturé s'effectue en suivant la droite de compressibilité vierge dont la pente est $C_c = 0,26$ et l'ordonnée à l'origine ($\sigma_a = 1$ kPa) est $e_0 = 1,23$. Pendant le déchargement, le coefficient de gonflement est $C_s = 0,017$.

Dans le second essai, le limon est placé dans une cellule œdométrique et dans un état foisonné à sa teneur en eau naturelle ($w = 5,5$ %, $e = 1,25$). Le limon est chargé par paliers jusqu'à une contrainte

figure 3
Plan d'état (w, e)
paramétré en contrainte
axiale de compactage σ_{ap} .

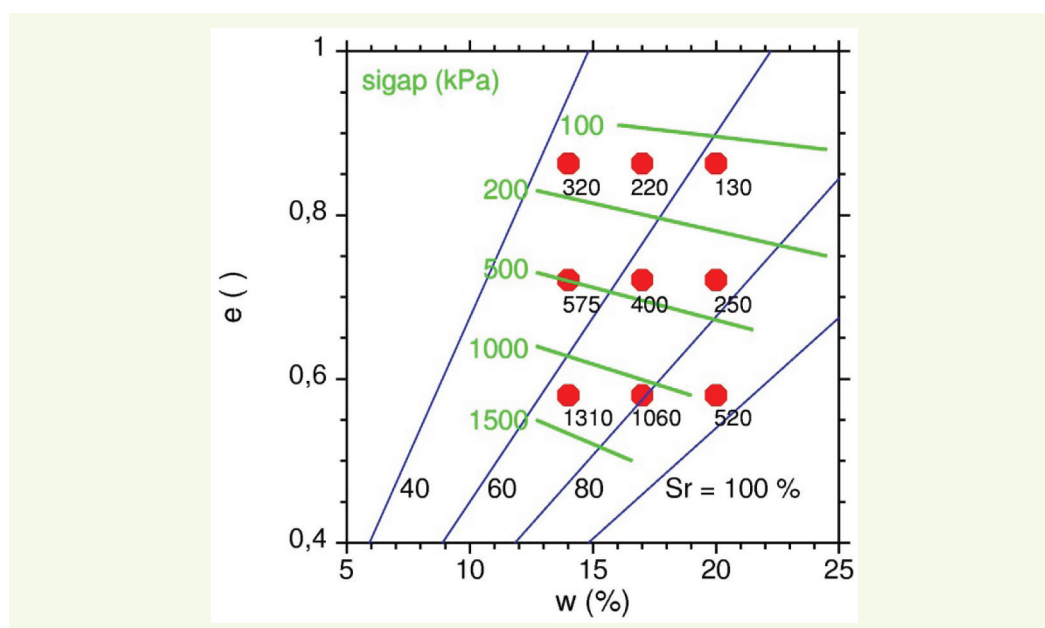
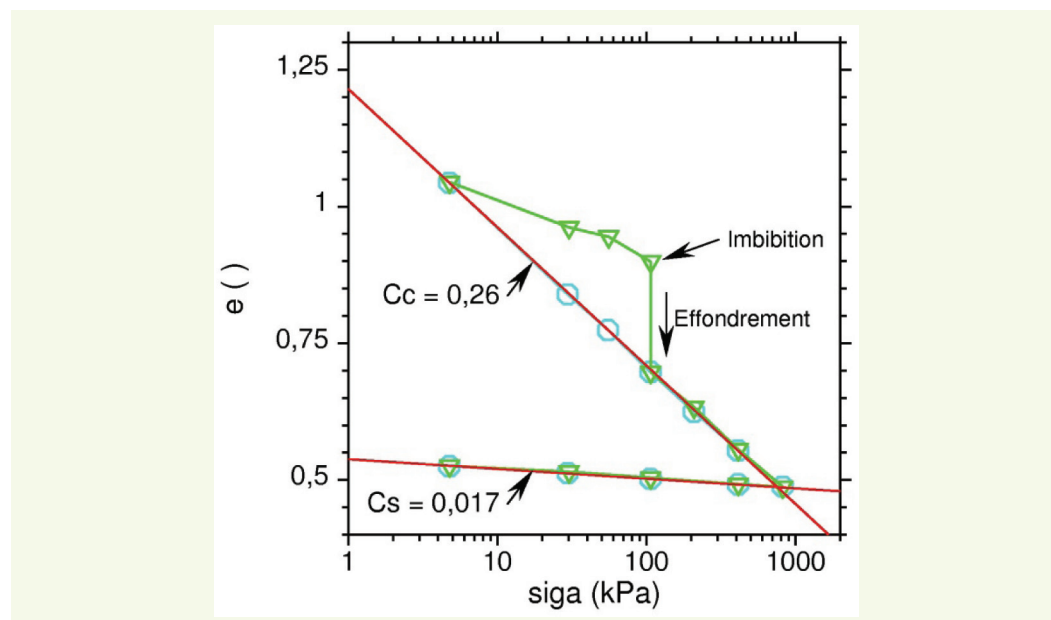


figure 4
 Courbes de compressibilité
 du limon initialement
 saturé et du limon
 initialement sec puis
 mis en imbibition sous
 100 kPa.



axiale égale à 100 kPa, sous laquelle il est mis en imbibition. L'imbibition provoque un effondrement qui a pour effet de porter le sol dans un état saturé sur la courbe de compressibilité vierge donnée par l'essai précédent. La suite du cycle de chargement-déchargement est alors identique à celle du limon initialement saturé.

La droite de compressibilité vierge $e = e_0 - C_c \lg \sigma_a$ du plan $(\lg \sigma_a, e)$ correspond à la droite de saturation $e = w \rho_s / \rho_w$ du plan d'état (w, e) . La mise en correspondance de ces deux plans facilite l'interprétation des essais de laboratoire effectués sur les sols compactés. La détermination des paramètres e_0 et C_c permet de préciser la position relative des points d'état du sol compacté, à l'état initial, puis à l'état final après imbibition.

3. ESSAIS TRIAXIAUX

Des essais triaxiaux ont été effectués en chacun des points d'état du plan d'expérience consacré au limon de Goderville.

■ 3.1. Procédure

Trois éprouvettes sont compactées au point d'état considéré. Après compactage, les éprouvettes sont montées dans des cellules triaxiales sur des plaques poreuses saturées en eau désaérée et dans une membrane en latex. La mise en saturation s'effectue sous une contre-pression $u_{cp} = 300$ kPa, puis le coefficient B de Skempton est mesuré ($B = \Delta u / \Delta p_T$ avec u pression interstitielle et p_T pression totale de confinement). Les consolidations isotropes sont effectuées sous des pressions effectives p_c égales à 100, 300 et 700 kPa ($p_c = p_T - u$). Le volume d'eau expulsé est enregistré au cours du temps jusqu'à stabilisation. On en déduit la déformation volumique de consolidation ε_{vc} , rapport entre la variation de volume ΔV_c et le volume initial V_0 de l'éprouvette. Le cisaillement est effectué en condition drainée (CD), à pression de confinement constante, à la vitesse constante $v = 0,0012$ mm/min, en compression, avec enregistrement de la déformation axiale, de l'effort axial et de la variation de volume (volume d'eau échangé).

Un exemple de résultats d'un essai triaxial CD est donné sur la **figure 5**, qui présente les trois courbes (ε_a, q) , (p, q) et $(\varepsilon_a, \varepsilon_v)$, où ε_a est la déformation axiale, ε_v la déformation de volume, p la contrainte effective moyenne $p = (\sigma_a' + 2\sigma_r')/3$, q le déviateur $q = \sigma_a' - \sigma_r'$, σ_a' la contrainte axiale effective et σ_r' la contrainte radiale effective (qui est constante). Le point d'état visé dans cet exemple est

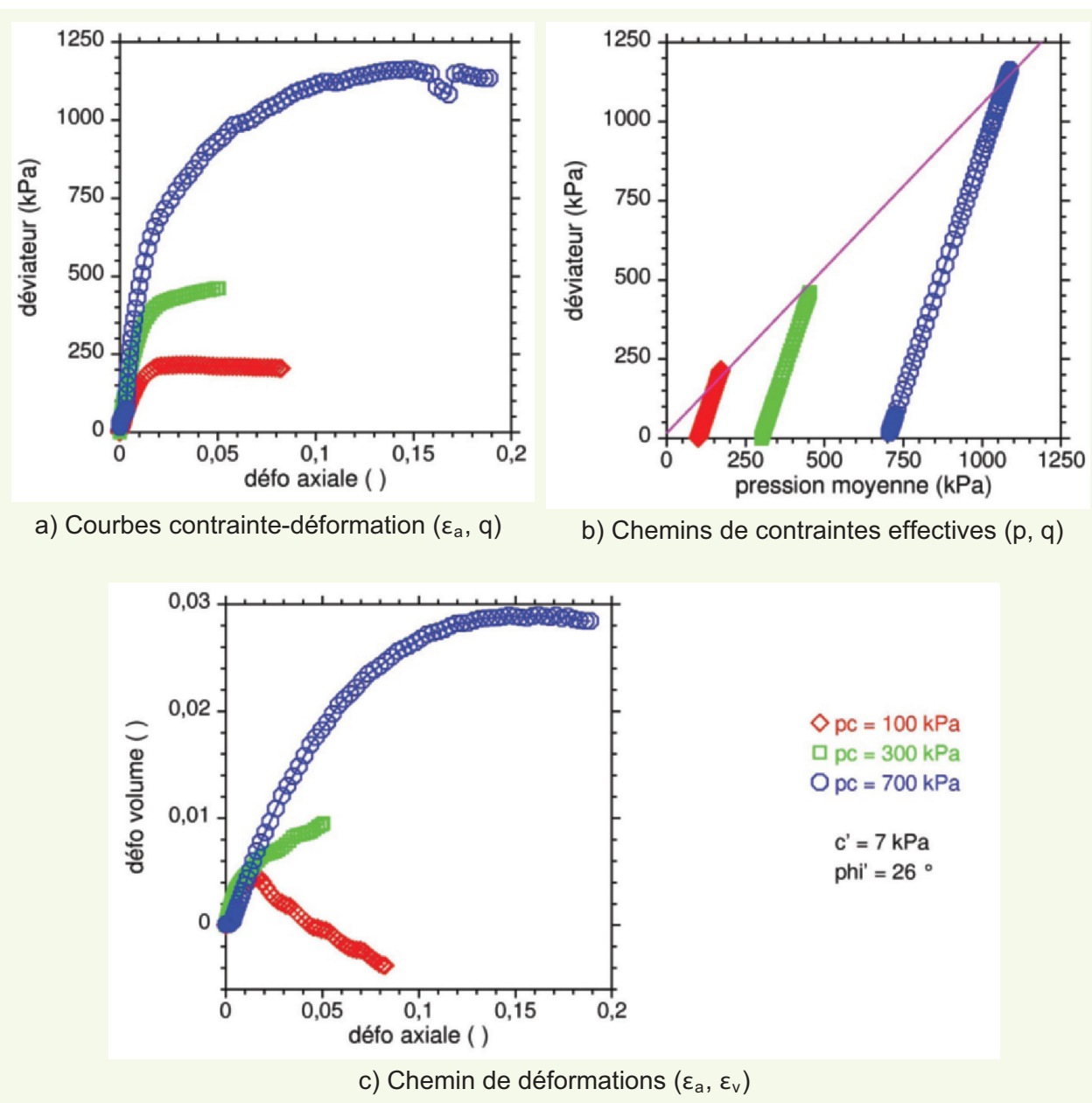


figure 5
 Courbes mesurées pendant
 un essai triaxial drainé au
 point d'état ($w = 17\%$,
 $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$).

$w = 17\%$ et $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$. À faible pression moyenne, les courbes contrainte-déformation (ϵ_a , q) montrent généralement des pics très peu marqués pour des déformations axiales inférieures à 2 % ou des paliers de résistance. À forte pression moyenne, les courbes (ϵ_a , q) montrent un écrouissage continu jusqu'à 15 % de déformation axiale et plus. À faible pression, le limon compacté à l'OPN est dilatant. Il est continûment contractant à forte pression. Les limons compactés à des densités plus faibles que l'OPN sont toujours contractants. La consolidation sous les fortes pressions produit une densification supplémentaire du limon, au-delà du compactage préalable.

■ 3.2. Exploitation des essais triaxiaux

Les coefficients B mesurés sont systématiquement inférieurs à l'unité. Il ne paraît donc pas possible de saturer le limon compacté sous contre-pression dans un délai raisonnable. Le report des coefficients B dans le plan d'état (w , e) montre que les droites de saturation coïncident approximativement avec les droites d'égale valeur de B. La correspondance suivante s'établit entre S_r et B pour le limon : ($S_r = 0,9$; $B = 0,9$), ($S_r = 0,7$; $B = 0,8$) et ($S_r = 0,5$; $B = 0,7$).

Le module d'Young tangent E est déterminé au début des courbes contrainte-déformation (ϵ_a , q) pour un niveau de déformation inférieur à 0,005 (0,5 %). Le module E augmente avec la racine carrée de la pression effective de consolidation p_c . L'encadrement suivant représente cette évolution (p_c en kPa et E en MPa) :

$$2,47\sqrt{p_c} < E < 5,31\sqrt{p_c} + 12.$$

La **figure 6a** montre que, dans le plan d'état (w , e), les modules d'Young augmentent avec le degré de compactage du sol. Les pentes des droites d'égale valeur des modules, qui sont représentées sur le graphique, sont proches de celles des branches des droites de compactage côté sec. Le coefficient de Poisson ν est obtenu à partir de la pente μ du chemin des déformations (ϵ_a , ϵ_v) mesurée au début du cisaillement [$\nu = (1 - \mu)/2$]. Les valeurs de ν sont comprises entre 0,15 et 0,21, avec une majorité de valeurs autour de 0,19.

Le plan des contraintes effectives (p , q) sert à déterminer la droite de Coulomb à la rupture pour chacun des points d'état du plan d'expérience (c' cohésion, ϕ' angle de frottement interne). À forte pression, la résistance du limon est caractérisée par un angle de frottement interne $\phi' = 26$ degrés et une cohésion nulle $c' = 0$. Le report des états de contrainte à la rupture dans le plan (p_c , η), où η est le rapport des contraintes effectives de cisaillement ($\eta = q/p$), permet de montrer l'existence d'une cohésion non nulle à faible pression moyenne. La cohésion dépend du degré de compactage du limon. Le plan d'état (w , e) peut être paramétré en termes de résistance, comme indiqué sur la **figure 6b**. Ces paramètres de résistance se rangent aussi suivant les branches des courbes de compactage côté sec.

Ainsi, les essais triaxiaux réalisés sur le limon compacté permettent de retrouver des tendances déjà observées sur d'autres matériaux compactés. Les propriétés mécaniques du limon, telles que le module d'Young E ou la résistance, exprimée par la cohésion c' , s'organisent autour des droites de compactage du côté sec dans le plan d'état (w , e). Les propriétés mécaniques C_m (E ou c') sont reliées aux caractéristiques d'état w et e par une expression de la forme générale suivante :

$$L(C_m) = a_0 + b_1 w + b_2 e$$

où L est une fonction linéaire ou logarithmique et a_0 , b_1 et b_2 des paramètres à déterminer d'après les données expérimentales (Serratrice, 1995a ; Serratrice, 1995b). L'application de cette relation aux résultats des essais triaxiaux conduit aux paramètres rassemblés dans le **tableau 4**, ligne 3 pour le module d'Young E et ligne 4 pour la cohésion c' . Une relation du même type permet de décrire

figure 6
Propriétés mécaniques
du limon en fonction
de son état de compactage.

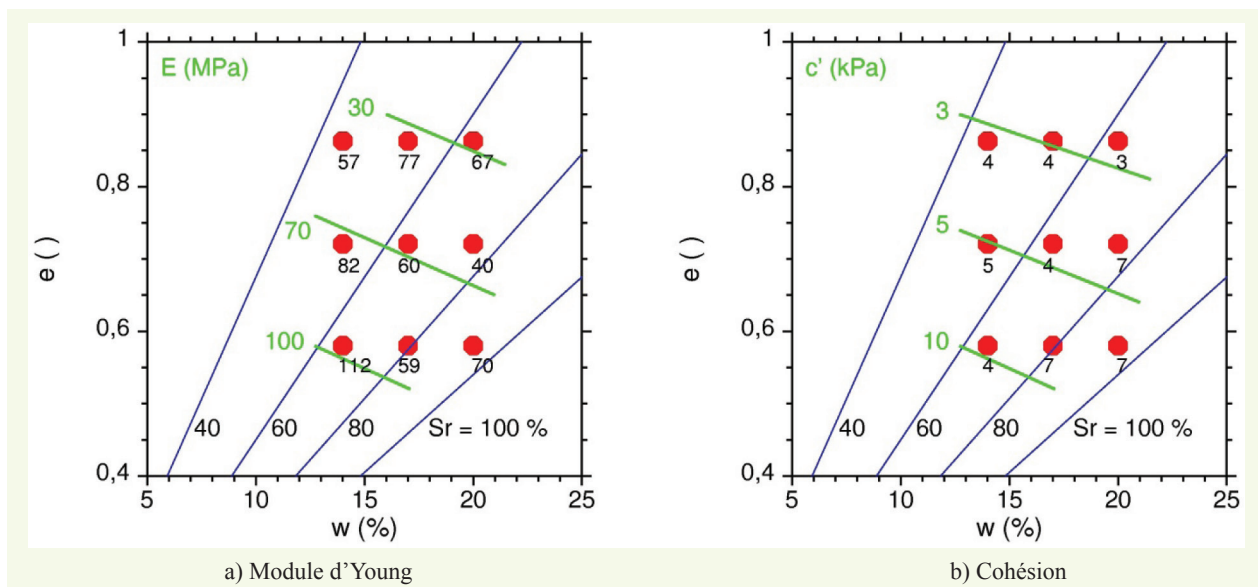


tableau 4
Coefficients des relations
 $L(C_m) = a_0 + b_1 w + b_2 e$
pour le limon de
Goderville.

$L(C_m)$	a_0	b_1	b_2	unités
$\lg \sigma_{ap}$	5,36	-0,033	-3,09	σ_{ap} (kPa) w (%) e (-)
$\lg E$	3,37	-0,025	-1,73	E (MPa) w (%) e (-)
$\lg c'$	2,32	-0,025	-1,74	c' (kPa) w (%) e (-)

les variations de la contrainte de compactage σ_{ap} du limon (ligne 1 du **tableau 4**). La fonction L est logarithmique dans les trois cas.

4. ESSAIS DE SENSIBILITÉ OU DE GONFLEMENT-EFFONDREMENT EN PARALLÈLE

Les essais de gonflement-effondrement en parallèle ont pour but de mettre en évidence la sensibilité à l'imbibition d'un sol compacté, tant du point de vue de la nature du sol que de son état. Cette procédure d'essai a été développée au LRPC de Toulouse (Mieussens, 1993) dans le but de qualifier la sensibilité des matériaux compactés aux variations d'état hydrique.

Pour le limon de Goderville, six éprouvettes œdométriques sont compactées en chacun des points du plan d'expérience. Elles sont chargées dans cet état sur des bâtis et sous des contraintes axiales σ_a égales à 30, 55, 105, 210, 410 et 820 kPa respectivement, pendant trois jours. Puis elles sont mises en imbibition avec de l'eau désaérée pendant quatre jours, soit une semaine d'essai au total. L'évolution du tassement est enregistrée en fonction du temps pendant les différentes phases des essais. Suivant la nature du matériau, son état de compactage et le niveau de chargement, l'imbibition provoque un effondrement ou un gonflement. Les éprouvettes les plus chargées s'effondrent. Les éprouvettes les moins chargées gonflent. L'essai permet de déterminer une contrainte intermédiaire pour laquelle la déformation sous imbibition reste nulle à l'échelle de l'éprouvette (échelle macroscopique). Cette contrainte est une pression de gonflement, notée σ_{ag} . Parallèlement, l'amplitude des déformations sous imbibition permet d'évaluer une déformation potentielle de gonflement-effondrement, qui est d'autant plus grande que le sol est sensible à l'imbibition dans l'état où il est testé.

Les **figures 7, 8 et 9** montrent les résultats des essais de sensibilité pour trois des neuf points du plan d'expérience (**tableau 1**), au travers des courbes temps-déformation axiale (t, ε_a) et des courbes contrainte-déformation (ε_a, σ_a) :

- w = 14 %, $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$, compactage à l'OPN côté sec,
- w = 20 %, $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$, compactage à l'OPN côté humide,
- w = 14 %, $\rho_d = 1,45 \text{ g/cm}^3$, compactage à faible densité, côté sec.

La déformation axiale est comptée à partir de l'état final compacté. Sa variation est positive pour un effondrement (compression) et négative pour un gonflement (expansion). Dans le premier essai, sol dense et sec, les déformations engendrées par le chargement dans l'état naturel restent faibles. Par contre, des déformations fortes de gonflement et d'effondrement sont observées après l'imbibition : elles valent de l'ordre de 1,5 % pour la déformation axiale (**figure 7**). La pression de gonflement est égale à $\sigma_{ag} = 420 \text{ kPa}$ environ. Le sol est peu compressible, mais il est sensible à l'imbibition.

Dans le second exemple, limon compacté à l'OPN, les déformations dans l'état naturel sont notables, mais les déformations sous imbibition sont quasi nulles (**figure 8**). Le sol compacté est déformable, mais il est sensible à l'imbibition.

Enfin, le sol sec peu compacté présente de très fortes déformations sous l'effet du chargement (plus de 10 %, **figure 9**) et de très fortes déformations d'effondrement sous l'effet de l'imbibition (plus de 10 % supplémentaires). Il est à la fois très compressible et très sensible à l'imbibition.

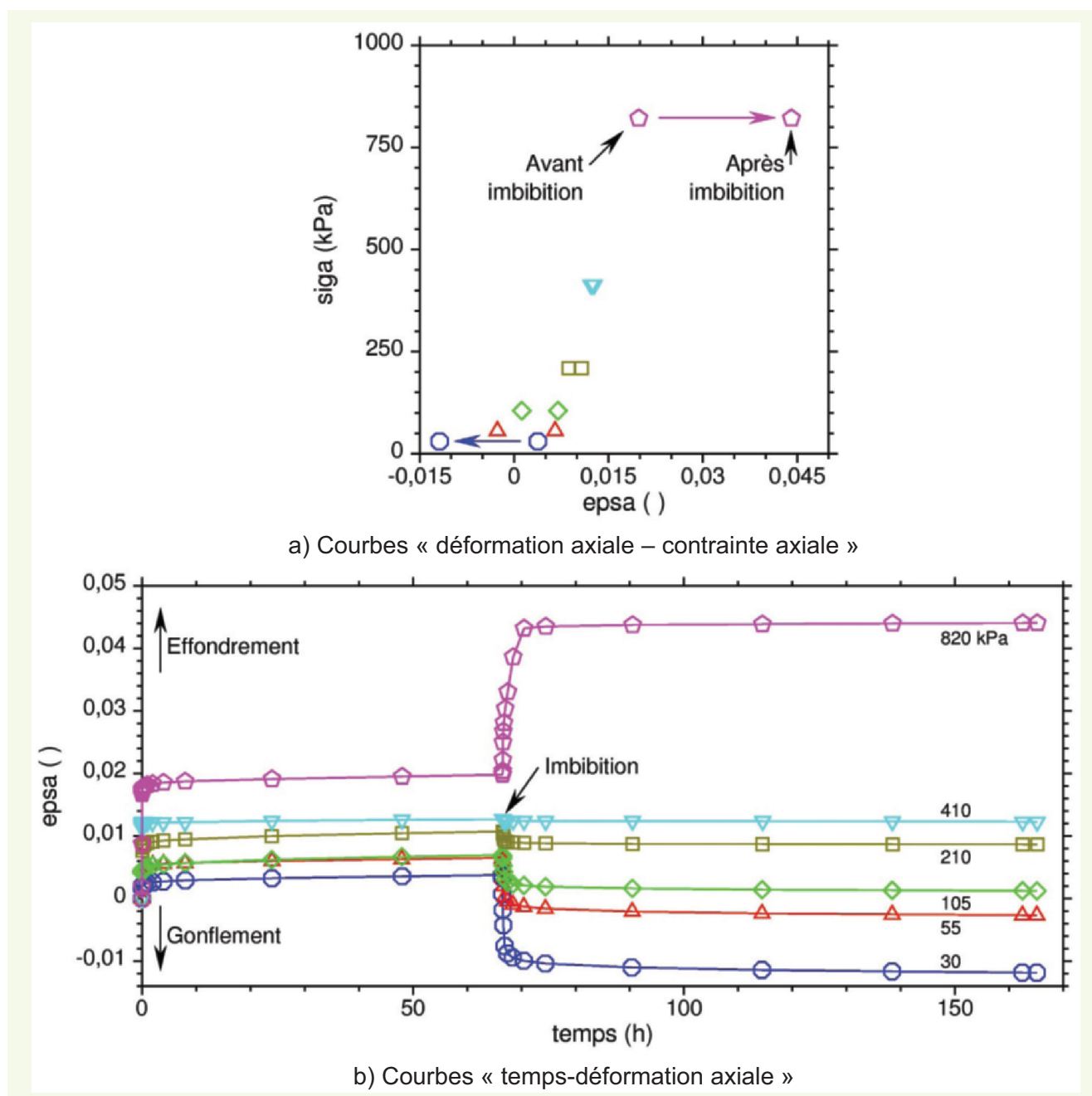


figure 7

Comportement du limon
compacté à l'OPN côté sec
(point d'état $w = 14\%$,
 $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$).

Il faut noter que, dans les trois exemples, les contraintes axiales appliquées sur les éprouvettes les plus chargées sont souvent supérieures aux contraintes de compactage σ_{ap} (tableau 2). De ce fait, le chargement œdométrique produit une densification supplémentaire du limon sous les fortes charges, au-delà du compactage préalable et avant la mise en imbibition. À ce titre, la pression de compactage σ_{ap} doit être vue comme une pression de préconsolidation dans la suite de l'essai.

La figure 10 compare les courbes contrainte-déformation obtenues aux neuf points d'état et exprimées dans le plan $(\lg \sigma_a, e)$. La comparaison des réponses du sol compacté avec la réponse du sol déstructuré saturé montre bien l'effet de l'état de saturation et de densification obtenu par le compactage et l'influence de l'état de chargement. Pour le limon compacté à la densité OPN (figure 10a), les sols secs situés en dessous de la droite de compressibilité vierge gonflent, ceux situés en dessus ont tendance à s'effondrer. Les sols humides sont peu sensibles à l'imbibition, mais ils sont compressibles quand ils sont chargés à proximité ou au-delà de la contrainte de compactage σ_{ap} . Leur réponse s'inscrit alors sur la courbe de compressibilité vierge. Les sols sous-compactés sont

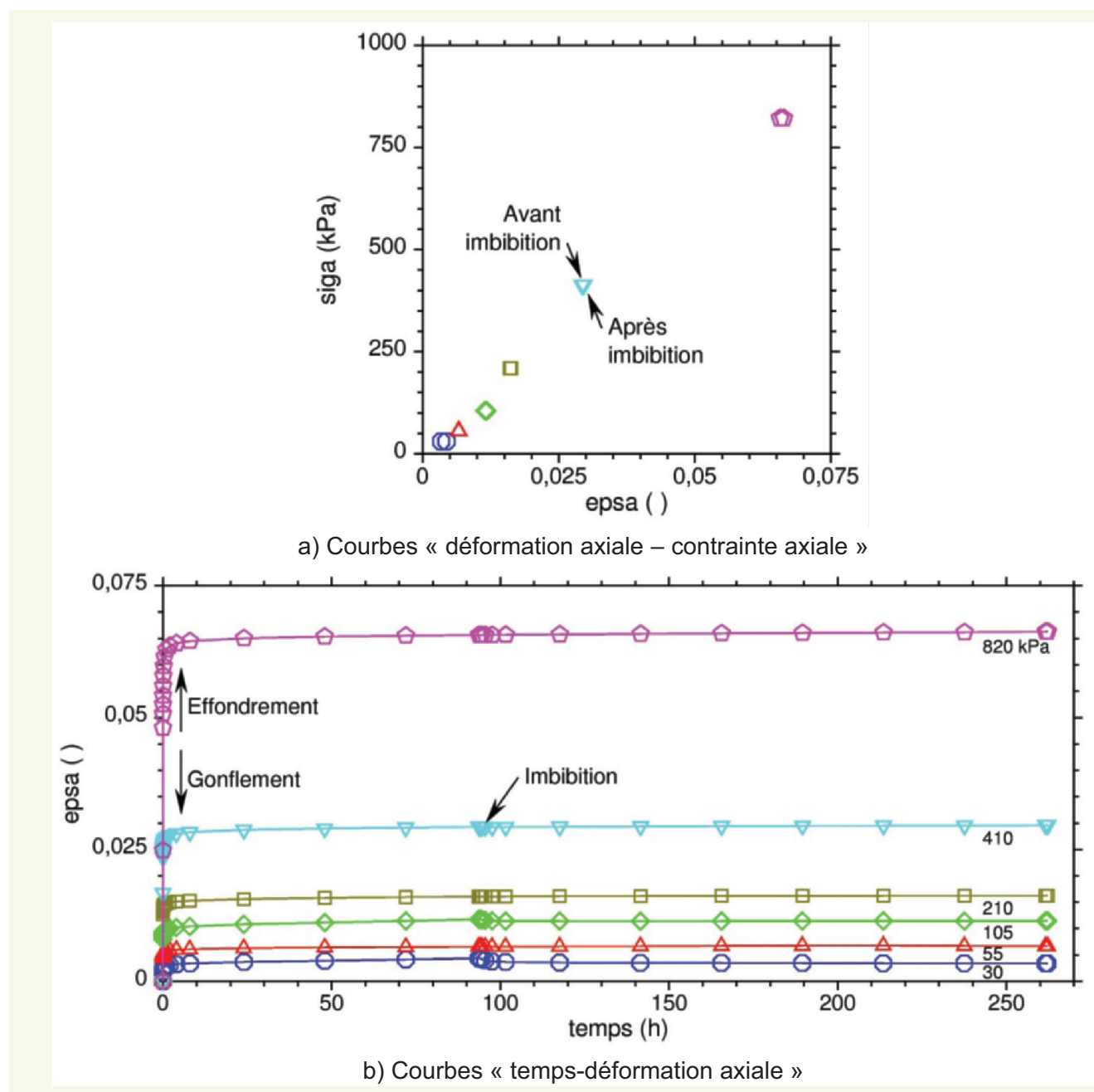


figure 8
Comportement du limon
compacté à l'OPN côté
humide (point d'état
 $w = 20 \%$, $\rho_d = 1,71 \text{ g/cm}^3$).

compressibles et effondrables. Le chargement dans leur état initial de compactage porte le sol au-delà de la courbe de compressibilité vierge. Ils appartiennent alors à un domaine en forme d'onglet (onglet d'effondrement, Blondeau, 1994), délimité par la droite de compressibilité vierge et la droite de compactage dans le plan ($\lg \sigma_a$, e) et dans le domaine non saturé du plan (w , e). Ce domaine est d'autant plus vaste que le sol est sec (préconsolidation apparente). L'imbibition amène les sols lâches sur la courbe de compressibilité vierge avec des déformations d'autant plus grandes que le l'onglet d'effondrement est étendu.

L'interprétation des essais de sensibilité en parallèle peut être effectuée sous différentes formes et au moyen de différents indices définis à partir des déformations (Mieussens, 1993) ou en termes d'énergie. Dans le futur, ces indices auront pour intérêt d'entrer à leur tour dans un système de classification, quand la base des données disponibles sera suffisamment étoffée. La **figure 11** montre des courbes contrainte-déformation (ε_a , σ_a) schématisées, avant et après imbibition. Les aires comprises entre ces courbes de part et d'autre de la pression de gonflement s_{ag} représentent des énergies qui seront notées W_- du côté du gonflement (de signe négatif) et W_+ du côté de l'effondrement

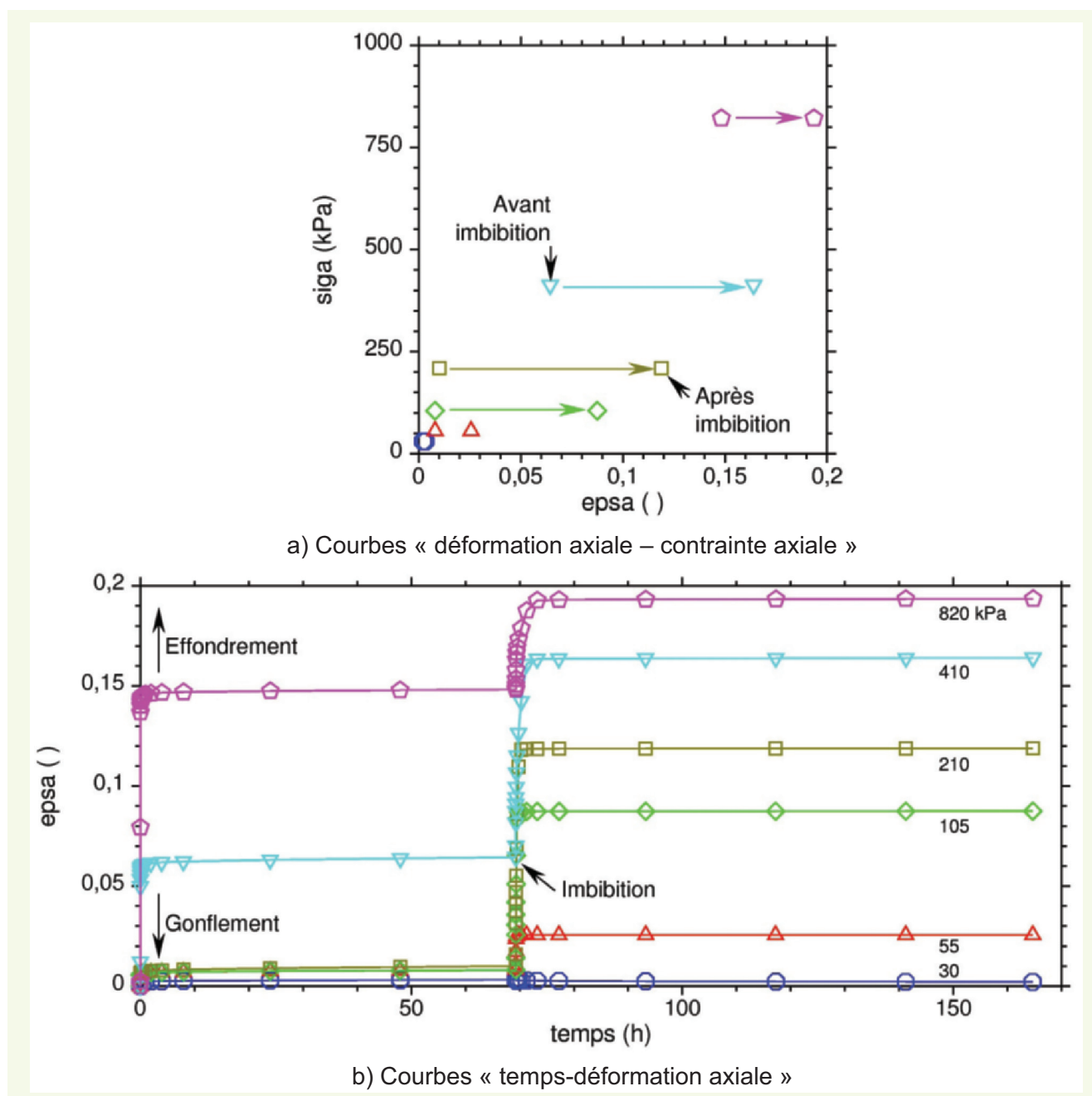


figure 9

Comportement du limon compacté à faible densité, côté sec (point d'état $w = 14 \%$, $\rho_d = 1,45 \text{ g/cm}^3$).

(de signe positif). La mesure de W_+ et W_- sur les courbes expérimentales permet de définir la demi-somme $W_s = (W_+ + W_-) / 2$ et la demi-différence $W_D = (W_+ - W_-) / 2$.

Le **tableau 5** rassemble les mesures de ces énergies aux neuf points d'état du plan d'expérience. Ces couples (W_s, W_D) sont reportés sur la **figure 12** avec des résultats obtenus sur d'autres sols compactés tels que des argiles, des marnes ou des craies. L'énergie W_D est toujours positive. Elle est représentée en échelle logarithmique car son domaine de variation est très large. L'énergie W_s est négative pour les sols gonflants, comme les marnes de la **figure 12**. Elle est positive pour les sols effondrables. Les neuf points obtenus sur le limon de Goderville se classent du côté des sols effondrables dans ce diagramme, en s'éloignant d'autant plus de l'origine qu'ils sont secs et sous-compactés.

Le **tableau 5** indique aussi la pression de gonflement σ_{ag} . La **figure 13** montre le plan d'état (w, e) paramétré par les droites de saturation, puis des droites d'égale pression de gonflement.

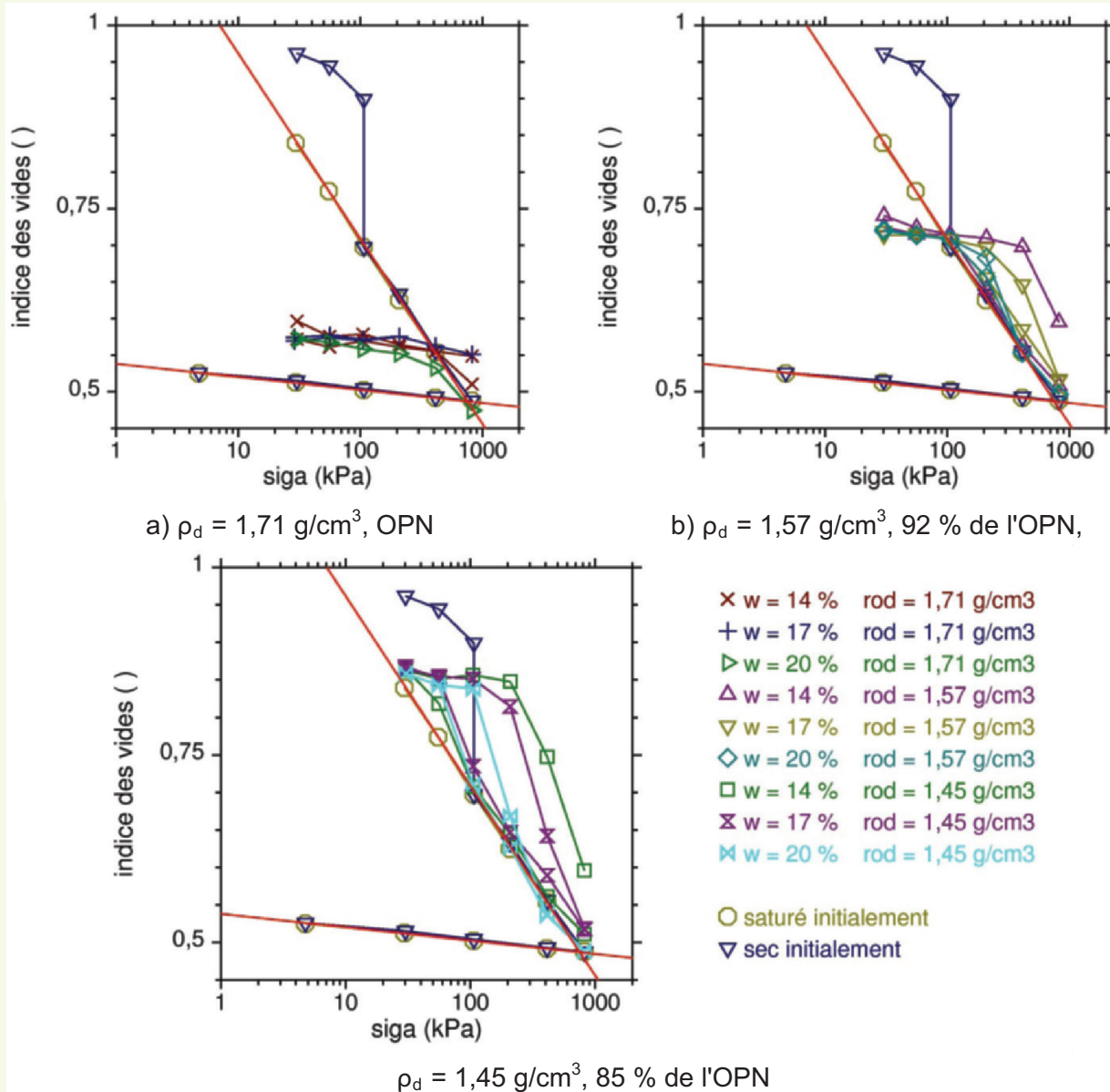


figure 10
Comportement du limon compacté. Courbes contrainte-déformation aux points d'état.

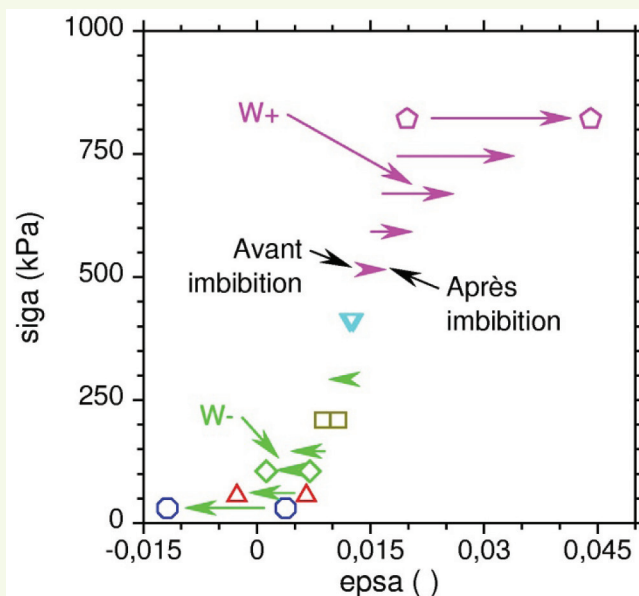


figure 11
Définition des énergies d'effondrement W_+ et de gonflement W_- .

Point d'état visé		Propriétés mesurées		
w (%)	ρ_d (g/cm ³)	σ_{ag} (kPa)	W_s (kNm/m ³)	W_d (kNm/m ³)
14	1,45	32	63	63
17	1,45	43	28	28
20	1,45	44	9,1	9,1
14	1,57	106	40	41
17	1,57	106	15	15
20	1,57	106	2,5	2,6
14	1,71	418	3,5	6,3
17	1,71	380	-0,20	0,025
20	1,71	157	0,22	0,27

tableau 5
Principales propriétés
mesurées pendant les
essais de sensibilité.

En comparant ces droites aux droites d'iso-énergie de compactage de la **figure 3**, il apparaît une même tendance indiquant que les iso-pressions de gonflement sont subparallèles aux branches des courbes de compactage côté sec. De plus, les pressions de gonflement sont approximativement égales au tiers de la pression de compactage ($\sigma_{ag} \approx \sigma_{ap} / 3$) pour le limon. Enfin, le plan d'état (w, e) peut être paramétré en énergie W_D . Il apparaît alors que les droites de saturation peuvent être considérées comme des lignes d'iso-énergie d'effondrement, en première approximation. Les déformations d'effondrement sont d'autant plus grandes que le sol compacté est sec et lâche.

En résumé, les essais de sensibilité pratiqués sur les sols compactés au laboratoire se déroulent en trois étapes principales : compactage, chargement dans l'état compacté, imbibition. Les essais sont particulièrement discriminants vis à vis de la nature du sol (argile, limon, craie, sols sableux, etc.) et, pour chaque sol, ils sont discriminants vis à vis de l'état de saturation et de densification (w, e) dans lequel ils sont compactés. Le compactage représente l'histoire du matériau densifié. La connaissance de cette histoire, ajoutée à la mesure de la compressibilité du sol saturé, est importante pour interpréter les essais de sensibilité (pression de préconsolidation, onglet d'effondrement, etc.).

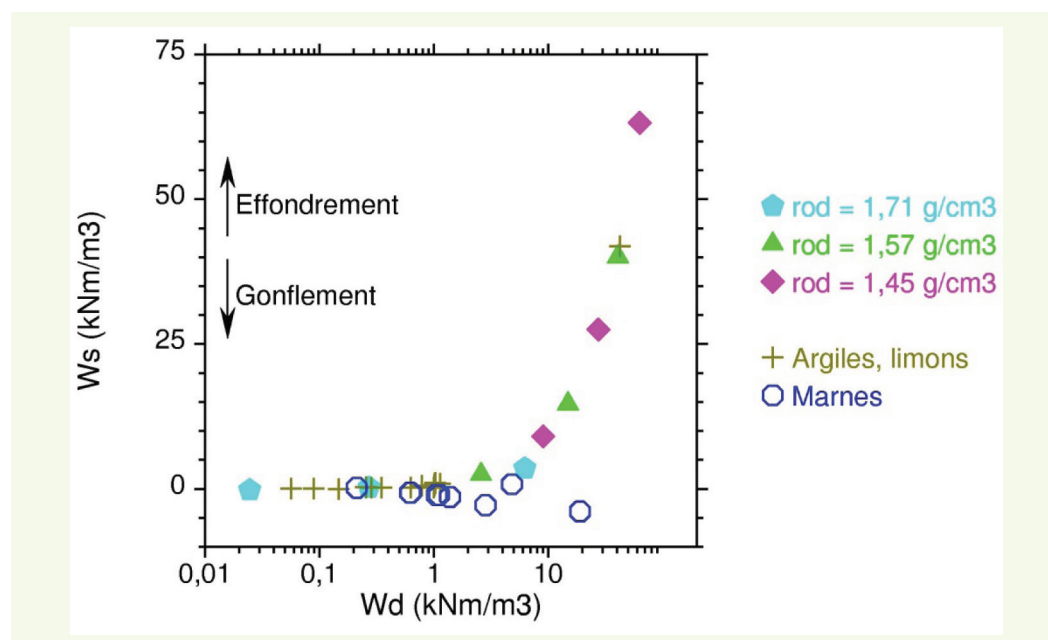


figure 12
Représentation
des énergies de gonflement
et d'effondrement
dans le plan (W_D , W_S).

5. ESSAIS DE RETRAIT EN CONTINU

Chaque point du plan d'expérience consacré au limon de Goderville a donné lieu à la réalisation d'un essai de retrait. Une méthode d'essai particulière a été mise en œuvre, qui vise à effectuer l'enregistrement du retrait en continu.

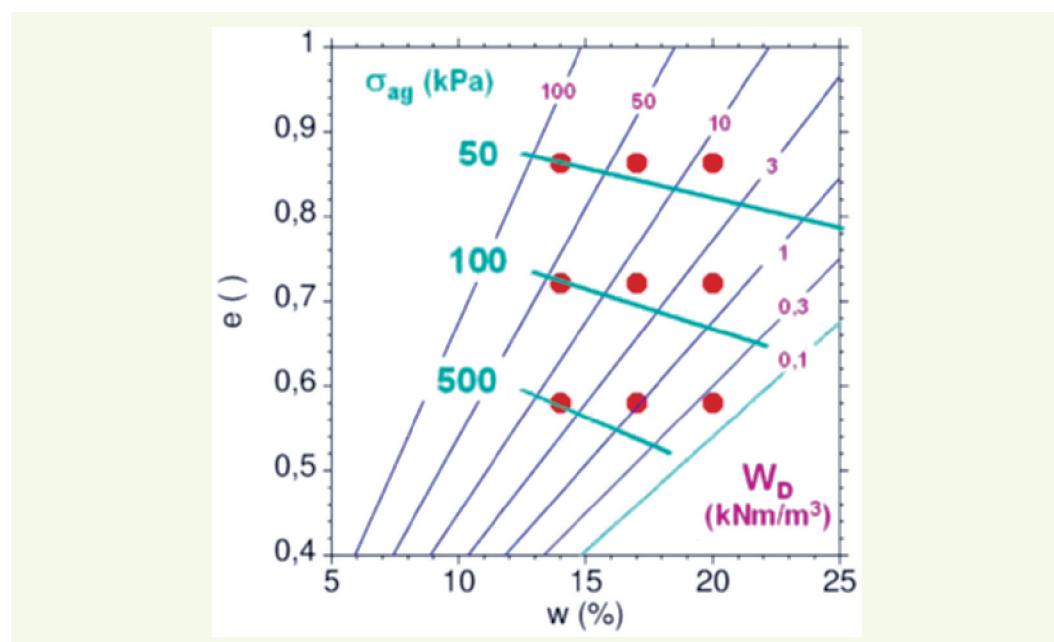
■ 5.1. Mode opératoire

Le sol est préparé préalablement en un point d'état donné (w , e), avec le lot correspondant des éprouvettes triaxiales ou œdométriques. Le sol est compacté dans un moule cylindrique de diamètre $d_0 = 40$ mm et de hauteur $h_0 = 19,5$ mm. L'éprouvette, son moule et un capteur de déplacement placé dans l'axe du moule sont posés sur le plateau d'une balance. L'enregistrement de la variation de la masse de l'éprouvette à l'aide de la balance et de sa variation de hauteur à l'aide du capteur de déplacement axial permettent de suivre la courbe de retrait en continu au moyen d'une chaîne d'acquisition des mesures. Une balance de 150 g de portée est utilisée. La dimension de la trousse a été choisie afin de rendre compatible les variations de masse enregistrées avec cette balance, ce qui permet d'embarquer une éprouvette dont la masse est comprise entre 40 et 60 g au départ.

Après la mise en place de l'éprouvette sur le plateau de la balance et le réglage du capteur axial, le sol est laissé à l'air libre et il se dessèche progressivement. Les essais se déroulent dans une salle climatisée où la température est maintenue constante. Le degré hygrométrique n'est pas contrôlé. La variation de la masse de l'éprouvette et sa variation de hauteur sont enregistrées en continu jusqu'à stabilisation au bout de deux à cinq jours. Dans un premier temps, la dessiccation se produit par la face supérieure de l'éprouvette. Puis l'éprouvette se décolle de la bague latérale et se fissure parfois, ce qui change inévitablement les conditions aux limites d'évaporation et d'entrée d'air. En fin d'essai, l'éprouvette est mesurée au pied à coulisse, puis elle est placée à l'étuve. Sa masse sèche permet d'évaluer les caractéristiques d'état initial et final du sol.

L'essai s'exprime au moyen des courbes de déformation axiale (t , ε_a) et de teneur en eau (t , w) en fonction du temps t , puis de la courbe de retrait (w , ε_a). La déformation axiale est définie par $\varepsilon_a = \Delta h/h_0$, où Δh est la variation de hauteur de l'éprouvette pendant le retrait et h_0 sa hauteur initiale. La déformation axiale est positive pour un retrait (compression), négative pour un gonflement (expansion). Le passage de la déformation axiale à la déformation de volume ε_v , puis à l'indice des vides e , nécessite d'effectuer une hypothèse sur l'isotropie de la déformation, en plus de

figure 13
Représentation
des résultats dans le plan
d'état (w, e), paramétré par
les droites d'égale pression
de gonflement σ_{ag} et les
droites d'égale valeur
de l'énergie W_D .



l'hypothèse sur l'homogénéité des déformations et l'homogénéité de la teneur en eau. Ici, la déformation est supposée isotrope et $e = e_0 - (1 + e_0) \varepsilon_v$, où e_0 est l'indice des vides initial du sol compacté. Une limite de retrait peut être définie comme l'abscisse du coude de la courbe (w, e).

■ 5.2. Limon saturé

Comme pour les essais œdométriques en parallèle, un essai de retrait en continu a été réalisé préalablement sur le limon déstructuré et saturé. Son état initial est $w = 58 \%$ et $e = 1,6$ ($\rho_d = 1,04 \text{ g/cm}^3$). Dans un premier temps, le chemin de séchage suit la droite de saturation $S_r = 1$ (figure 14). Puis, un coude marque l'entrée du chemin dans le domaine non saturé du plan (w, e) pour lequel $S_r < 1$. Ce coude a pour coordonnées ($w = 31,3 \%$, $e = 0,85$, $\varepsilon_a = 0,157$). Une droite représente le chemin de désaturation dans le plan (w, ε_a) à partir de ce point. Cette droite a pour pente $-0,0022$. Le chemin se stabilise alors au point ($w = 2,7 \%$, $e = 0,60$, $\varepsilon_a = 0,217$). Cette teneur en eau est la teneur en eau résiduelle en fin de séchage à l'air libre.

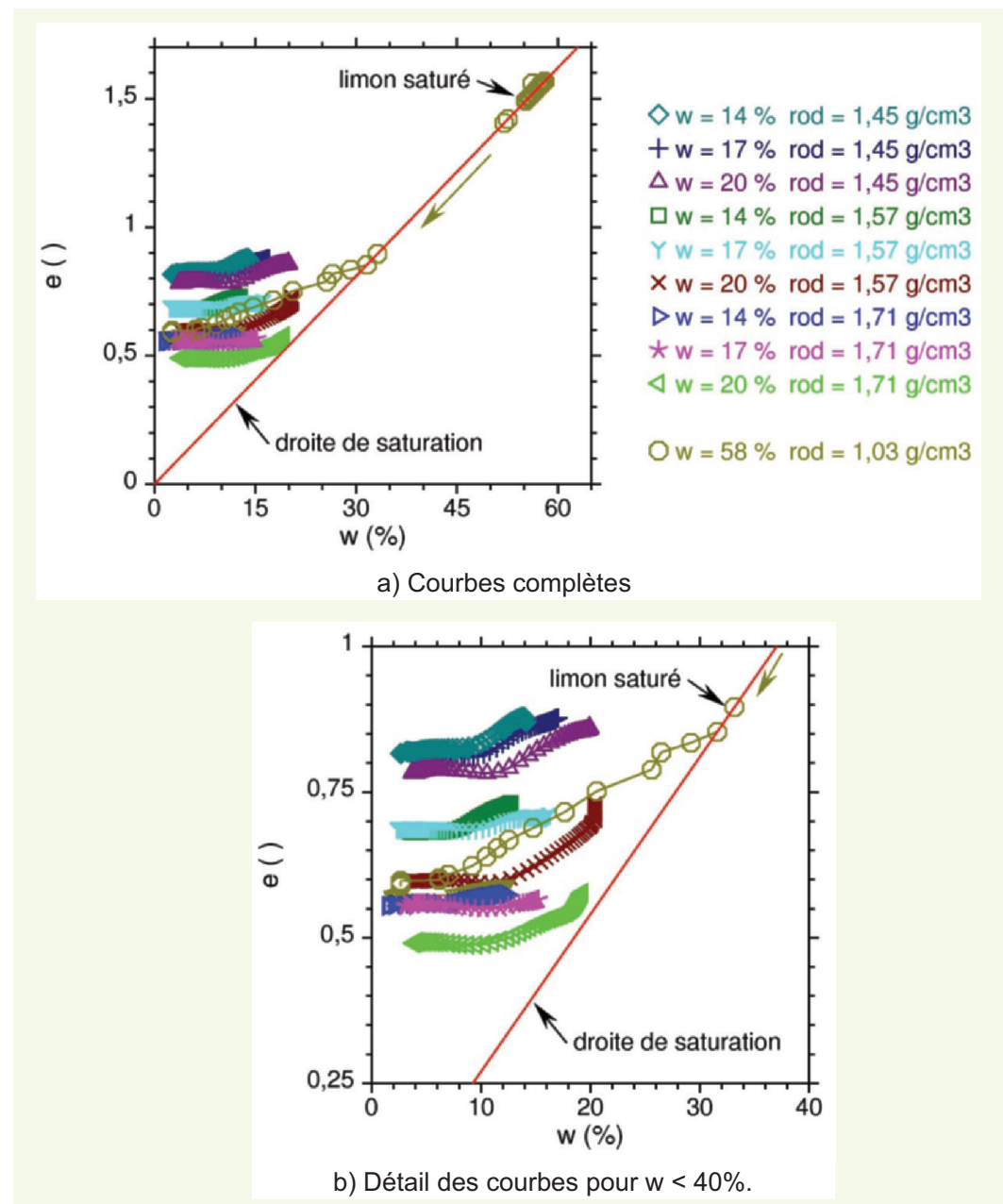


figure 14
Courbes de retrait du
limon saturé et du limon
compacté aux différents
points d'état.

■ 5.3. Limon compacté

Les courbes de retrait (w , e) du limon compacté sont données sur la [figure 14](#). Les points de départ des essais correspondent à ceux indiqués sur la [figure 2](#). Ils sont situés dans le domaine non saturé du sol, au-dessus de la droite de saturation ($S_r = 1$). Pendant le séchage, les chemins s'infléchissent vers la gauche et vers le bas du graphique.

Les essais montrent que les variations de volume sont faibles et que, mis à part deux points voisins de la droite de saturation pour lesquels les variations de volume sont les plus grandes, les sols compactés conservent un indice des vides proche de celui de départ. Le volume final du limon saturé se situe à proximité des volumes des limons compactés les plus denses et secs. Finalement, les essais de retrait en continu montrent que l'étendue des variations de volume de retrait, d'une part, et la limite de retrait, d'autre part, dépendent de l'état initial du matériau. La limite de retrait dépend donc à la fois de la nature du sol compacté et de son état initial. Cette limite ne peut pas être donnée indépendamment de l'état initial du sol. Si on la définit comme la teneur en eau au-dessous de laquelle le sol ne présente plus de variation géométrique notable, la détermination d'une limite de retrait pose un problème supplémentaire pour les sols compactés qui sont non saturés. Finalement, la préparation du sol par différentes méthodes (et la structure qui en résulte), par déstructuration à saturation pour l'une, ou par humidification à diverses teneurs en eau puis compactage, pour d'autres, constituent des histoires différentes du sol et conduisent à des retraits différents.

6. CONCLUSION

Des essais triaxiaux, des essais œdométriques de sensibilité en parallèle et des essais de retrait en continu ont été réalisés sur le limon de Goderville compacté en neuf points différents du plan d'état (w , e), dans le but de mesurer les propriétés mécaniques du sol et d'observer sa sensibilité aux variations de teneur en eau. Le compactage peut être assimilé à l'histoire mécanique du sol compacté et détermine pour une large part les propriétés mécaniques immédiates du matériau (à l'échelle de la durée des essais de laboratoire), comme le montrent les propriétés de déformabilité et de résistance déduites des essais triaxiaux. Pour un état donné de compactage, le module de déformation augmente avec la pression moyenne et, en termes de résistance, une cohésion peut être mesurée à faible pression, quand le limon est suffisamment densifié par le compactage. Cette cohésion disparaît à haute pression.

À l'instar de la contrainte de compactage semi-statique, ces propriétés de déformabilité et de résistance peuvent être expliquées par une fonction puissance d'une combinaison linéaire entre la teneur en eau et l'indice des vides du sol compacté. Ces relations linéaires (w , e , $L[C_m]$) permettent en effet d'estimer le paramètre mécanique C_m en fonction de la teneur en eau w et de l'indice des vides e du sol compacté, où L est une fonction logarithmique dans le cas des modules de déformation ou des résistances. Ces relations ne font d'ailleurs que traduire le gain de rigidité ou de résistance acquis avec l'énergie dissipée par le sol au moment du compactage, puisque l'état du sol compacté est directement lié à cette énergie de compactage. Cela conduit à la conclusion triviale qui veut que les performances mécaniques attendues d'un sol compacté dépendent en premier lieu de l'énergie qui a été consacrée à le compacter et, finalement, de la qualité de son compactage (teneur en eau et densité optimales).

Sur un plan pratique au laboratoire, cette étude expérimentale montre une fois encore l'importance d'enregistrer les courbes de compactage, considérées comme histoire du sol. Ces données sont complétées utilement par un essai œdométrique effectué sur le sol déstructuré reconstitué et saturé, qui fournit la courbe de compressibilité vierge du sol. Cette droite du plan ($\lg \sigma_a$, e) et la droite de saturation du plan (w , e) qui lui fait face, permettent de positionner le sol dans son état initial et son état final, en termes de teneur en eau, de densité et de contrainte totale.

Les essais de retrait en continu effectués sur le limon compacté en différents points ou le limon déstructuré et saturé, montrent que l'étendue des variations de volume de retrait, d'une part, et la limite de retrait, d'autre part, dépendent de l'état initial du matériau. La limite de retrait n'apparaît donc pas comme une grandeur intrinsèque du limon compacté. Cette limite ne peut pas être donnée indépendamment de l'état initial du sol et de son mode de préparation.

Les essais œdométriques de sensibilité en parallèle s'avèrent une fois encore discriminants vis à vis de l'état initial du sol compacté et, plus généralement, de la nature du sol, quand on compare différents sols plus ou moins argileux entre eux. Complétés utilement par une mesure des paramètres de la droite de compressibilité vierge du sol, ces essais permettent de situer le sol compacté vis à vis du risque de gonflement ou d'effondrement sous l'effet d'une imbibition. Le classement du limon compacté (et sous-compacté) semble pertinent d'après les indices tirés des essais.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLONDEAU F. (1994).** Comportement des sols non saturés sous chargement isotrope. Enseignements tirés de la représentation SD d'une variante simplifiée du modèle de Barcelone. Contrat Scétauroute, Note du 31/01/1994, 33 pages.
- CAMAPUM DE CARVALHO J., CRISPEL J.J., MIEUSSENS C., NARDONE A. (1987).** La reconstitution des éprouvettes en laboratoire. Théorie et pratique opératoire. Rapport de recherche des LPC, 145, 54 pages.
- DELAGE P., FRY J.J. (2000).** Comportement des sols compactés : apports de la mécanique des sols non saturés. Revue française de Géotechnique, N°92, pp. 17-29.
- FERBER V. (2006).** Déformations induites par l'humidification des sols fins compactés. Apport d'un modèle de microstructure. Études et recherches des LPC, GT80, 322 pages.
- MIEUSSENS C. (1993).** Détermination de la sensibilité des sols aux variations de teneur en eau en laboratoire. Essais à l'œdomètre sur les sols compactés. Projet de méthode LPC, Rapport du LRPC de Toulouse.
- SERRATRICE J.F. (1995a).** Comportement d'une argile compactée. Bull. liaison Labo. P. et Ch., N°200, pp. 13-23.
- SERRATRICE J.F. (1995b).** Comportement d'une craie compactée. Colloquium Mundanum « Craies et Schistes », GBMR, Bruxelles, pp. 1.1.71-1.1.80.
- SERRATRICE J.F., SOYEZ B. (1996).** Les essais de gonflement. Bulletin liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°204, pp. 65-85.