



**HAL**  
open science

## Comportement d'une argile compactée

Jean-François Serratrice

► **To cite this version:**

Jean-François Serratrice. Comportement d'une argile compactée. BLPC - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1995, 200, pp.13-23. <hal-02551752v2>

**HAL Id: hal-02551752**

**<https://hal.science/hal-02551752v2>**

Submitted on 26 Mar 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

# Comportement d'une argile compactée

Jean-François SERRATRICE

Assistant  
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées  
d'Aix-en-Provence

## Introduction

Les déformations différées dans le temps ou les déformations de rupture qui se manifestent dans certains cas à la périphérie des remblais peuvent être attribuées au comportement des matériaux qui constituent ces remblais. Les charges totales extérieures appliquées aux remblais étant fixes, l'origine de ces déformations est souvent attribuée aux variations saisonnières des conditions hydriques à la périphérie des corps de remblai (Mieussens, 1980, 1987 ; Day et Axten, 1989 ; Alonso, 1993). Ces déformations provoquent à leur tour des désordres dans les matériaux des chaussées, plus rigides, supportés par les remblais. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude du comportement des matériaux compactés. Ces travaux touchent aux problèmes du compactage, du transfert de fluides dans les matériaux compactés et, d'une manière générale, au comportement de ces matériaux en tant que milieux non saturés ou gonflants. Ainsi, de très nombreuses méthodes expérimentales, empiriques et théoriques ont été développées pour caractériser ces matériaux.

On présente ici quelques exemples d'essais de laboratoire tirés d'un programme expérimental de caractérisation du comportement mécanique d'une argile compactée. Une démarche volontairement simplificatrice a été adoptée avec la réalisation d'essais triaxiaux et œdométriques contrôlés et interprétés en contraintes totales. Ce programme d'essais de laboratoire a pour principal objectif de mesurer les paramètres de déformabilité de l'argile compactée pour de petites déformations, d'une part, avec simulation des états des contraintes dans une couche de remblai, d'autre part, et enfin pour différents états de compactage. Ainsi, plusieurs éprouvettes sont compactées par compactage semi-statique en différents points d'état de compacité et de teneur en eau (effet de l'état du matériau compacté), consolidées sous différents états de contrainte (simulation de la couche de remblai) et sollicitées dans différentes directions de chargement (mesure de la déformation). L'ampleur d'un tel programme d'essais justifie l'adoption, en un premier temps, de procédures d'essai simplifiées. Mais cette

## RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'étude du comportement de matériaux de remblai, les propriétés mécaniques d'une argile compactée, et plus particulièrement ses caractéristiques de déformabilité, ont été déterminées en laboratoire. Plusieurs types d'essais ont été réalisés sur l'argile compactée dans son état après compactage, ou sous imbibition : essais de compactage, essais triaxiaux de compression et d'extension avec consolidation anisotrope pour simuler une couche de remblai, essais œdométriques de sensibilité à l'imbibition, essais de fluage. Les matériels utilisés sont décrits, ainsi que les procédures d'essais. Les caractéristiques mécaniques mesurées sont reliées aux caractéristiques d'état de l'argile compactée (teneur en eau et indice des vides) à l'aide d'une formulation empirique.

**MOTS CLÉS :** 42 - Argile - Compactage - Imbibition - Essai - Laboratoire - Triaxial - Compression - Traction - Consolidation - Anisotrope - Teneur en eau - Porosité - Oedomètre - Fluage - Déformabilité - Résistance (matér.).

démarche n'exclut pas la mise en œuvre de méthodes plus fondamentales pratiquées dans le cadre des milieux non saturés et qui pourraient être envisagées en quelques points particuliers de ce plan d'expérience. Une étude similaire a été réalisée sur une craie compactée (Serratrice, 1995).

Le compactage peut être assimilé à l'histoire mécanique du sol compacté et détermine pour une part les propriétés mécaniques immédiates du matériau, avant tout vieillissement. Dans cette perspective, les phases de compactage semi-statique aux différents points d'état de teneur en eau et de compacité de l'argile ont été systématiquement enregistrées. La récapitulation de ces données permet d'entrevoir quelques-uns des aspects du comportement de l'argile pendant l'écroutissage que constitue son compactage et rattacher le compactage semi-statique aux caractéristiques Proctor de l'argile. Un autre exemple permettra d'illustrer l'évolution de la contrainte radiale pendant le compactage semi-statique à l'œdomètre. Par ailleurs, les caractéristiques mécaniques mesurées seront reliées aux caractéristiques d'état, représentées par le couple formé par la teneur en eau et l'indice des vides après compactage. Enfin, quelques essais œdométriques de gonflement-effondrement et des essais triaxiaux de fluage permettront d'illustrer l'effet de l'imbibition sur la déformation de l'argile compactée.

## Propriétés physiques et compactage de l'argile

L'argile a été prélevée dans le flanc d'un remblai de l'autoroute A62. Après élimination des gros éléments et séchage à l'air libre, l'argile est tamisée puis passée dans un broyeur à boulets. Soigneusement homogénéisée, l'argile est placée en sac à une teneur en eau voisine de 3 %. Les caractéristiques physiques de l'argile sont reportées dans le tableau I ( $\gamma_s$  est déterminé à partir de  $\rho_s$  avec  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Ce matériau entre dans la catégorie A2 de la classification GTR 92.

TABLEAU I  
Caractéristiques physiques de l'argile

$W_L = 23$	$\gamma_s = 26, \text{ kN/m}^3$	$I_P = 20$
$\% < 80 \mu\text{m} = 67 \%$	$W_P = 23$	$\% < 2 \mu\text{m} = 33 \%$
Valeur au bleu de méthylène $V_{Bs} = 5,7$		

Les essais Proctor réalisés à des énergies de compactage différentes (PM : Proctor modifié, PN : Proctor normal et PR : Proctor réduit) donnent les résultats indiqués dans le tableau II. Les courbes Proctor correspondantes sont représentées sur la figure 1 dans le plan ( $w, \gamma_d$ ) où  $w$  est la teneur en eau et  $\gamma_d$  le poids volumique sec de l'argile compactée.

TABLEAU II  
Résultats des essais Proctor sur l'argile (optima)

Essais Proctor	Énergie (MNm/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	$S_r$ (%)
PM (modifié)	2,43	12	21,2	18,9	0,38	84
PN (normal)	0,53	18	19,9	16,9	0,55	87
PR (réduit)	0,29	26	19,5	14,7	0,78	89

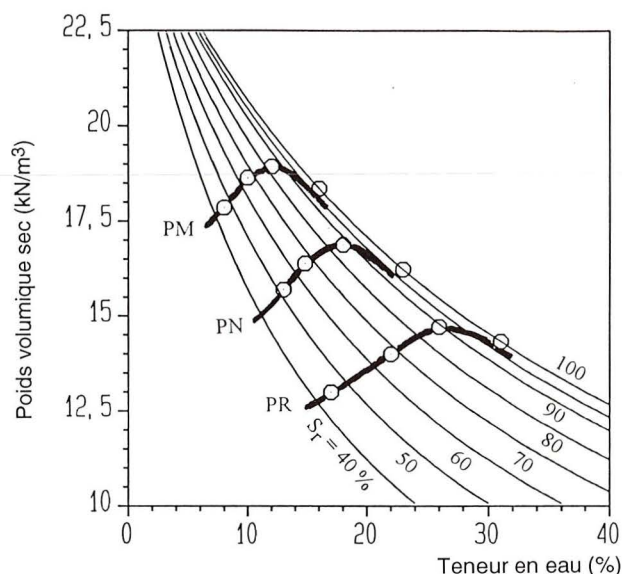


Fig. 1 - Courbes Proctor de l'argile ( $\gamma_s = 25,8 \text{ kN/m}^3$ ).

Les éprouvettes préparées pour les essais de laboratoire sont confectionnées par compactage semi-statique (Camapum de Carvalho et al., 1987). L'argile est préalablement humidifiée à une teneur en eau donnée. Dans le cas des éprouvettes triaxiales, elle est enfermée dans un tube de 50 mm de diamètre revêtu intérieurement d'une membrane en latex et de graisse aux silicones et entre deux pistons flottants. L'argile est portée à la densité visée par un chargement axial continu des pistons. Ce procédé permet de compacter l'éprouvette en une seule couche (hauteur finale 100 mm, élanement 2) et d'assurer une bonne homogénéité du matériau par la réduction du frottement sur le moule. Dans le cas des essais œdométriques, l'éprouvette est directement compactée dans le moule par chargement axial continu. Les courbes de tassement en fonction de la charge sont enregistrées pendant le compactage semi-statique. Traduites en indice des vides ( $e$ ) et en contrainte totale axiale ( $\sigma_a$ ), ces courbes peuvent être comparées aux courbes œdométriques de compactage.

La figure 2 représente les courbes de compressibilité de l'argile foisonnée pour différents cas de préparation, de chargement et d'imbibition. Dans un cas, l'argile foisonnée est mise en place à sec dans l'œdo-

mètre à une teneur en eau initiale de 1,5 % et un indice des vides initial de 1,25. Puis elle est chargée par paliers dans cet état de teneur en eau (éprouvette RE134), ou avec imbibition sous la contrainte axiale de 100 kPa (éprouvette RE135). Sinon, l'argile est malaxée à une teneur en eau de 58 % (1,3 fois sa limite de liquidité), puis mise en place dans l'œdomètre et chargée par paliers de 24 h suivant la procédure d'essai à l'œdomètre (éprouvette RE 136).

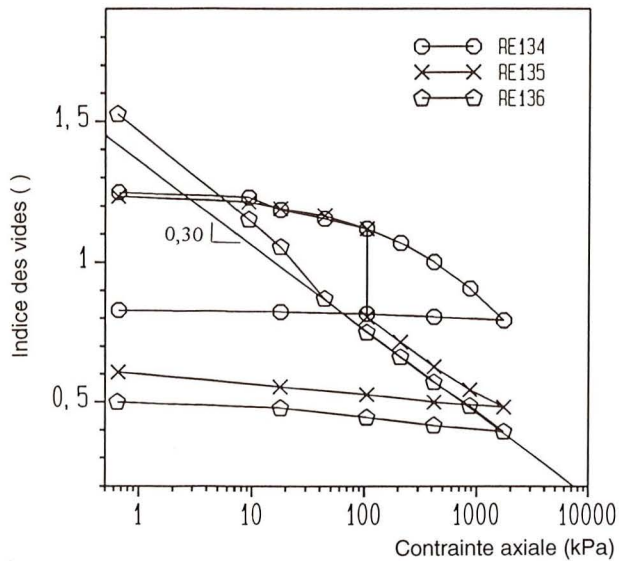
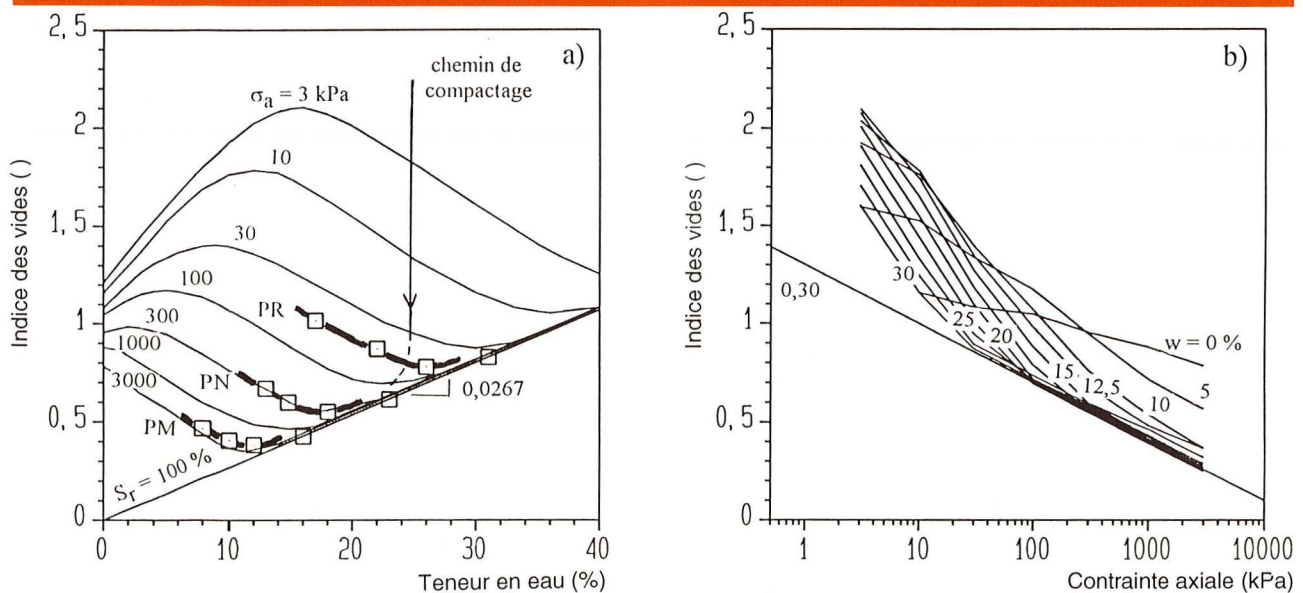


Fig. 2 - Essais œdométriques sur l'argile. Éprouvette RE 134 : chargement à sec. Éprouvette RE 135 : chargement à sec jusqu'à 100 kPa puis imbibition. Éprouvette RE 136 : chargement de l'argile saturée.

L'imbibition de l'argile lâche et sèche provoque son effondrement (éprouvette RE135). Lorsqu'elle est saturée (éprouvette RE136), la compressibilité de l'argile peut être représentée par une droite du plan  $(\lg \sigma_a, e)$  de pente  $C_c = 0,30$ . À une teneur en eau donnée, l'argile non saturée conserve une moindre compacité sous une charge axiale donnée du fait de l'action des forces capillaires. L'imbibition, en annulant ces forces, provoque son effondrement. L'indice des vides diminue pour rejoindre la droite de compressibilité de l'argile saturée comme sur la figure 2. La récapitulation de l'ensemble des courbes de compactage (une cinquantaine d'éprouvettes) pour des teneurs en eau comprises entre 2 et 31 % permet d'obtenir le paramétrage en contrainte totale axiale du plan d'état  $(w, e)$  de la figure 3a. La représentation de la compacité de l'argile par  $e$  et non par  $\gamma_d$  présente quelques avantages. Les lieux des points à degré de saturation donné sont des droites passant par l'origine du plan  $(w, e)$  et d'équation  $e = (w\gamma_s)/(S_r\gamma_w)$ , où  $S_r$  est le degré de saturation et  $\gamma_w$  le poids volumique de l'eau. En particulier, la droite de saturation ( $S_r = 100\%$ ) a pour pente 0,0267 ( $w$  en %, fig. 3a). Par ailleurs, il est possible de placer en regard du plan  $(w, e)$ , les courbes de compactage semi-statique à teneur en eau constante dans le plan  $(\lg \sigma_a, e)$  sur la figure 3b.

Fig. 3 - Surface d'état S  $(w, \lg \sigma_a, e)$  pour l'argile compactée



a. Courbes iso-contrainte axiale de compactage semi-statique (en kPa).

b. Courbes iso-teneur en eau (en %).

On peut noter la forme des courbes ( $\lg\sigma_a, e$ ) à teneur en eau constante, qui viennent rejoindre progressivement la droite de compressibilité (de pente  $C_c = 0,30$ ) de l'argile saturée à des niveaux de contrainte totale plus ou moins grands suivant la teneur en eau. Lorsque la courbe ( $\lg\sigma_a, e$ ) tangente la droite de pente 0,30, l'argile devient quasi saturée et le chemin suivi dans le plan ( $w, e$ ) est proche de la droite de saturation. La poursuite du chargement par compactage semi-statique ne peut se faire sans expulsion d'eau. Les courbes ( $\lg\sigma_a, e$ ) à teneur en eau constante sont sans doute fortement dépendantes des méthodes de préparation et de compactage employées ici. Mais elles mettent en évidence quelques traits caractéristiques du comportement de l'argile. Dans son état foisonné, sous 3 kPa par exemple, l'argile possède un minimum de compacité pour une teneur en eau voisine de 16 %. Au-delà de cette teneur en eau, le matériau ne peut plus être maintenu dans un état lâche. L'argile « s'autocompacte » sous l'effet des forces de gravité et des forces capillaires. Sous forte pression, les courbes de compactage semi-statique s'apparentent aux courbes Proctor reportées sur la figure 3a (PM, PN et PR). Les contraintes axiales équivalentes sont respectivement et approximativement de 60, 300 et 2 500 kPa. Des études comparables ont été conduites sur une craie (Serratrice, 1995), d'autres argiles et des marnes au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Aix-en-Provence. Des résultats semblables ont été obtenus par Moussai et Didier (1992) pour des mélanges de sable et d'argile.

La forme des courbes de la figure 3 et leur position sont caractéristiques du compactage du matériau considéré. Elles changent d'un matériau à l'autre et sont probablement dépendantes aussi de la méthode de préparation de l'argile (déstructuration, fragmentation) et de la méthode de compactage. De plus, elles ne représentent que l'écrasement du matériau pendant le compactage semi-statique (chargement monotone). Il n'est pas non plus possible à ce niveau de l'étude, où le contrôle des essais et leur interprétation s'effectuent en contraintes totales, de fournir une explication précise de l'allure de ces courbes. Une telle démarche relève en fait de la mécanique de sols non saturés et, dans le cas présent, des sols remaniés, ou plus exactement fragmentés et non saturés. De plus, il s'agit ici de grandes déformations.

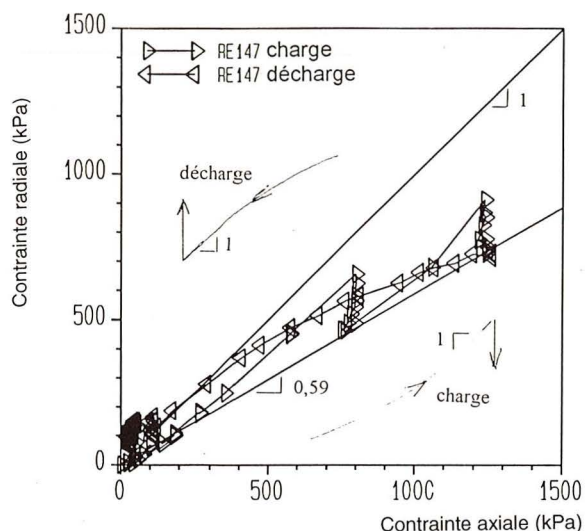
Cette synthèse des courbes de compactage, enregistrées en phase préliminaire des essais mécaniques, présente néanmoins l'intérêt d'illustrer le déroulement du compactage, considéré ici comme l'histoire mécanique de l'argile compactée. On retiendra pour la suite la valeur de 300 kPa de la contrainte totale axiale équivalente au compactage Proctor normal. Mais des conclusions plus générales peuvent être tirées de ces courbes, comme

avec la craie par exemple (Serratrice, 1995). Par ailleurs, ce balayage complet du plan d'état entre 2 et 31 % de teneur en eau éclaire quelques-uns des aspects du compactage des sols non saturés, si l'on considère que, par comparaison, toute l'histoire des sols saturés en chargement monotone se déroule sur la droite de saturation. Pour être complet, il faut rappeler enfin que les sols compactés se situent en fait dans des états de décharge. L'expérience suivante en donne une illustration.

## Contrainte latérale pendant le compactage

Un essai de compactage semi-statique a été réalisé à l'aide d'un œdomètre  $K_o$  pour montrer l'évolution de la contrainte radiale ( $\sigma_r$ ) au cours du compactage. Cet appareil a été construit en 1984 au Centre d'Études et de Construction de Prototypes (CECP) d'Angers selon un principe simple dans le but de réaliser des essais œdométriques à haute pression sur des marnes sans utilisation de matériel asservi (Serratrice et Flavigny, 1993). L'œdomètre est utilisé ici avec une bague (anneau d'acier inoxydable équipé de jauges de déformation) de 0-2 000 kPa d'étendue de mesure. L'argile est placée dans l'œdomètre dans un état lâche et à une teneur en eau proche de celle de l'optimum Proctor normal (OPN) ( $w = 17,8\%$ ). L'éprouvette (RE147) est alors chargée pendant une heure et demie par petits paliers jusqu'à un palier de deux heures, vers 800 kPa de contrainte axiale, suivi d'une autre montée en charge rapide jusqu'à un nouveau palier à 1 250 kPa maintenu pendant deux heures. Ce chargement assure un niveau de compactage compris entre l'énergie Proctor normale (PN) et l'énergie Proctor modifiée (PM). Puis l'éprouvette est déchargée rapidement jusqu'à deux paliers d'une demi-heure à 120 et 30 kPa de contrainte axiale. La figure 4 représente le chemin des contraintes totales ( $\sigma_a, \sigma_r$ ) suivi au cours de l'essai. L'état initial et l'état final de l'argile sont indiqués dans la légende.

Pendant le chargement rapide, le chemin des contraintes s'incurve pour suivre une direction parallèle à l'axe isotrope ( $\sigma_r = \sigma_a$ ), puis la contrainte totale radiale diminue pendant les paliers de chargement. Ce comportement est attribué à la mise en pression des fluides interstitiels (air et eau) pendant le chargement et à sa dissipation sous contrainte axiale constante et drainage vers les plaques poreuses de l'œdomètre  $K_o$ . Après stabilisation, l'état des contraintes se situe sur une droite de pente  $K_o = 0,59$ . À la décharge, le chemin des contraintes présente la même tendance, avec une courbe qui s'incurve en direction de l'axe isotrope. Par contre, pendant les paliers de déchargement, la contrainte totale radiale augmente et, à l'équilibre, la contrainte totale radiale devient



	w %	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ kN/m <sup>3</sup>	e	$S_r$ %
état initial avant compactage	17,8	11,1	9,4	1,74	27
état final après compactage	16,4	20,5	17,6	0,49	90

Fig. 4 - Essai œdométrique  $K_0$  de compactage. Chemin des contraintes pendant le chargement et le déchargement.

supérieure à la contrainte axiale. La décharge rapide engendre une pression « négative » des fluides interstitiels. Sa dissipation entraîne effectivement une augmentation de la contrainte totale radiale, l'argile venant s'appuyer progressivement sur la paroi de l'œdomètre pour finalement se trouver dans un état d'extension, comme tous les sols en fin de décharge œdométrique. Suivant le niveau de compactage et l'état initial du matériau, cette extension peut conduire à un état de rupture passive avec un rapport des contraintes égal au coefficient de butée  $K_p$ , à la cohésion apparente près.

Ainsi, l'état des contraintes final, après compactage, d'un matériau en condition  $K_0$  résulte de mécanismes complexes dus à l'hystérésis du chemin des contraintes effectives (Duncan et Seed, 1986 ; Seed et Duncan, 1986) et des effets de la succion en liaison avec la vitesse de chargement du milieu non saturé. Cet exemple d'essai ne constitue qu'une illustration du problème. Le cas d'une couche de remblai est encore plus complexe (déformation latérale non nulle, cycles de chargement produits par un compactage effectué par passes successives, rechargement par les couches sous-jacentes, etc.).

## Déformabilité de l'argile compactée

Bien que l'argile compactée soit non saturée, la suite du programme d'essais en laboratoire a été basée sur des procédures simples (essais pseudo-drainés interprétés en contrainte totale) et l'utilisation d'appareillages courants. Les essais triaxiaux ont pour but de mesurer les propriétés de déforma-

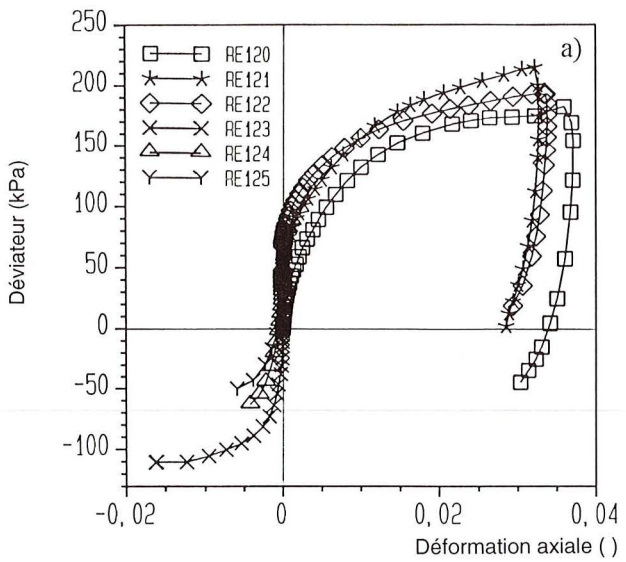
bilité, voire de résistance de l'argile compactée, non saturée ou saturée, en différents points d'état de compacité et de teneur en eau, avec simulation d'une couche de remblai et pour différentes directions de chargement (compression, extension).

En un point d'état ( $w$ ,  $e$ ), six éprouvettes sont préparées par compactage semi-statique. Après démoulage, les cylindres d'argile compactée sont arrasés pour éliminer le matériau situé à proximité des pistons flottants du moule de compactage et parfaire l'état de surface des éprouvettes. Les éprouvettes sont alors placées entre les plaques poreuses sèches de la cellule triaxiale et sur du papier filtre. Elles sont revêtues d'une membrane en néoprène. Pendant le montage de la cellule triaxiale, le piston est vissé dans la tête triaxiale, ce qui permet de contrôler la phase de consolidation anisotrope et d'éviter les défauts de contact et les jeux au début du cisaillement.

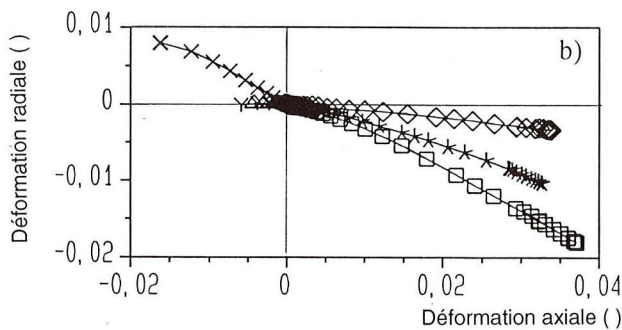
L'argile étant non saturée, la mesure de la variation de volume ne peut s'effectuer à partir du déplacement du fluide interstitiel. Des capteurs de mesure du déplacement radial ont donc été spécialement conçus et fabriqués pour cette série d'essais. Ces capteurs sont constitués par un anneau flexible en acier équipé de jauges de déformation et prenant appui suivant un diamètre de l'éprouvette (Vuaillet, 1980). Les anneaux sont étalonnés à l'aide d'un gabarit en acier de 49 à 53,5 mm de diamètre par pas de 0,5 mm. La présence de ces capteurs dans l'enceinte de la cellule triaxiale impose d'utiliser de l'huile comme fluide de confinement.

Pour simuler l'état initial des contraintes dans une couche de remblai, la consolidation a été effectuée en condition anisotrope sous une contrainte axiale donnée ( $\sigma_a$ ) de 100 kPa représentant la contrainte verticale qui règne en dessous d'une couche de 5 m d'épaisseur et des contraintes latérales ( $\sigma_r$ ) de 33, 50 et 100 kPa. Ainsi, trois couples d'éprouvettes compactées en un point d'état ( $w$ ,  $\gamma_d$ ) donné sont consolidés sous ces niveaux de contrainte, reproduisant différents états des contraintes avec une augmentation du déviateur  $q = \sigma_a - \sigma_r$  du centre du remblai vers le bord. Les essais triaxiaux se déroulent en deux phases : consolidation anisotrope, puis cisaillement en mode pseudo-drainé à drainage ouvert sur l'atmosphère, à confinement constant, à vitesse lente ( $v < 0,004$  mm/mn) en compression ( $q > 0$ ) ou en extension ( $q < 0$ ) avec mesure de la déformation axiale ( $\epsilon_a$ ), de la déformation radiale ( $\epsilon_r$ ) et de l'effort axial. D'où le déviateur  $q$  et la pression moyenne  $p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ . Les figures 5a, 5b et 5c représentent les résultats d'une série d'essais. D'autres séries d'essais ont été réalisées en différents points d'état représentés par des ronds sur la figure 1.

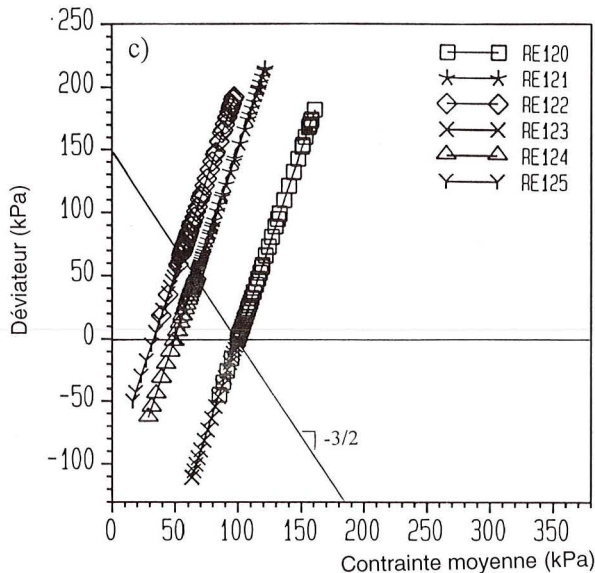
**Fig. 5 - Essais triaxiaux pseudo-drainés sur l'argile compactée non saturée. Argile compactée à l'OPN**



a. Courbes contrainte-déformation.



b. Chemins de déformation.



c. Chemin des contraintes totales.

La figure 5a montre les courbes contrainte-déformation ( $\epsilon_a$ ,  $q$ ) au début du chargement pour des éprouvettes compactées à l'OPN, la figure 5b les chemins de déformation ( $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_r$ ) et la figure 5c les chemins des contraintes totales. L'origine de ces chemins est située sur une droite du plan ( $p$ ,  $q$ ) de pente  $-3/2$  où la contrainte axiale est constante ( $\sigma_a = 100$  kPa) et  $\sigma_r$  égale à 100, 50 et 33 kPa respectivement. Le détail des courbes contrainte-déformation ( $\epsilon_a$ ,  $q$ ) au début du chargement est donné sur la figure 6 et montre deux traits particuliers du comportement de l'argile compactée :

- une courbure continue depuis l'origine,
- une pente initiale plus forte en extension qu'en compression.

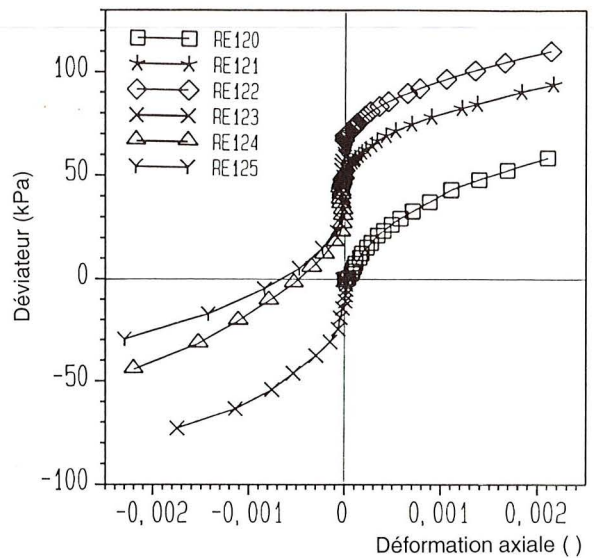


Fig. 6 - Essais triaxiaux pseudo-drainés sur l'argile compactée non saturée. Détail des courbes contrainte-déformation.

La courbure indique une décroissance du module de déformation avec l'augmentation de la déformation axiale. Le module de déformation sécant est plus grand en extension qu'en compression. Ce résultat semble assez général pour les sols. Les courbes contrainte-déformation d'extension s'apparentent aux courbes de décharge après compression, comme le montre la figure 5a où le cisaillement en compression a été prolongé par une phase de décharge et un début d'extension. Le coefficient de Poisson est déduit de la pente des chemins de déformation ( $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_r$ ). Il varie suivant l'état initial des contraintes, mais il varie aussi et surtout avec l'état initial de teneur en eau et de compacité de l'argile compactée.

Les essais triaxiaux sur éprouvettes saturées se déroulent en trois phases, après compactage semi-statique : saturation par circulation d'eau désaérée sous 300 kPa de contre-pression, consolidation isotrope, puis cisaillement en condition

drainée en compression ou en extension. Les figures 7a, 7b et 7c représentent les résultats d'un essai triaxial pour l'argile compactée à l'OPN puis saturée. L'argile compactée saturée présente une moindre résistance que l'argile compactée non saturée. Mais la mesure du frottement et de la cohésion apparente n'a pas été effectuée systématiquement, cette étude expérimentale privilégiant plutôt les mesures de déformabilité de l'argile compactée.

Les modules sécants  $E$  sont mesurés à partir des courbes contrainte-déformation ( $\epsilon_a, q$ ) à différents niveaux de contrainte axiale. La figure 8a représente ces modules pour les six éprouvettes compactées à l'OPN et cisailées en compression et en extension à partir des différentes contraintes de consolidation anisotrope. Les modules diminuent avec l'accroissement de la déformation. Des essais avec des cycles de chargement et de déchargement montrent en fait une accumulation progressive de déformations irréversibles. La figure 8b montre l'évolution du rapport des modules de compression et d'extension  $E_c/E_e$ , pour un même rapport des contraintes de consolidation anisotrope  $q_c/p_c$ . Ce rapport diminue, ce qui indique que la courbure est plus prononcée en extension qu'en compression. C'est un trait général du comportement des sols. La rupture (palier ou pic de résistance) est atteinte pour une plus petite déformation en extension qu'en compression. Le rapport augmente aussi avec le rapport des contraintes  $q_c/p_c$ . Plus l'état des contraintes est anisotrope et s'approche de l'état de rupture en compression, plus le module de compression est petit et le module d'extension est grand. On peut s'attendre à trouver une tendance opposée à proximité de l'enveloppe de rupture en extension.

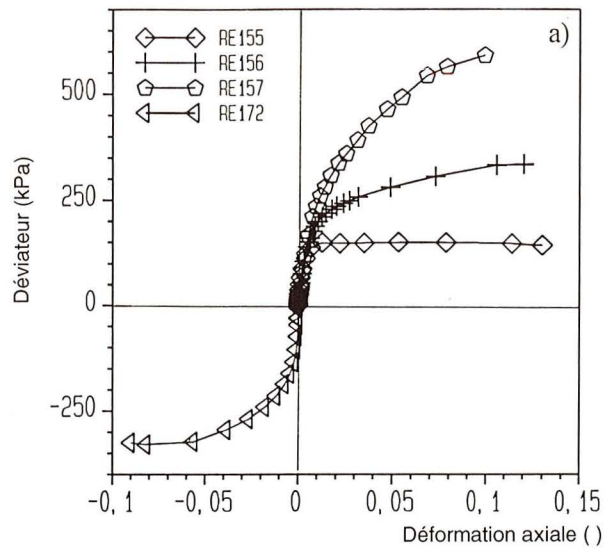
La figure 8c représente l'évolution du module sécant en fonction de la déformation axiale pour des éprouvettes non saturées (RE120 et RE123) et une éprouvette saturée (RE155), consolidées sous 100 kPa de pression isotrope. Le module de l'argile saturée est ici un peu plus grand que celui de l'argile non saturée. Mais, dans d'autres cas, le module de l'argile saturée est plus faible, notamment du côté sec de la ligne des optima Proctor.

Les caractéristiques de déformabilité et de résistance de l'argile compactée non saturée ont été reliées aux caractéristiques d'état ( $w$  et  $e$ ) après compactage au moyen de relations du type :

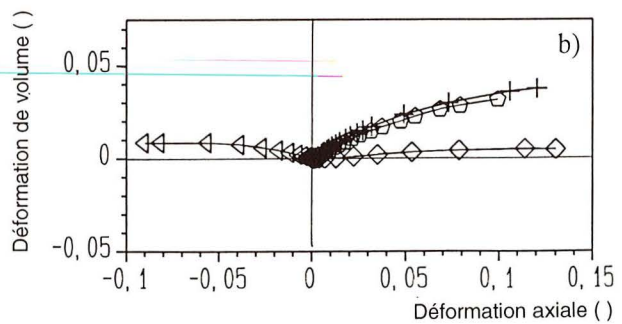
$$L(C_m) = a_0 + b_1 w + b_2 e$$

où  $L$  est une fonction linéaire ou logarithmique de la caractéristique  $C_m$  considérée et  $a_0, b_1$  et  $b_2$  des constantes. Il semble que ce type de relation s'applique à d'autres matériaux compactés,  $C_m$  pouvant représenter un module de déformation, le coefficient de Poisson, la résistance en compression ou

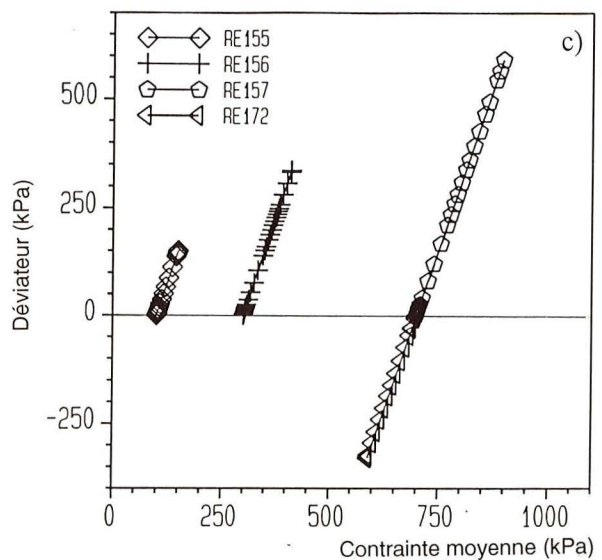
**Fig. 7 - Essais triaxiaux drainés sur l'argile compactée saturée.  
Argile compactée à l'OPN**



a. Courbes contrainte-déformation.

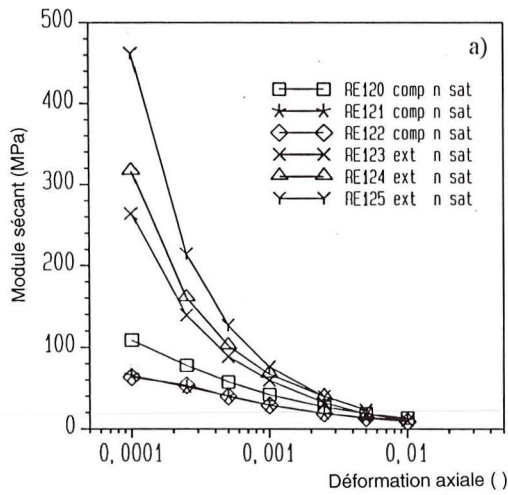


b. Chemins de déformation.

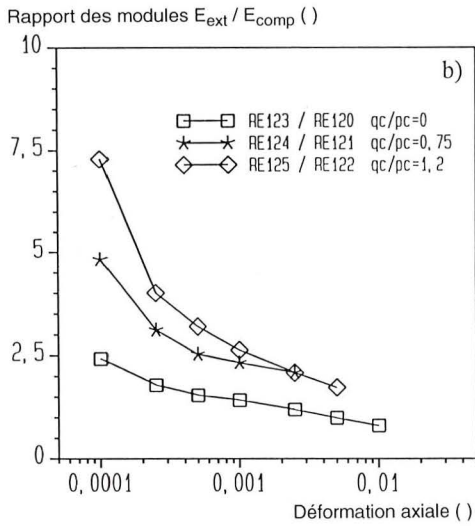


c. Chemin des contraintes effectives.

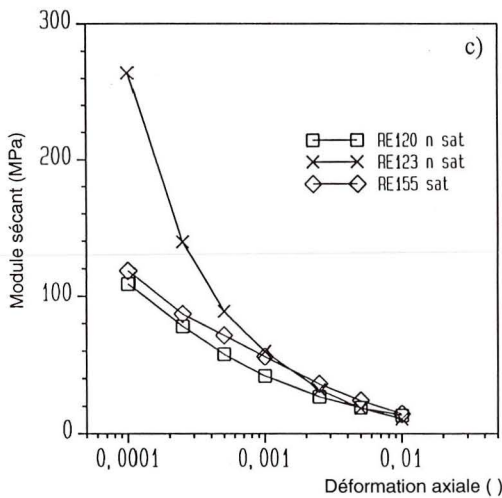
**Fig. 8 - Module d'Young sécant en fonction de la déformation axiale. Argile compactée à l'OPN**



a. Chargement en compression et en extension, argile non saturée.

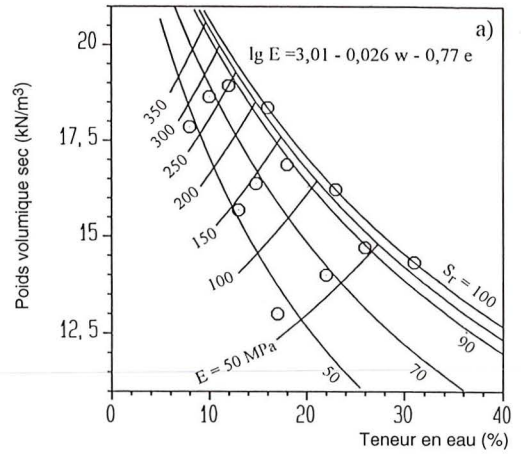


b. Rapport du module d'extension au module de compression.

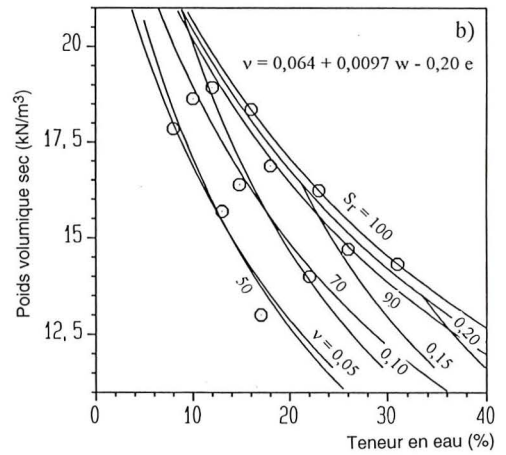


c. Argile compactée non saturée et argile saturée ( $\sigma_{ai} = 100$  kPa).

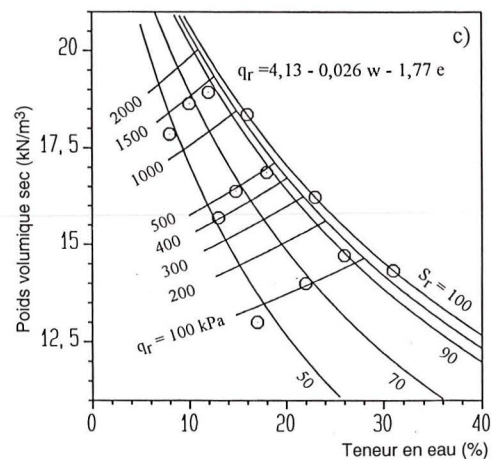
**Fig. 9 - Paramétrage du plan d'état en déformabilité, en coefficient de Poisson ou en résistance pour l'argile compactée non saturée**



a. Déformabilité.



b. Coefficient de Poisson.



c. Résistance.

en traction, voire la succion, etc. Les relations suivantes permettent de décrire les propriétés mécaniques de l'argile compactée à partir de ses caractéristiques d'état après compactage:

$$\begin{aligned} \lg E_{0,0001} &= 3,01 - 0,026 w - 0,77 e \\ \nu &= 0,064 + 0,0097 w - 0,20 e \\ \lg q_{r100} &= 4,13 - 0,026 w - 1,77e \end{aligned}$$

où

- $E_{0,0001}$  : le module sécant à une déformation axiale de 0,0001 (0,01 %),
- $\nu$  : le coefficient de Poisson,
- $q_{r100}$  : la résistance en compression sous 100 kPa de confinement. La figure 9 représente le plan d'état ( $w, \gamma_d$ ) paramétré par les relations ci-dessus. On peut noter que les iso-valeurs de  $E_{0,0001}$  et de  $q_{r100}$ , qui sont des droites dans le plan ( $w, e$ ) et des hyperboles dans le plan ( $w, \gamma_d$ ), sont orientées approximativement comme les branches des courbes Proctor côté sec. Le compactage à une énergie donnée confère donc aux matériaux des caractéristiques de déformabilité (fig. 9a) et de résistance (fig. 9c) d'un certain niveau. Le coefficient de Poisson, au contraire, semble plus gouverné par le degré de saturation (fig. 9b).

## Effets de l'imbibition

L'effet de l'imbibition en cours d'essai est mis en évidence à l'aide d'essais œdométriques (fig. 2), d'essais triaxiaux (fig. 5 et 7), d'essais œdométriques en parallèle et d'essais triaxiaux de fluage. Deux séries d'essais de gonflement-effondrement en parallèle (six éprouvettes par essai) ont été réalisées sur des éprouvettes d'argile compactée à l'OPN (série 1) et compactée à sec (série 2). Cette procédure d'essais œdométriques en parallèle a été développée au LRPC de Toulouse (Mieussens, 1993) dans le but de qualifier les matériaux compactés. L'argile est préparée par compactage semi-statique dans les moules œdométriques (plaques poreuses sèches et papier filtre), puis les éprouvettes sont chargées dans cet état et sous 30, 50, 100, 200, 400 et 800 kPa de contrainte totale axiale ( $\sigma_a$ ) respectivement, pendant trois jours. Les éprouvettes sont alors mises en présence d'eau désaérée pendant quatre jours supplémentaires (ces essais de qualification doivent se dérouler en une semaine pour rester praticables). L'évolution du tassement est enregistrée au cours du temps. Suivant la nature du matériau testé, l'état du matériau et le niveau de chargement, cette opération peut provoquer un effondrement ou un gonflement.

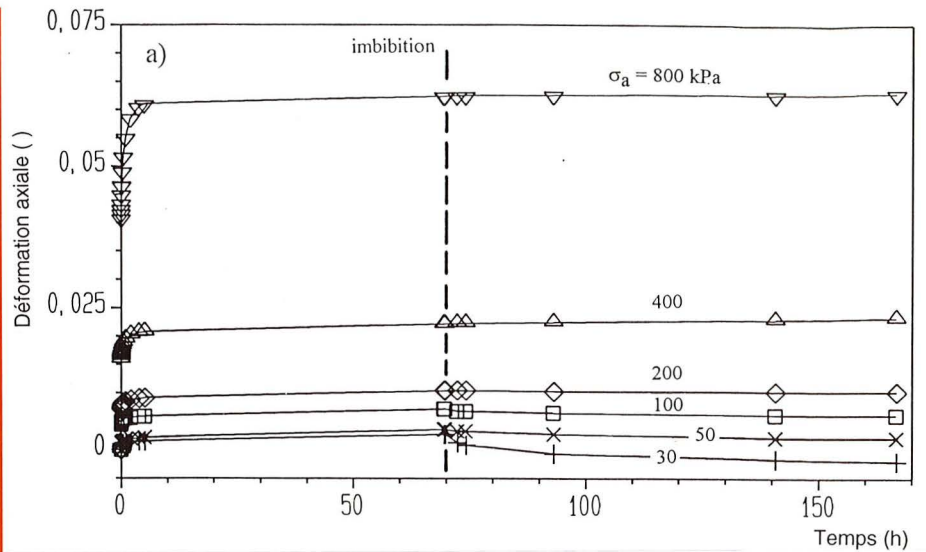
La figure 10a représente l'évolution de la déformation axiale en fonction du temps pour les

six éprouvettes compactées à l'OPN (série 1), la figure 10b pour les éprouvettes compactées du côté sec de l'OPN (série 2). Les caractéristiques initiales de l'argile compactée sont données sur la figure 10b. Dans le premier cas, la déformation de l'argile augmente assez largement avec le niveau de chargement, avec plus de 6 % sous 800 kPa, ce niveau de contrainte axiale étant largement supérieur à la contrainte de compactage (300 kPa environ). Par contre, l'imbibition ne provoque pas de modification du régime de la déformation pour des charges supérieures à 400 kPa. En dessous de ce niveau de la contrainte axiale, des déformations de gonflement sont enregistrées, d'autant plus fortes que la contrainte axiale est faible. Pour la série 2, la réponse de l'argile compactée sèche est bien différente. Pour les fortes charges (supérieures à 100 kPa), l'imbibition provoque un effondrement. Au contraire, l'imbibition entraîne le gonflement de l'argile pour les faibles charges.

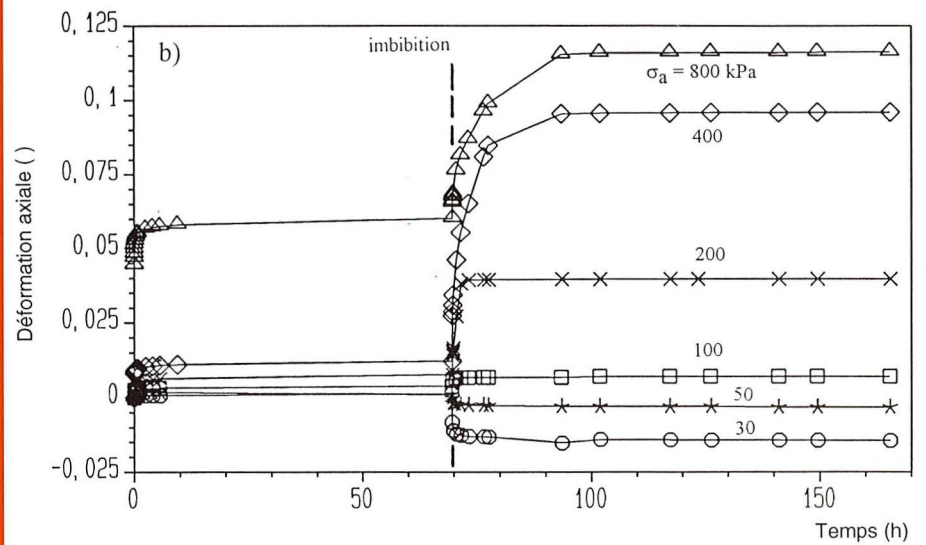
Au-delà de ces tendances, prévisibles en regard du comportement des sols non saturés, il est intéressant de remarquer que l'amplitude des déformations dépend grandement de l'état initial du matériau. L'argile compactée à l'OPN présente peu de déformation et se trouve relativement stable vis-à-vis de l'imbibition, contrairement à l'argile compactée à sec. Cet exemple est bien sûr extrême, mais il illustre la capacité de cette procédure d'essai à qualifier un matériau compacté sur le plan de sa sensibilité à l'eau.

Un autre aspect du comportement de l'argile compactée est illustré par des essais triaxiaux de fluage, comme l'indique la figure 11. Deux éprouvettes de l'argile sont compactées à l'OPN par compactage semi-statique. Un confinement de 100 kPa et un déviateur de 100 kPa sont appliqués en quatre paliers de 15 min. Puis la charge axiale est maintenue constante pendant 500 h environ. L'une des éprouvettes est déchargée (RE153), l'autre au contraire (RE154) est chargée sous un déviateur de 155 kPa (les déviateurs de 100 et 155 kPa correspondent à 57 et 89 % du déviateur de rupture respectivement pour l'argile compactée à l'OPN sous 100 kPa de confinement). La figure 11 montre l'évolution de la déformation axiale en fonction du temps. L'imbibition sous le déviateur de 100 kPa (indiquée par une flèche sur la figure) montre un léger gonflement suivi d'une stabilisation de la déformation. L'imbibition sous le déviateur de 155 kPa provoque au contraire une accélération temporaire de la vitesse de déformation. Cette déformation reste néanmoins limitée, de l'ordre de 0,7 %.

Fig. 10 - Déformation axiale en fonction du temps pour six éprouvettes. Essais œdométriques en parallèle avec imbibition à t = 70 h

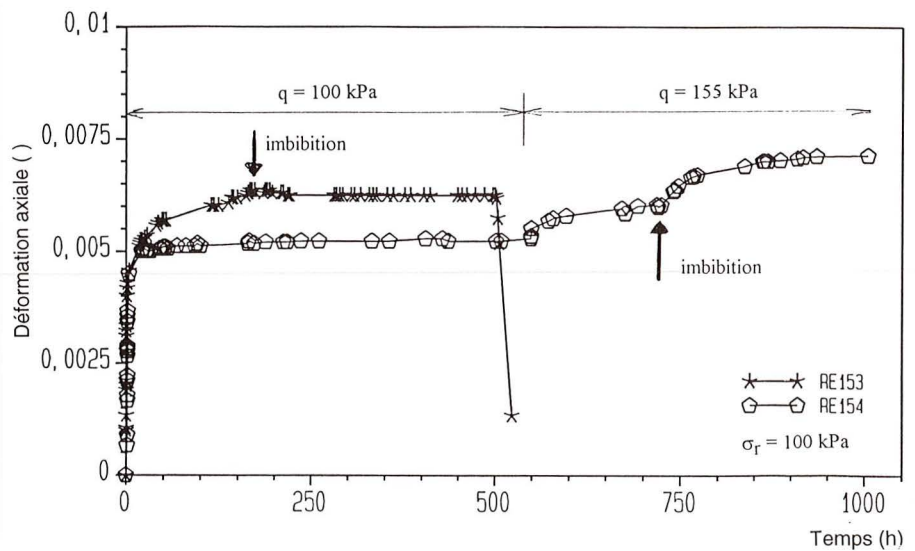


a. Argile compactée à l'OPN ( $w_i = 18,2\%$ ,  $\gamma_d = 17,0 \text{ kN/m}^3$ ).



b. Argile compactée du côté sec ( $w_i = 13,2\%$ ,  $\gamma_d = 15,8 \text{ kN/m}^3$ ).

Fig. 11 - Essais de fluage avec imbibition sur deux éprouvettes d'argile compactée à l'OPN



## Conclusion

Cette étude expérimentale pose plus de problèmes qu'elle n'en résout, mais apporte néanmoins un certain nombre d'indications sur le comportement mécanique des matériaux compactés. Le suivi du compactage semi-statique permet de définir une surface d'état liant la teneur en eau, la compacité du sol compacté et la contrainte de compactage mise en jeu pour aboutir à cette compacité. Cette surface ne vaut que dans les conditions de préparation et de compactage adoptées ici. Elle n'est pas unique pour un sol donné, mais elle permet d'associer à chaque état du matériau compacté un paramètre représentatif de l'histoire très récente du compactage. La forme de cette surface permet d'expliquer en partie l'allure et la position des courbes de compactage Proctor qui diffèrent d'un matériau à l'autre. Il est possible d'associer aux courbes Proctor un niveau de compactage statique.

Un essai œdométrique  $K_v$  a mis en évidence l'effet de la vitesse de chargement et de déchargement pendant le compactage semi-statique de l'argile étudiée. Ce cas de chargement n'est pas directement transposable au compactage d'une couche de remblai, mais il révèle la complexité du comportement du sol non saturé en cours de compactage et pose le problème de la connaissance de l'état initial de contrainte en fin de construction d'un remblai.

La déformabilité de l'argile compactée dépend de son état de teneur en eau et de compacité, de l'état des contraintes totales initiales et de la direction du chargement. Des déformations plastiques naissent très tôt pour un chargement en direction de l'enveloppe de rupture la plus proche et les courbes contrainte-déformation sont courbes. L'imbibition agit fortement sur la résistance de l'argile compactée en la diminuant (par modification de la succion). Par contre, son influence sur la déformabilité de l'argile n'est pas aussi marquée du fait de la naissance de déformations de gonflement ou d'effondrement suivant l'état de compacité de l'argile et l'état des contraintes. Compactée à l'OPN, l'argile semble peu sensible à l'effet de l'imbibition. Le chargement sous des niveaux de contrainte élevés entraîne des déformations différées dans le temps. L'effet de l'imbibition, qui se manifeste par un gonflement ou un effondrement, dépend de l'état de compacité de l'argile, mais aussi de l'état de contrainte initial.

Le compactage confère à l'argile ses propriétés mécaniques de déformabilité et de résistance qui peuvent être reliées aux caractéristiques d'état représentées à la fois par la teneur en eau et l'indice des vides. Les relations empiriques proposées, de la forme  $(w, e, L[C_m])$ , permettent une estimation raisonnable du paramètre mécanique  $C_m$  en fonction de  $w$  et  $e$ , avec  $L$  une fonction logarithmique dans le cas du module de déformation et de la résistance.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALONSO E. (1993), Effet des variations de la teneur en eau dans les sols compactés, *Revue Française de Géotechnique*, **62**, pp. 7-21.

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 p.

DUNCAN J.M., SEED R.B. (1986), Compaction-induced earth pressures under  $K_v$ -conditions, *J. Geotech. Engrg.*, vol. 112, **1**, pp. 1-22.

GTR 92 (1992), *Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme*, LCPC-SETRA, Fascicules I et II, sept.

MIEUSSENS C. (1980), *Influence du compactage, de la teneur en eau et de ses variations ultérieures sur le comportement des grands remblais en marne*, Colloque Int. sur le Compactage, Paris, **vol. 1**, pp. 163-168.

MIEUSSENS C. (1987), *Influence de l'état hydrique sur le comportement des argiles en remblai*, Journées de Physique des LPC, Les Arcs, L'eau dans les matériaux, pp. 131-135.

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.

MOUSSAI B., DIDIER G. (1992), *Compactage statique et perméabilité des sols fins*, Colloque R. Houpert, Nancy, pp. 123-132.

SEED R.B., DUNCAN J.M. (1986), FE analysis : compaction-included stresses and deformations, *J. Geotech. Engrg.*, vol. 112, **1**, pp. 23-43.

SERRATRICE J.-F. (1995), *Comportement d'une craie compactée*, Colloquium Mundanum Craies et schistes, Bruxelles, pp. 1.1.71-1.1.80.

VUAILLAT P. (1980), *Propriétés visqueuses d'une argile. Expérience et formulation incrémentale*, Thèse de Docteur-Ingénieur, IMG, université de Grenoble.

*Ce travail a été accompli dans le cadre d'un contrat de recherche Scétauroute (n°51.4665.43). Le prélèvement de l'argile, sa préparation et la réalisation des essais d'identification ont été effectués au LRPC de Toulouse.*