

COMPRESSIBILITÉ DES SÉDIMENTS MARINS GRANDE PROFONDEUR À TRÈS FORTES LIMITES DE LIQUIDITÉ

MAHDIA HATTAB

Laboratoire Physique et Mécanique des Matériaux, Université Paul Verlaine – CNRS UMR 7554,
Ile du Saulcy 57045 Metz – France. mahdia.hattab@ecp.fr

JEAN-LOUIS FAVRE

Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux,
Ecole Centrale Paris – CNRS UMR 8579, Grande voie des vignes 92295 Châtenay Malabry – France.

Résumé: Le passage progressif du comportement non remanié (sol intact) vers le comportement remanié est ici analysé sur une argile, caractérisée par une très forte limite de liquidité, provenant de sédiments marins par grande profondeur dans le Golfe de Guinée. Les résultats obtenus sont comparés d'une part, au comportement de référence des argiles minérales remaniées normalement consolidées établi par BIAREZ et FAVRE [1], et d'autre part à la courbe de compression intrinsèque (ICL) proposée par BURLAND [4]. L'étude par voie mécanique est appuyée par une approche locale d'analyse micro-structurale du sédiment au porosimètre à mercure.

Abstract: The progressive transition from the non-remoulded behaviour (natural soil) to remoulded behaviour is here investigated. Tests were performed on a deepwater clay sediments from the Gulf of Guinea characterized by a very high liquid limit. The results are analysed and compared on one hand with the reference behaviour of remoulded normally consolidated mineral clays established by BIAREZ and FAVRE [1], and on the other hand with intrinsic compression (ICL) curve proposed by BURLAND [4]. The study is supplemented with a local approach of microstructural analysis, using mercury porosimetry method.

1. INTRODUCTION

Les paramètres d'identification liés à la nature minéralogique des particules, et représentés par les limites d'Atterberg (w_L , w_P , I_p), et les paramètres physiques (e ou w_{nat} ...) qui traduisent l'arrangement spatial des particules, permettent de résumer les propriétés des sédiments argileux. Les particules peuvent être liées entre elles par une cimentation (colle selon Biarez) développée au cours du temps lors du processus de sédimentation et de consolidation. Le terme « non remanié » désigne une argile ainsi structurée et la cimentation apparaît comme un paramètre supplémentaire influençant le comportement phénoménologique (NG et al. [9]; BIAREZ et al. [2]). Le terme « remanié » désigne le sol dont la cimentation a été détruite par un remaniement au laboratoire, le comportement du matériau remanié et reconstitué (à $w_{sat} = 1,5 w_L$) dépendra alors uniquement du tenseur de contrainte appliqué (BIAREZ et HICHER [3]). Son étude dans les conditions normalement consolidées est fondamentale, car elle

permet de déduire les propriétés mécaniques « intrinsèques » (BURLAND [4]) et de constituer ainsi un repère fixe pour l'évolution du comportement des sols en place non remaniés (BIAREZ et FAVRE [1]). Le chemin oedométrique, exprimant l'évolution de l'indice des vides e en fonction de la contrainte effective verticale σ'_v , dans un sédiment argileux normalement consolidé non remanié va évoluer au dessus de la droite de pente C_c (du comportement normalement consolidé), puis, rejoindre celle-ci, mettant en évidence une « surconsolidation » apparente qui traduit le début de la destruction (rupture) de la cimentation entre les particules. Cette rupture progressive du ciment appelée déstructuration par LEROUEIL et al. [6] est totale lorsque le chemin rejoint en fortes contraintes celui du comportement remanié. Une analyse de l'évolution de l'état non remanié vers l'état remanié sur chemin oedométrique est proposée dans cette étude, sur une argile caractérisée par une forte limite de liquidité, provenant de sédiments marins par grande profondeur dans le Golfe de Guinée (argile GoG).

2. DESCRIPTION ET PROPRIÉTÉS DE L'ARGILE GOG

Une carotte STACOR de 17 m de long a été prélevée par 700 m de fond sur le *site B* au large du Golfe de Guinée. Elle a été débitée en tronçons de 1 m, numérotés en fonction de leur profondeur (figure 1). Le matériau apparaît comme une argile hétérogène très plastique de couleur gris foncé, saturée, et comportant de nombreux

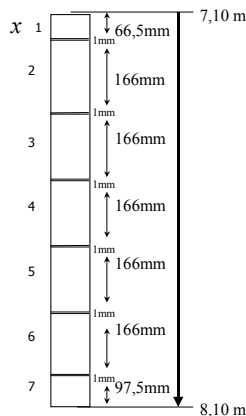


Fig. 1. Carotte Stacore de l'argile GoG tronçon (7-8)

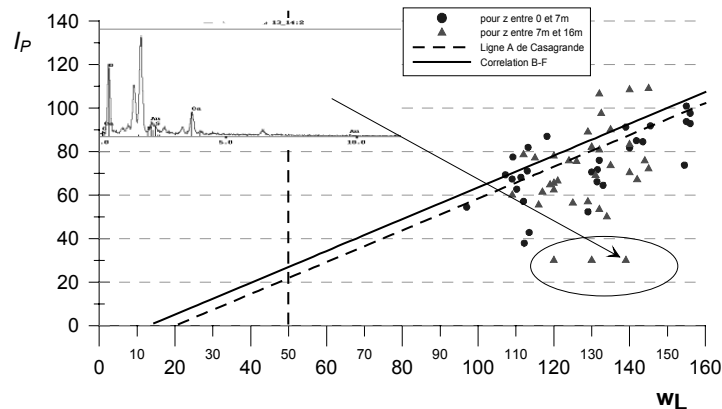


Fig. 2. Propriétés de l'argile GoG dans ($I_p - w_L$)

débris coquillés. L'identification des fractions argileuses (de 20 à 60%) par analyses de diffraction aux rayons X (THOMAS et al. [10]) montre qu'elle serait constituée d'environ 50% de kaolinite et de 15 à 25% de smectites. La proportion en matières organiques est

de l'ordre de 6% et la teneur en carbonates est comprise entre 5 et 15%. Toutefois, l'identification des propriétés de l'argile GoG par ses limites d'Atterberg dans le diagramme (I_p, w_L) , représenté en figure 2 avec la ligne *A* de Casagrande et l'abaque *B-F* (BIAREZ et FAVRE [1]), semble faire correspondre ces sédiments à des argiles de type smectite hormis quelques points à I_p faible (mesurées à 8,39 m, 8,89 m et 12,89 m) qui témoignent d'une légère présence d'éléments organiques.

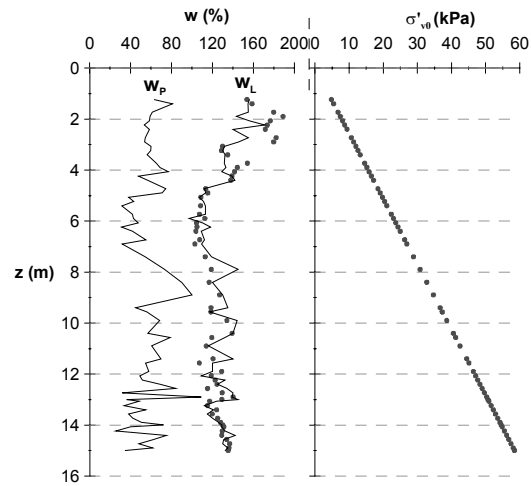


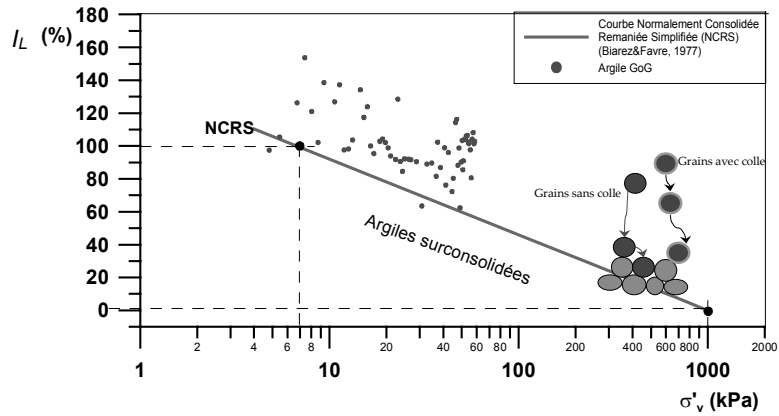
Fig. 3. Profil de la teneur en eau et de la contrainte effective en place

Les limites de liquidité et de plasticité (w_L et w_p) représentées en fonction de la profondeur (figure 3) varient de 160% à 110% pour w_L et de 90% à 30% pour w_p . Les plus fortes limites w_L se situent dans les premières couches, pour se stabiliser autour de 120% vers 7 à 8 m de profondeur. Le profil de la teneur en eau w_{nat} affiche en figure 3 de très fortes valeurs très proches (parfois supérieures) de la limite de liquidité, particulièrement en surface entre 1 et 5 m, avec des valeurs allant jusqu'à 180%. w_{nat} n'étant pas constant, σ'_v ne varie pas linéairement en fonction de la profondeur. Néanmoins par effet d'intégration (lissage) la déviation par rapport à la linéarité est très faible. Le poids spécifique des grains solides, et de l'eau de mer étant respectivement $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ et $\gamma_w = 10,2 \text{ kN/m}^3$ (FAVRE et HATTAB [7]).

Dans les corrélations *B-F* proposées, les argiles minérales, remaniées, normalement consolidées doivent satisfaire l'équation (1), représentée dans le plan (I_L, σ'_v) par la droite *NCRS* (Normalement Consolidée Remaniée Simplifiée) en figure 4. σ'_v étant la contrainte axiale effective sur chemin oedométrique et I_L l'indice de

$$\text{liquidité} \left(I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \right).$$

$$I_L = 0,46(3 - \log \sigma'_v). \quad (1)$$

Fig. 4. Variation $I_L - \sigma'_v$

Ainsi, un sol remanié normalement consolidé sera représenté par un point sur la *NCRS*, les sols surconsolidés par des points en dessous de la droite. Dans ce même plan en figure 4, les sédiments de l'argile GoG représentés par leurs indices de liquidité et par les contraintes verticales effectives en place σ'_{v0} correspondantes, donnent un nuage de points situé au dessus de la *NCRS*. Une structure avec un arrangement particulier de «grains» liés entre eux est alors mise en évidence. Le liant (pouvant être une légère cohésion de type physico-chimique) empêche les «grains» de se resserrer «normalement», comme cela pourrait être observé dans une argile remaniée reconstituée au laboratoire. La représentation très schématique du phénomène intégrée à la figure 4, montre qu'un grain sans colle lors de la sédimentation va chercher le point géométrique où il serait le plus stable, alors qu'un grain avec colle s'arrête au premier contact, et induit un indice des vides plus grand (BIAREZ et al. [2]).

3. COMPRESSIBILITÉ DE L'ARGILE GOG

3.1. COMPORTEMENT DE RÉFÉRENCE

A partir d'un grand nombre de résultats collectés sur des sols argileux remaniés, BIAREZ et FAVRE [1] montrent que les chargements oedométriques de 6,5 kPa et 1000 kPa correspondent en moyenne respectivement aux indices des vides e_L et e_P , ainsi l'indice de compression C_c se trouve fortement corrélé aux limites d'Atterberg (figure 5). Il en découle la droite simplifiée *NCRS* décrite précédemment pour représenter, dans le plan $(I_L, \log \sigma'_v)$, le comportement des argiles remaniées reconstituées normalement

consolidées sur chemin oedométrique. BURLAND [4], en introduisant le concept des propriétés intrinsèques à la compression, complète la NCRS et décrit le comportement par l'équation (2) de la courbe *ICL* (Intrinsic Compression Line) dans le plan normalisé ($I_v, \log \sigma'_v$) (σ'_v reste exprimée en kPa). I_v étant un indice des vides normalisé (3) basé sur deux valeurs caractéristiques de l'indice des vides e_{100}^* et e_{1000}^* à $\sigma'_v = 100$ kPa et $\sigma'_v = 1000$ kPa de la courbe de chargement oedométrique.

$$I_v = 2,45 - 1,285 \log \sigma'_v + 0,015 (\log \sigma'_v)^3, \quad (2)$$

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*}, \quad (3)$$

$$C_c^* = e_{100}^* - e_{1000}^*. \quad (4)$$

Les deux paramètres particuliers e_{100}^* et e_{1000}^* sont par ailleurs corrélés par (5) au seul paramètre de « Nature des Grains », $e_L = (\gamma_s / \gamma_w) w_L$. Ce sont du reste des paramètres de « Nature des Grains » au sens de Biarez–Favre. Si on exprime le modèle (2) de Burland dans le plan ($I_L, \log \sigma'_v$) on obtient la relation (6). ζ et χ sont des paramètres liés par (7) aux limites e_L et e_P , elles mêmes définies par leurs valeurs expérimentales. Ainsi dans ($I_L, \log \sigma'_v$), la *ICL* devient un faisceau de courbes liées aux limites, et pour l'argile GoG en particulier, elle est $ICL_{(s-m)}$ une courbe qui se situe en dessous de la NCRS dans le domaine des fortes limites w_L (figure 6).

$$\begin{cases} e_{100}^* = 0,109 + 0,679e_L - 0,089e_L^2 + 0,016e_L^3, \\ C_c^* = e_{100}^* - e_{1000}^* = 0,256e_L - 0,04, \end{cases} \quad (5)$$

$$I_L = \frac{1}{\zeta} [2,45 - 1,285 \log \sigma'_v - 0,015 (\log \sigma'_v)^3 + \chi], \quad (6)$$

$$\begin{cases} \zeta = \frac{e_L - e_P}{0,256e_L - 0,04}, \\ \chi = \frac{0,109 + 0,679e_L - 0,089e_L^2 + 0,016e_L^3 - e_P}{0,256e_L - 0,04}. \end{cases} \quad (7)$$

3.2. CHEMINS OEDOMÉTRIQUES

La figure 5 représente, dans le plan ($e, \log \sigma'_v$), l'abaque *B–F* ainsi que le chemin oedométrique sur un échantillon du sous tronçon (*ST2 16–17*), caractérisé par: $\sigma'_{v0} = 61$ kPa; $w_L = 13,4\%$; $w_P = 51\%$, $e_0 = 3,15$. La contrainte maximale appliquée est $\sigma'_v =$

1050 kPa soit environ 17 fois la contrainte effective en place. La courbe obtenue met en évidence un comportement de type normalement consolidé non remanié, avec apparition d'un coude vers la contrainte $\sigma'_v = 80$ kPa. Ce coude qui définit une surconsolidation «apparente» est suivi de deux tendances: la première, caractérisée dans un domaine de faible contrainte (σ'_v : 90 kPa à 300 kPa) par l'indice $C_c = 2,06$, traduit une compressibilité associée à un processus de dégradation progressive de la cimentation entre les grains du matériau non remanié; la deuxième traduit une compressibilité caractérisée dans un domaine à plus fortes contraintes ($\sigma'_v > 300$ kPa) par un paramètre C_c différent du premier ($C_c = 1,12$) et qui concerne le matériau dont toute la cimentation entre les grains a été détruite. Cette deuxième tendance du comportement semble s'orienter vers la droite ($w_L - w_p$) (ST2 16-17) déterminée en tenant en compte de la densité des grains solides de l'argile GoG soit $\gamma_s / \gamma_w = 2,60$ (au lieu de 2,7 prévu dans l'abaque $B-F$). Nous retrouvons cette allure de courbe dans le plan ($I_L - \log \sigma'_v$), pour une série de chargements oedométriques sur des échantillons prélevés dans chaque tronçon de la carotte et dont les propriétés sont données en fonction de la profondeur en figure 3. Le coude de «surconsolidation apparente» se situe d'une manière générale au dessus de la $NCRS$. Les courbes convergent ensuite vers la courbe $ICL_{(s-m)}$, qui paraît ainsi être plus précise pour représenter l'état remanié des matériaux à très fortes limites de liquidité (De GENNARO et al. [5], FAVRE et HATTAB [8]). Ceci est particulièrement évident dans le cas des sous tronçons (ST5 9-10) et (ST2 16-10) dont le chargement atteint une contrainte de 1000 kPa.

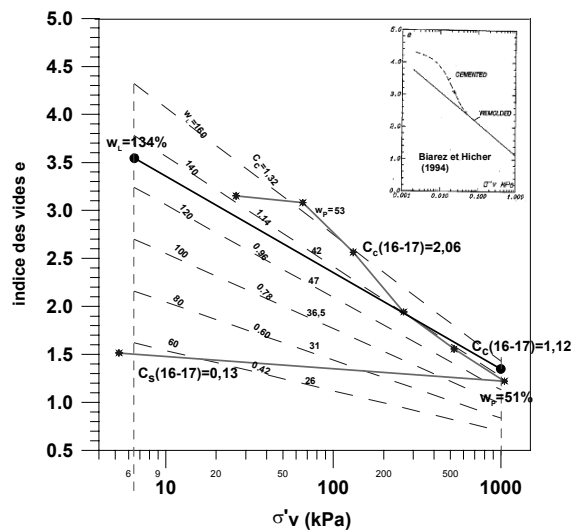


Fig. 5. Chemin oedométrique sur l'argile GoG

Ainsi, l'évolution de l'état de la structure, intégrant la destruction progressive de la cimentation des sédiments intacts, peut être approchée par la distance $\log(\sigma'_v / \sigma'_{ve}^*)$ entre la courbe oedométrique de l'échantillon intact et la $ICL_{(m-s)}$ (figure 7a). Le comportement peut être alors analysé dans le plan $(I_L - \log(\sigma'_v / \sigma'_{ve}^*))$ en figure 7b, le coude se traduisant par un pic ($\sigma'_y / \sigma'_{ve}^* = 8,5$) qui correspond à une limite d'élasticité associée au début de la destruction de la cimentation.

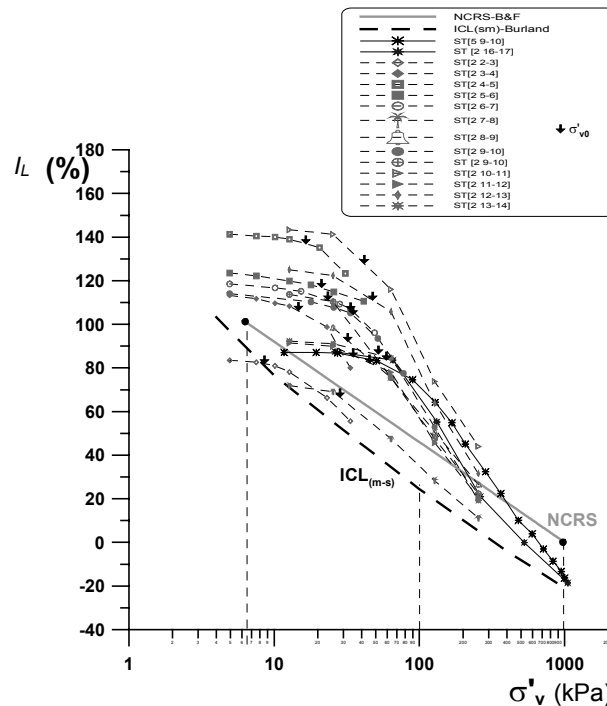


Fig. 6. Chemins oedométriques dans (I_L, σ'_v)

Le chemin post pic décroît progressivement, mettant en évidence un comportement linéaire caractérisé par la pente $\alpha = 0,051$, vers l'asymptote $\sigma'_v / \sigma'_{ve}^* = 1$ de l'état remanié figure 7c. En figure 7d sont représentés en fonction de la profondeur les pics $\sigma'_y / \sigma'_{ve}^*$ déduits des courbes oedométriques dans le plan $(I_L - \log \sigma'_v)$ (figure 6). Hormis deux résultats à $z = 4$ m et $z = 10$ m qui affichent une cimentation importante, globalement le profil obtenu montre une cimentation sensiblement équivalente entre 3 m et 17 m de profondeur et correspond à un rapport $\sigma'_y / \sigma'_{ve}^* = 10$.

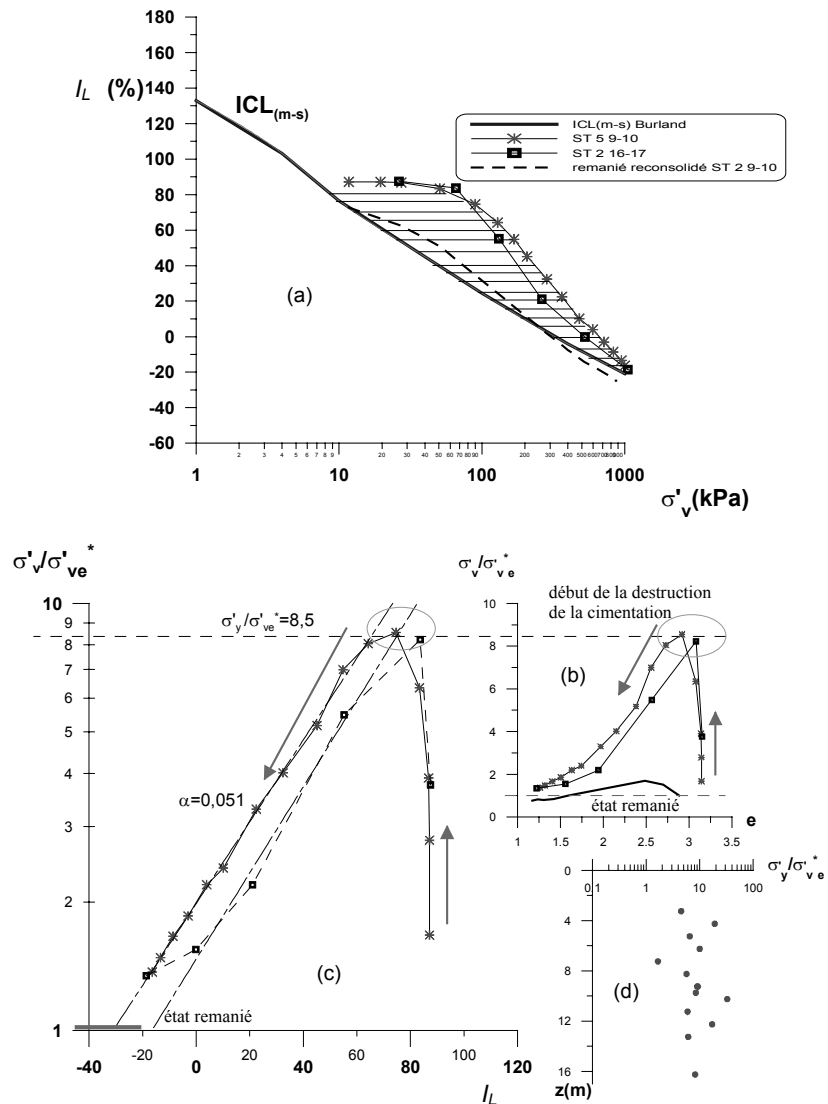


Fig. 7. Passage de l'état non remanié à l'état remanié

Analyse au porosimètre au mercure. Un essai de porosimétrie au mercure a été réalisé sur un échantillon d'argile intacte (ST6 9-10), et deux essais sur échantillons après chargement oedométrique à $\sigma'_v = 1000$ kPa (ST2 9-10: remanié et ST5 9-10: intact) (figure 8). A l'état initial on note une porosité particulièrement importante avec un diamètre d'accès moyen vers $D = 1 \mu\text{m}$. Une zone de plus petite porosité se distingue vers un diamètre d'accès de $D = 0,06 \mu\text{m}$. Après chargement oedométrique

sur l'argile naturelle (ST5 9–10), les macro-pores dans l'intervalle $D = 3 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$ ont totalement disparus laissant place à des pores plus petits vers un diamètre d'accès $D = 0,2 \mu\text{m}$ montrant une réduction significative de la porosité globale. Ce diamètre d'accès moyen, par ailleurs est identique à celui obtenu dans l'argile remaniée (ST2 9–10). Ce qui conforte le fait qu'au niveau local également, sous chargement oedométrique et à fortes contraintes, l'état non remanié rejoint l'état remanié.

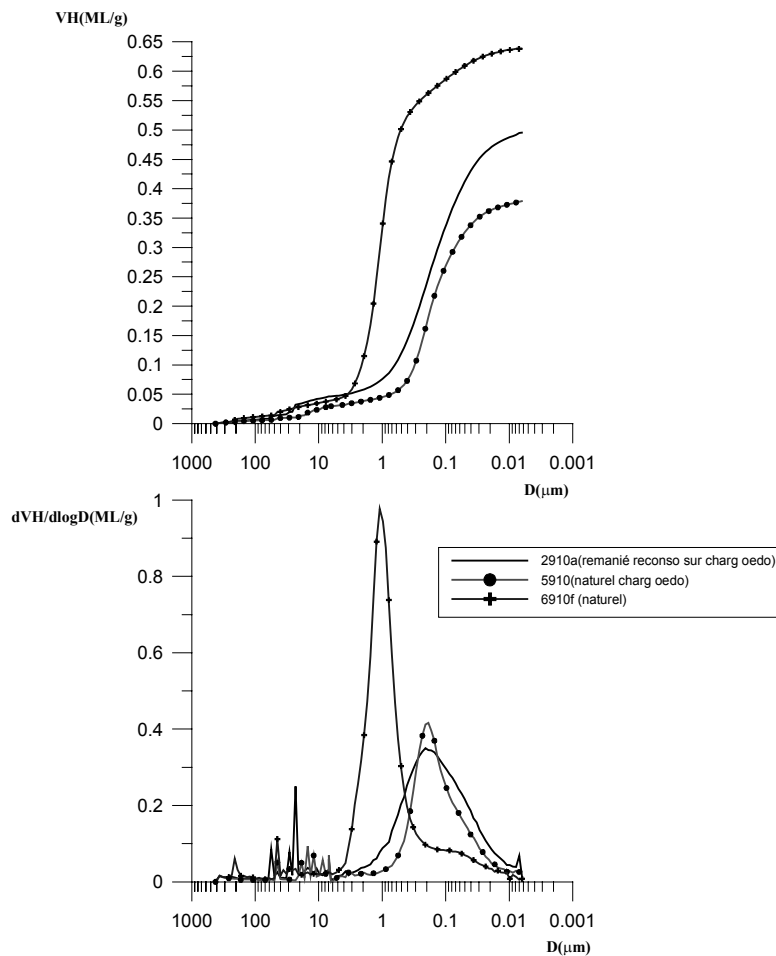


Fig. 8. Evolution de la microstructure par analyse au PAM

4. CONCLUSIONS

Les sédiments marins analysés se présentent comme une argile hétérogène très plastique de type smectite, avec une structure de «grains» liés entre eux par une

cimentation. Celle ci apparaît sous forme d'un pic sur le chemin oedométrique. La relation de Burland à travers la $ICL_{(m-s)}$ semble être plus adaptée pour représenter le comportement remanié des argiles normalement consolidées. L'évolution de l'état de la structure, intégrant la destruction progressive de la cimentation des sédiments intacts, peut être approchée par la distance entre la courbe oedométrique sur l'argile intacte et la $ICL_{(m-s)}$. L'analyse ainsi menée montre un comportement sensiblement linéaire dans le plan $(I_L - \log \sigma'_v)$. Au niveau local, les essais de porosimétrie au mercure appuient les résultats obtenus au niveau global et montrent que, sous chargement oedométrique à $\sigma'_v = 1000$ kPa, le diamètre moyen des pores, dans l'argile remaniée et dans l'argile non remaniée, est identique.

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient la société Fugro-France qui a mis à leur disposition les 17 tronçons de la carotte Stacor du site B, ainisi que le CLAROM dans le cadre duquel s'est faite cette étude et qui l'a financée, et plus spécialement MM. Meunier, Nauroy et Puech pour les échanges scientifiques avec eux.

RÉFÉRENCES

- [1] BIAREZ J., FAVRE J.L., *Statistical estimation and extrapolation from observations*, Rapport à la Session Spec. N°6, C.R. du 9^{ème} congrès Int. Méc. Sols Trav. Fond, 1977, Vol. 3, p. 505, Tokyo.
- [2] BIAREZ J., FAYAD T., TAILLEZ S., GOMES CORREIA A., FLAVIGNY E., BRANQUE D., *Argiles et craies du tunnel sous la manche – grains sans et avec colle*, 2nd International Conference on Hard Soil and Soft Rocks, Balkema, 1998, Vol. 1, 437–445, Napoli.
- [3] BIAREZ J., HICHER P.Y., *Elementary mechanics of soils behaviour. Saturated remoulded soils*, A.A.Balkema, 1998, Rotterdam, Brookfield.
- [4] BURLAND J.B., *On the compressibility and shear strength of natural clays*, Géotechnique, 1990, Vol. 40, No. 3, 329–378.
- [5] De GENNARO V., PUECH A., DELAGE P., *On the compressibility of deepwater sediments of the Gulf of Guinea*, Proc. Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, 2005, Australia.
- [6] LEROUEIL S., TAVENAS F., BRUCY F., LA ROCHELLE P., ROY M., *Behaviour of destructured natural clays*, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., 1979, 105, GT6, 759–778.
- [7] FAVRE J.-L., HATTAB M., *Propriétés des argiles marines de grande profondeur*, Revue Française de Géotechnique, 2006, 116, 3–13.
- [8] FAVRE J.-L., HATTAB M., *Analysis of “Biarez-Favre” and “Burland” models of the compressibility of remoulded clays*, 2007, manuscrit accepté à Comptes Rendus Géoscience.
- [9] NG C., BOLTON M., DASARI G., *The small strain stiffness of a carbonate stiff clay*, Soils and Foundations, 1995, Vol. 35, No. 4, 109–114.
- [10] THOMAS F., REBOURS B., NAUROY J.-F., MEUNIER J., *Minerological characteristics of Gulf of Guinea deepwater sediments. Frontiers in offshore Geotechnics ISFOG 2005*, Proc. Int. Symp., Perth, 19–21 Sept., 2005, Rotterdam, Balkema.