

Caractérisation mécanique des sols marins grande profondeur

Jacques MEUNIER*, Hedi DENDANI**, Jean-François NAUROY***, Alain PUECH****

*Ifremer, **Total, ***IFP, ****Fugro-France

RESUME

Dans le cadre du CLAROM (Club pour les Actions de Recherche sur les Ouvrages en Mer), le projet « Sols Marins Grande Profondeur » est conduit afin de mieux cerner les caractéristiques particulières physiques et mécaniques des sols marins rencontrés en mer profonde (très forte teneur en eau, faibles valeurs de confinement, fort indice de plasticité, remaniement des échantillons prélevés) par des essais de laboratoire spécifiques. L'objectif est de parvenir à prendre en compte les caractéristiques particulières de ces sols dans les méthodes de dimensionnement des ouvrages pour le développement des champs pétroliers profonds (fondations de structures posées au fond, ancrages des supports flottants, contact des risers avec le fond, pose des conduites sur le fond).

Les sols concernés par la présente étude se situent au-delà du plateau continental dans les zones d'intérêt pour l'exploitation pétrolière principalement sur les côtes Ouest de l'Afrique dans le Golfe de Guinée.

Total a mis à disposition du projet un certain nombre de carottes prélevées au carottier Kullenberg par des profondeurs d'eau de l'ordre de 1 400 m et plusieurs tronçons d'une carotte prélevée au carottier Stacor par une profondeur d'eau 1 250 m.

De nombreux essais ont été réalisés par l'IFP pour la caractérisation physique et mécanique de ces échantillons. Les essais sont de trois types : des essais d'identification, des essais de mécanique des sols et des essais de rhéologie.

Les essais réalisés ont permis d'effectuer une analyse critique des procédures d'essais de granulométrie, en s'assurant de la bonne séparation des particules.

De même, des procédures ont été suivies scrupuleusement afin de mesurer les teneurs en matière organique dont la mesure varie avec les températures appliquées.

Des analyses par diffraction X et Microscopie Electronique à Balayage ont été effectuées à l'IFP.

Des essais de fluage au rhéomètre ont été effectués pour élargir la palette des essais mécaniques aux

essais de mécanique des fluides et tenter d'en tirer des informations complémentaires. Les résultats sont comparés avec les résistances au cisaillement mesurées au scissomètre de laboratoire. La contrainte seuil obtenue au rhéomètre est trouvée du même ordre de grandeur.

1. INTRODUCTION

Les sédiments marins rencontrés par grande profondeur présentent des caractéristiques particulières différentes de celles des sédiments rencontrés sur le plateau continental. La cohésion en surface est très faible et le gradient de cohésion est également faible. La plasticité est très élevée.

Le prélèvement remanie profondément le sédiment et les caractéristiques mesurées en laboratoire diffèrent notablement des caractéristiques qui ont pu être mesurées in-situ.

Les sols concernés par le présent projet se situent au-delà du plateau continental dans les zones d'intérêt pour l'exploitation pétrolière principalement sur les côtes Ouest de l'Afrique.

Les essais de mécanique des sols réalisés en laboratoire tiennent compte des particularités des sols marins grande profondeur, et plus précisément de la très faible valeur de confinement qui nécessite un soin particulier pour la réalisation des essais.

La compréhension des propriétés mécaniques des sols marins grande profondeur apparaît comme un passage obligé dans l'étude plus approfondie du dimensionnement des caissons d'ancrage, de la pose, de l'ensouillage, de la stabilité des conduites, de l'interaction des risers caténaux avec le sol.

Les exemples récents d'installation de caissons à succion par mer profonde dans le Golfe de Guinée ont montré que plusieurs aspects du comportement des sols mous rencontrés : anisotropie, comportement à l'interface sol – acier, remaniement, cicatrisation, ne sont pas maîtrisés.

Les risers caténaux en acier (SCR-Steel Catenary Risers) constituent une solution alternative aux risers flexibles pour les mers profondes. Les études en cours ont montré que la fatigue maximale apparaît dans la zone de décollement et que la

raideur du sol est un paramètre critique pour l'adoption du concept.

Le problème d'interaction des conduites avec des sols très mous se pose également quand celles-ci sont soumises aux effets des variations de température et de pression du fluide transporté.

Les essais de mécanique des sols réalisés en laboratoire doivent tenir compte des particularités des sols marins grande profondeur, et plus précisément de la très faible valeur de confinement (à imposer pour reproduire les conditions in-situ) qui nécessite un soin particulier pour la réalisation des essais.

L'objectif du projet « Sols Marins Grande profondeur » est donc de mieux cerner les caractéristiques physiques et mécaniques des sols marins rencontrés en mer profonde (très forte teneur en eau, faibles valeurs de confinement, fort indice de plasticité, remaniement des échantillons prélevés) par des essais de laboratoire spécifiques menés sur des matériaux provenant des grandes profondeurs, afin de prendre en compte les caractéristiques particulières des sols qui seront nécessaires au dimensionnement des ouvrages (fondations de structures, ancrages, risers, conduites).

2. ECHANTILLONS DISPONIBLES

Total a mis à disposition de l'IFP 16 carottes de longueur variant entre 2 m et 5,30 m et de 70 mm de diamètre prélevées au carottier Kullenberg (Meunier et al, 2004) par des profondeurs d'eau variant entre 1 260 et 1 450 m et 9 tronçons de 1 m d'une carotte Stacor de 110 mm de diamètre (un tronçon sur deux, jusqu'à 17 m) de bonne qualité (profondeur d'eau 1 248 m) sur les champs d'intérêt pétrolier du Golfe de Guinée, zone dans laquelle les sols sont généralement homogènes et uniformes et dont l'épaisseur des sédiments argileux en place est d'environ 300 mètres.

La figure 1 montre deux profils pénétrométriques situés au voisinage de la carotte Stacor fournie au projet.

Les courbes de résistance de pointe du pénétromètre de deux sondages montrent un gradient de cohésion très net avec la profondeur et une surconsolidation de surface dans le premier mètre.

La surconsolidation apparente dans les couches très superficielles du sol peut être d'origine mécanique à la suite d'érosion ou d'origine physico-chimique.

La surconsolidation apparente pourrait être expliquée par des modèles physico-chimiques

(Sultan et al.-2001) : d'une part, un modèle à l'échelle microscopique basé sur la théorie de la double couche diffuse (Gouy-1910 et Chapman-1913) qui tient compte de l'effet de la concentration ionique sur le comportement mécanique, et d'autre part, un modèle élasto-plastique à l'échelle macroscopique (Alonso *et al.*-1990) qui considère la succion comme une variable de l'état de contrainte. Pour l'instant, aucune mesure ne permet de trancher sur la validité de ces approches.

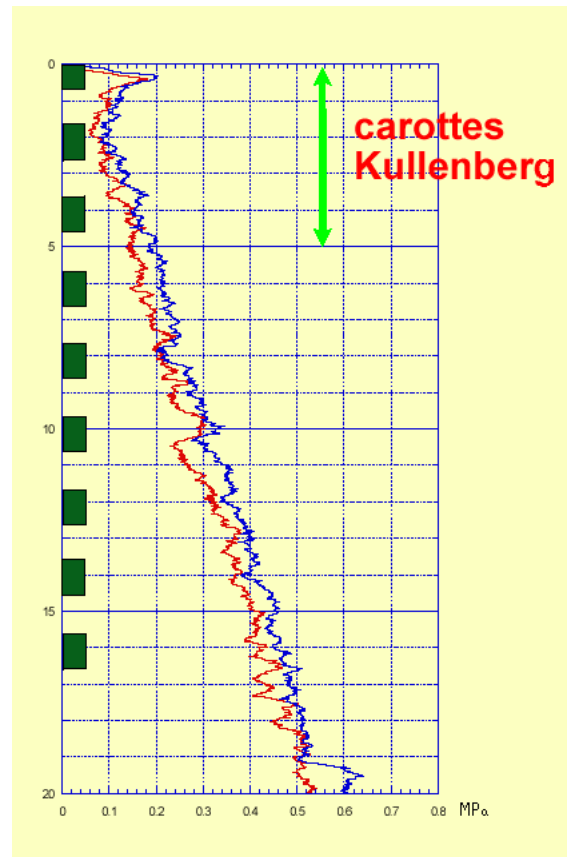


Fig. 1. – Courbes caractéristiques des sols rencontrés en mer profonde dans le Golfe de Guinée. Les bandes à droite représentent les échantillons de carottes disponibles prélevées au Stacor.

3. ESSAIS REALISES

De nombreux essais ont été réalisés par l'IFP pour la caractérisation physique et mécanique des échantillons provenant des carottes prélevées au carottier Kullenberg.

Ces essais sont de 3 types :

des essais d'identification

- teneur en eau
- limites d'Atterberg
- granulo-tamissage-sédimentométrie
- granulométrie laser
- teneur en matières organiques
- teneur en carbonates
- salinité

essais au bleu de méthylène
adsorption d'azote
diffraction X
Microscope Electronique à Balayage

des essais de mécanique des sols

mesures acoustiques
scissomètre de poche
scissomètre de laboratoire
fall cone
DSS (direct simple shear)
essai oedométrique
triaxial UU (non consolidé, non drainé)
triaxial CAUc (consolidé de manière
anisotrope et cisailé non drainé en compression)
triaxial CAUe (consolidé de manière
anisotrope et cisailé non drainé en extension)
triaxial CIU (consolidé et cisailé en non
drainé)

ring shear test

des essais de rhéologie

rhéomètre fluage
rhéomètre écoulement
rhéomètre oscillatoire

A titre d'illustration, les figures 2 à 5 présentent quelques appareillages de laboratoire utilisés pour effectuer les essais.



Fig. 4. Rhéomètre



Fig. 5. Plateau du rhéomètre



Fig. 2. – Scissomètre de laboratoire



Fig. 3. Triaxial

4. RESULTATS DE MESURES

Un important travail de comparaison de procédures de chaque type d'essais a été effectué selon les différentes normes ou "habitudes" en vigueur (ASTM, AFNOR, NGI, Fugro...).

Les résultats des essais effectués à l'IFP ont été comparés aux mesures réalisées par les contracteurs et mises à disposition du projet par Total. Les principaux résultats sont présentés ci-après.

Teneurs en eau et limites d'Atterberg

Les figures 6 et 7 donnent des résultats des mesures réalisées par l'IFP et des essais réalisés sur les différents sites du Golfe de Guinée. Les courbes montrent une grande homogénéité des résultats obtenus sur ces sites. Les teneurs en eau sont très élevées (de plus de 150 % en surface à 120 % environ à 20 mètres). Les limites de liquidité sont également extrêmement élevées (< 150 %). Des discussions portent sur les procédures de détermination des limites d'Atterberg : utilisation d'eau de mer ou non, ce qui peut expliquer certaines différences entre laboratoires.

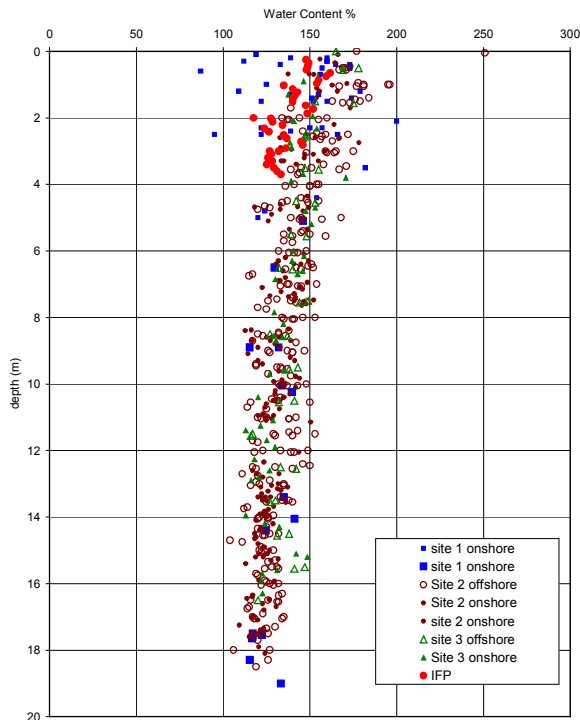


Fig. 6 – Teneurs en eau

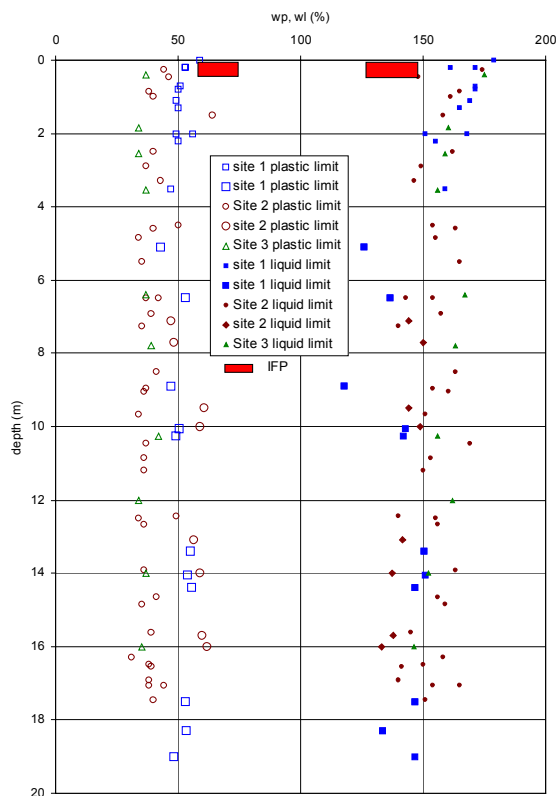


Fig. 7 – Limites d'Atterberg (limites de plasticité et limites de liquidité)

Indices de plasticité

La figure 8 récapitule les données d'indice de plasticité sur un site du golfe de Guinée. Les indices de plasticité sont extrêmement élevés, en comparaison des indices de plasticité trouvés dans le Golfe du Mexique (en tirets) et sur le delta du Mississippi (en pointillé). Les sols du Golfe de Guinée se montrent très différents de ceux de l'offshore profond américain.

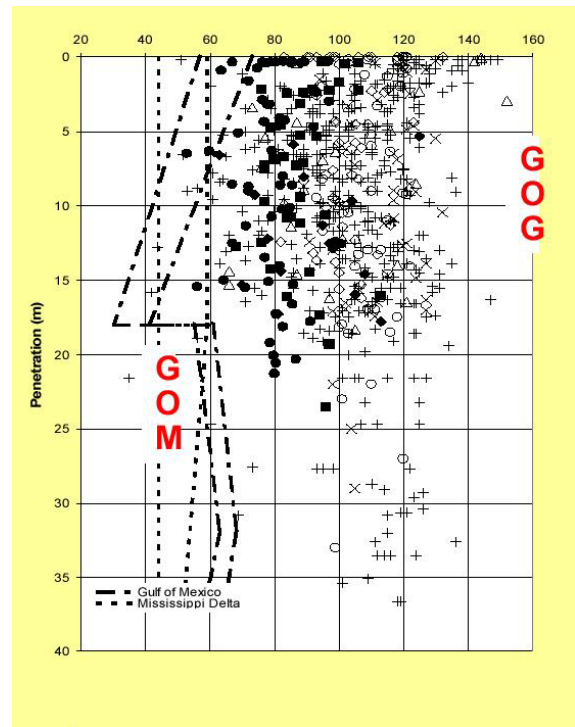


Fig. 8 – Indices de plasticité

Granulométries

La granulométrie laser a été employée à l'IFP, technique beaucoup plus rapide que les méthodes de sédimentation, qui s'avèrent parfois donner des résultats aberrants.

Le recours aux ultra-sons permet de séparer les particules, mais un temps d'exposition optimum a dû être identifié. De plus, l'utilisation d'un agent dispersif permet d'améliorer considérablement la défloculation. Des essais menés au Laboratoire Environnement et Minéralurgie à Nancy ont démontré que l'utilisation d'une résine échangeuse d'ions donnait des résultats de bonne qualité.

La teneur en argile (< 2 µm), sous-estimée par les méthodes de sédimentométrie standards, apparaît supérieure à 50 %.

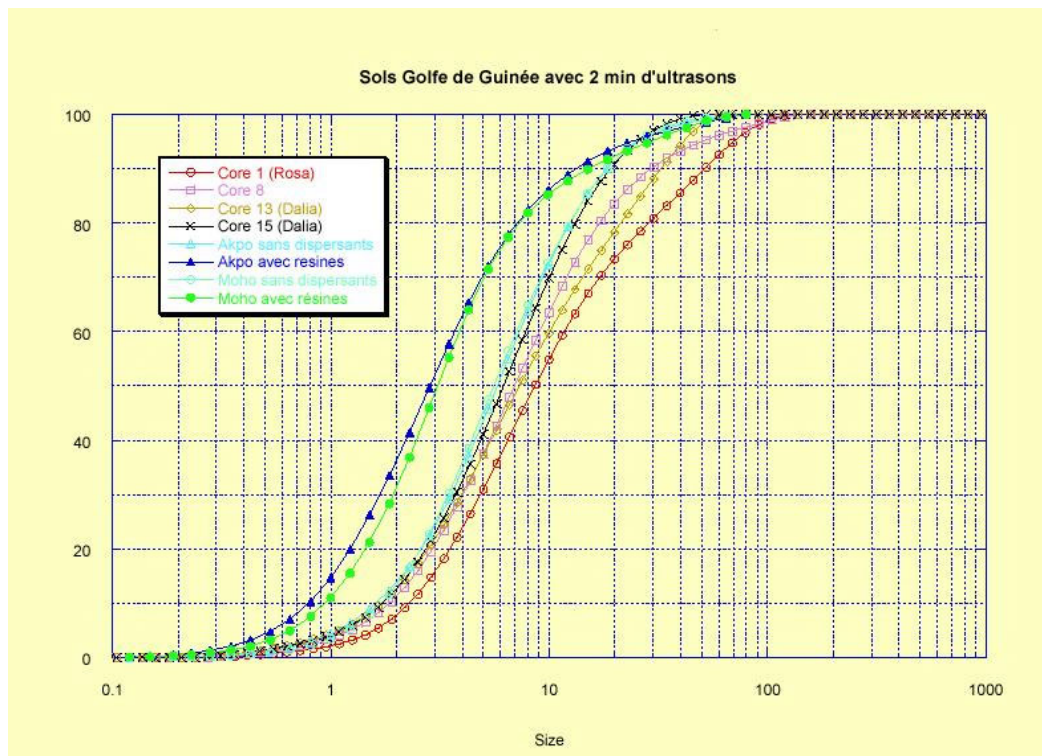


Fig. 9 – Courbes granulométriques obtenues sur les argiles par grande profondeur. (Les deux courbes bleu et verte les plus à gauche ont été obtenues en utilisant des résines comme agent défloculant).

Matière organique

Suivant les laboratoires, les teneurs en matière organique varient de 15 % à 4 % environ pour les mêmes matériaux. Une analyse approfondie a montré que la température utilisée pour la « perte au feu », était un paramètre fondamental. Si la température est trop élevée, l'eau de constitution des kaolinites commence à se décomposer.

Le respect scrupuleux de la température de calcination devrait permettre d'aboutir à des résultats plus homogènes. Les mesures effectuées à l'IFP avec le « Polluteval » montrent des teneurs en matière organique de l'ordre de 1 à 2 %.

Fraction argileuse : quantité et activité

L'essai au bleu de méthylène n'est pas pratiqué par les contracteurs offshore, mais est bien connu en génie civil terrestre en France. L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu pouvant s'adsorber sur les particules d'argile. La valeur de bleu est directement reliée à la surface spécifique,

qui régit l'activité des minéraux argileux présents dans la fraction fine. Les résultats sont caractéristiques de minéraux ayant une surface spécifique supérieure à celle retenue habituellement pour des kaolinites, ce qui fait présumer l'existence d'argiles gonflantes telles les smectites.

Minéralogie

Des analyses par diffraction X et Microscopie Electronique à Balayage ont été effectuées à l'IFP. Les diagrammes de diffraction X obtenus présentent l'aspect de la figure 10.

Le diffractogramme montre les pics correspondant au quartz, à la kaolinite, à l'illite et peut être à la présence d'argile gonflante. Une procédure d'étude plus fine a été mise au point en collaboration entre des minéralogistes de l'IFP et du LEM de Nancy. Elle demande l'élimination des carbonates, sels et matière organique.

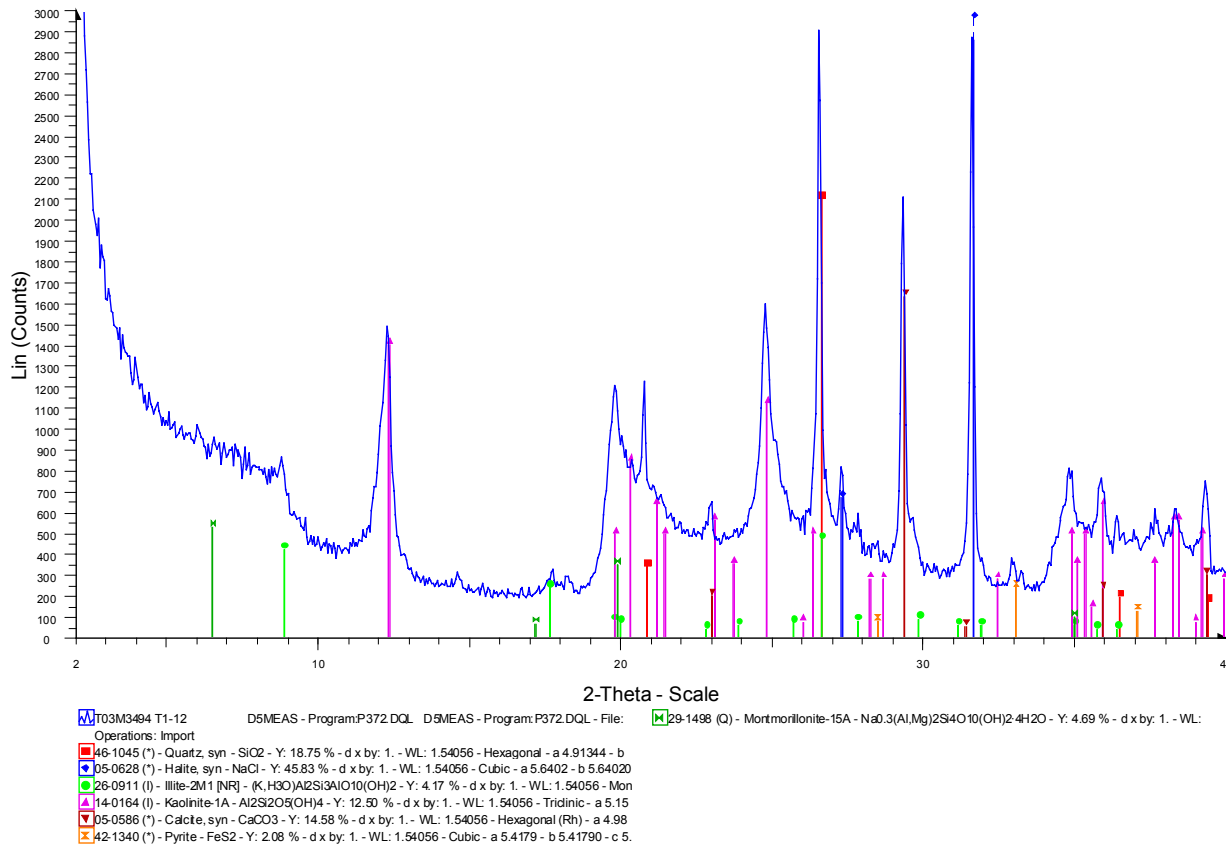


Fig. 10 : Diffractogramme de poudre sur la fraction inférieure à 20 µm d'un échantillon de sol

5. ESSAIS DE RHEOLOGIE

Des essais au rhéomètre ont été effectués pour élargir la palette des essais mécaniques aux essais de mécanique des fluides et tenter d'obtenir des informations complémentaires.

Essais de fluage

Un essai de fluage au rhéomètre consiste à appliquer à un échantillon de matériau un couple constant au cours du temps et la déformation angulaire résultante est mesurée en fonction du temps. La contrainte de cisaillement est alors constante au cours du temps. (Hénaut et al, 2003)

A partir d'un certain niveau de contrainte appliquée, dite contrainte seuil ou seuil d'écoulement, on observe un écoulement uniforme de matière.

Des essais de fluage ont été réalisés sur des échantillons présentant des résistances au cisaillement (mesurées au scissomètre de laboratoire) variant de 1 à 3 kPa. (Fig. 11)

La contrainte seuil obtenue au rhéomètre a été trouvée du même ordre de grandeur.

Essais d'écoulement - influence de la teneur en eau

Les échantillons ont été homogénéisés et de l'eau déminéralisée a été ajoutée, sur certains d'entre eux, pour obtenir des teneurs en eau élevées. Une fois l'échantillon en place, l'essai est lancé aussitôt. Des contraintes de cisaillement comprises entre 200 à 3 000 Pa ont été imposées et les vitesses de cisaillement résultantes ont été mesurées.

Tous les échantillons, quelles que soient leurs teneurs en eau, ont un comportement rhéofluidifiant présentant un seuil de contrainte que l'on peut modéliser par une loi de Herschel-Bulkley (Fig. 12) :

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n$$

où

- τ_c la contrainte seuil
- τ la contrainte de cisaillement
- K la consistance de l'échantillon (K porte la même unité que la viscosité)
- n l'indice de pseudo plasticité
- $\dot{\gamma}$ la vitesse de cisaillement

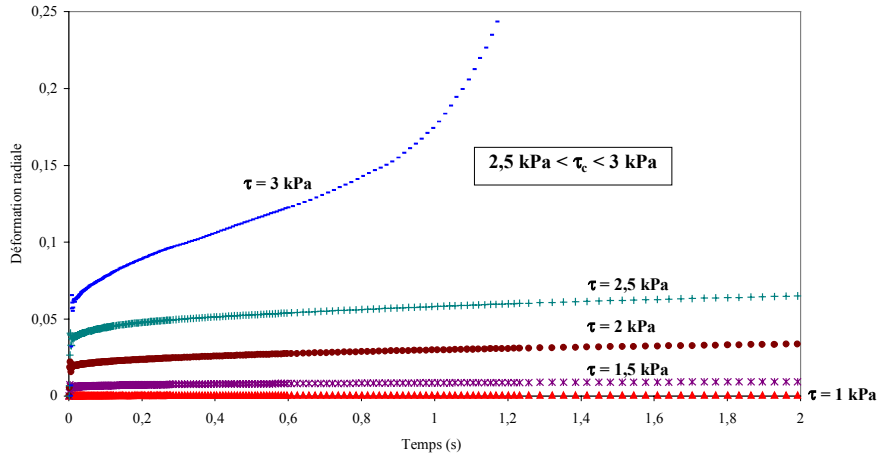


Fig. 11 : Détermination de la contrainte seuil : Essais de fluage à $T = 5^\circ\text{C}$ pour différentes contraintes imposées

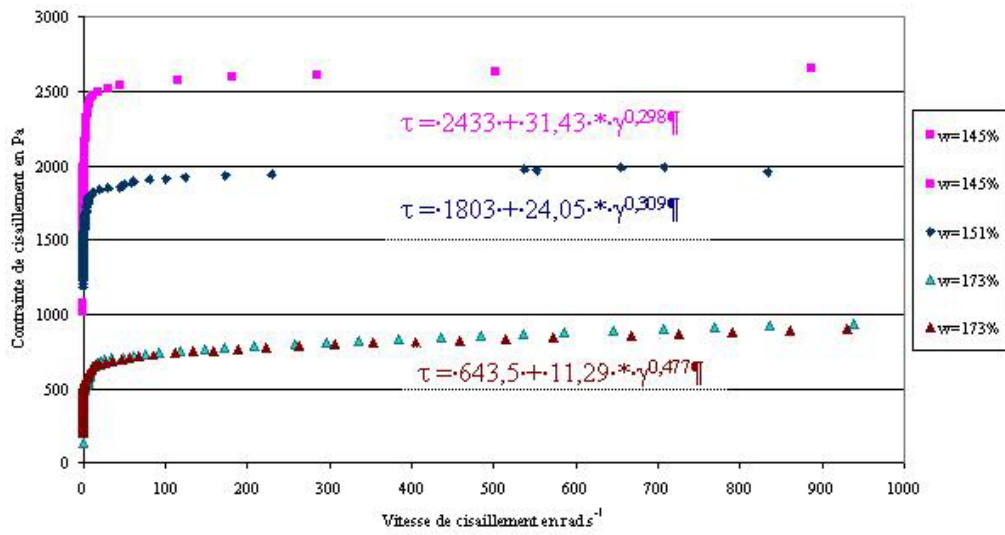


Fig. 12 : Essais d'écoulement continu en contraintes imposées à $T=5^\circ\text{C}$ pour des échantillons à des teneurs en eau différentes (à la salinité près)

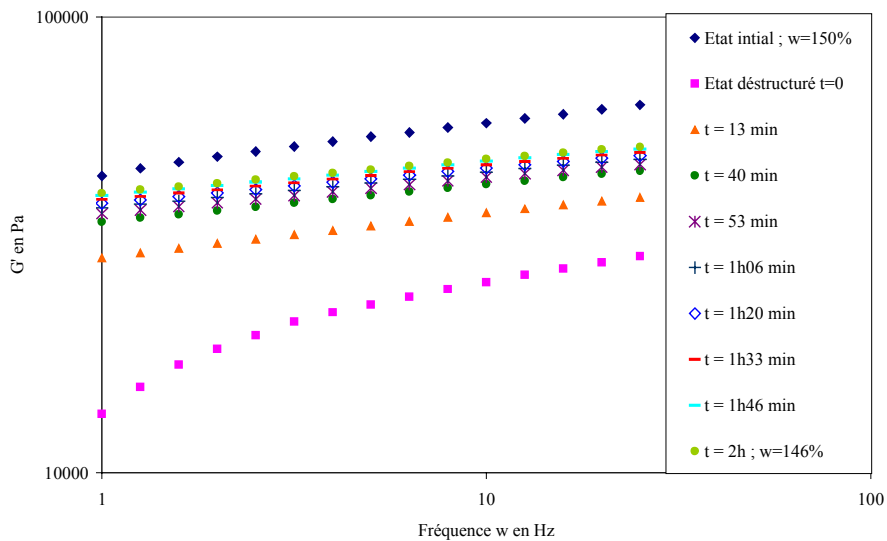


Fig. 13 : Etude de la reprise à $T=5^\circ\text{C}$ d'un échantillon ayant subi une vitesse de cisaillement de 500 s^{-1} pendant 10 minutes

Essais de reprise

Des échantillons ont subi une vitesse de cisaillement de 500 s^{-1} pendant 10 minutes afin de les déstructurer. Puis ils sont laissés au repos en effectuant à intervalles de temps réguliers des essais oscillatoires pour quantifier la reprise au cours du temps.

Les différents échantillons semblent au premier abord récupérer leurs propriétés caractéristiques au bout d'un certain temps (Fig. 13).

Les diverses observations ont été rendues difficiles par des variations de la teneur en eau avec le temps.

5. CONCLUSIONS

La synthèse des connaissances sur les propriétés des sols marins du Golfe de Guinée par grands fonds montre qu'ils présentent un certain nombre de spécificités par rapport aux sols d'autres zones géographiques (Golfe du Mexique) et que les méthodes standard ne sont pas toujours à même de les caractériser précisément et complètement.

Ces sols marins sont essentiellement des silts argileux très plastiques, sensibles et thixotropes. Un travail en profondeur a été entrepris pour mieux les identifier, cerner leurs propriétés physiques et rhéologiques et, in fine, expliquer leur comportement géotechnique.

Les protocoles expérimentaux ont été améliorés pour permettre une identification précise et correcte des matériaux. Plusieurs avancées ont été faites sur la teneur en matière organique, le contenu granulométrique et l'activité colloïdale. Des progrès significatifs sont attendus en termes de minéralogie et microstructure qui pourront certainement expliquer la forte capacité à la rétention d'eau et les indices de plasticité très élevés de ces sédiments.

Il est important de noter que minéralogie et microstructure influent directement sur un certain nombre de propriétés géotechniques de premier intérêt en ingénierie, notamment la sensibilité, la thixotropie, l'anisotropie de structure, le comportement d'interface.

Leur rôle peut également permettre de mieux comprendre et interpréter la réponse des matériaux aux chargements cycliques et d'expliquer au moins partiellement le phénomène aléatoire du pic de subsurface.

Les approches traditionnelles de la mécanique des sols sont basées sur des comportements de type élasto-plastique. Il est pertinent de s'interroger sur la capacité de tels modèles à décrire correctement

ou complètement le comportement de sols caractérisés par des teneurs en eau très élevées ($W > 100\%$), qui se situent au moins sur les premiers mètres sous la surface du fond au-delà de leur limite de liquidité ($IL > 100\%$).

Les essais au rhéomètre ont été effectués afin de rechercher dans quelle mesure des modèles issus de la mécanique des fluides (visco-plasticité, modèles à seuil...) ne seraient pas aptes à apporter des éclairages nouveaux ou complémentaires sur le comportement de ces sols. Les premiers résultats montrent un comportement de fluide à seuil, rhéofluidifiant, avec une forte capacité à la reprise après déstructuration. Le travail se poursuit actuellement au point de vue méthodologique.

Les apports du projet sont déjà très importants et marquent une avancée certaine dans la façon d'étudier ces matériaux d'offshore profond. Des résultats majeurs sont attendus sur les aspects minéralogie et microstructure ainsi que sur les procédures d'essais géotechniques sous faible confinement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier tous les participants au projet « Sols marins Grande profondeur » : les intervenants de Total, IFP, Fugro-France, Saipem S.A., Stoltoffshore, Technip qui apportent leur concours au projet et qui ont permis d'obtenir les résultats présentés dans ce papier.

BIBLIOGRAPHIE

- Alonso E.E., Gens A., Josa A., « A constitutive model for partially saturated soils » *Geotechnique*, 40 (3) (1990) 405-430
- Chapman D.L., « A contribution to the theory of electrocapillarity » *Philosophical Magazine* 25 (6) (1913) 475-481
- Gouy G. « Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte » *Journal de physique théorique et appliqué*, 9 (1910) 457-468
- I. Hénaut, E. Pons, E. Bemer, J-F. Nauroy (Institut Français du Pétrole) « Caractérisation rhéologique des sols marins grande profondeur » - 38^{ème} colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR) - Brest, 15 au 17 octobre 2003
- Meunier J., Jégou P., Sultan N., Harmegnies F., « Outils géotechniques pour l'étude des fonds marins » Journées AUMAFM, Brest sept 2004
- Sultan N., Cochonat P., Cauquil E., Colliat J.-L., « Apparent Over-Consolidation and Failure Mechanisms in Marine Sediments ». OTRC 2001 Conference, 26-27 avril, Houston.