

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Une stratégie de reconnaissance géotechnique pour les argiles grands fonds

A geotechnical site investigation strategy for deepwater clays

A. Puech, D. Borel, E. Palix & S. Po
Fugro Offshore Geotechnics, Nanterre, France

RÉSUMÉ

Le papier présente les besoins géotechniques pour le dimensionnement des structures pétrolières par grands fonds et rappelle les propriétés spécifiques des sédiments de la pente continentale. Il décrit ensuite la stratégie de reconnaissance mise au point, insiste sur la complémentarité entre essais in situ et essais de laboratoire et montre comment la combinaison judicieuse des différentes données permet d'accéder aux paramètres d'ingénierie.

ABSTRACT

The paper presents the geotechnical requirements for the design of deep water oil and gas structures and outlines the specific properties of the sediments encountered on the continental shelf. The site investigation strategy presently applied for deep water sites is described, with particular focus on the complementarity between in situ and laboratory testing. It is emphasized how a judicious combination of data can give access to engineering parameters.

Keywords : Offshore, Deep waters, Site investigation, In situ testing, Laboratory testing

1 INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, l'industrie pétrolière offshore a étendu ses activités sur les pentes continentales et se trouve maintenant concernée par des profondeurs voisines de 2000 m.

Les sédiments rencontrés par grands fonds dans le Golfe de Guinée sont des sédiments très fins, qui se caractérisent par de très fortes teneurs en eau, des poids volumiques très faibles et des indices de plasticité très élevés. De récentes observations ont révélé une forte structuration de nature sédimentaire et post sédimentaire qui leur confère une sensibilité moyennement forte. Cet ensemble de propriétés en fait des matériaux difficiles à caractériser tant sur le plan physique que mécanique.

Le dimensionnement des ancrages de structures pétrolières (ancres à succion notamment) et la détermination des conditions d'interaction sol-conduite nécessitent une connaissance très fine de la résistance au cisaillement non drainé de ces argiles sur les trente premiers mètres de pénétration et plus particulièrement sur le premier mètre pour les pipelines. Il est également indispensable de pouvoir caractériser leur anisotropie de résistance, leur perte de résistance sous l'effet d'un remaniement provoqué par leur prélèvement mais aussi par l'installation des structures, ainsi que leur capacité à recouvrer tout ou partie de leur résistance dans les jours ou semaines suivant l'installation.

Pour répondre à ces défis, une stratégie de reconnaissance des argiles grands fonds s'est progressivement mise en place. Cette stratégie repose sur l'utilisation extensive de mesures in situ, le prélèvement de carottes de haute qualité et la réalisation d'essais avancés de laboratoire. Des procédures rigoureuses de traitement des données permettent ensuite de bâtir des modèles de site pertinents et d'accéder aux paramètres d'ingénierie.

L'objet de la présente communication est de présenter cet état de l'art méthodologique, plus particulièrement appliqué dans le Golfe de Guinée mais pouvant être étendu aux autres sites de mer profonde.

2 ARGILES DES GRANDS FONDS DU GOLFE DE GUINEE

Le contenu de cette communication est plus particulièrement centré sur les propriétés des sédiments rencontrés sur la pente continentale du Golfe de Guinée par des profondeurs comprises entre 600 et 2000 m.

On se limitera aux sédiments qui sont le résultat d'un processus de dépôt sédimentaire simple et n'ont pas été perturbés par des aléas géologiques ultérieurs, tels que diapirisme, instabilités gravitaires, présence de gaz ou d'hydrates de méthane, éruptions de volcans de boue ou formation de pockmarks. En d'autres termes, la problématique des « géohazards » ne sera pas abordée.

2.1 Propriétés physiques

La spécificité des caractéristiques physiques des argiles du Golfe de Guinée a été soulignée (Puech et al. 2005). Sur les 20 à 30 premiers mètres de pénétration, les teneurs en eau sont très fortes, décroissant de 200-250% à 100-150% ; corrélativement les poids volumiques déjaugés sont extrêmement faibles et croissent typiquement de 2.5 à 4 kN/m³. Les teneurs en carbonates varient de manière erratique dans la fourchette 5-15% mais il s'agit essentiellement de débris de coquilles ou de foraminifères. La teneur en matière organique ne peut être obtenue par les méthodes usuelles (Thomas et al. 2005) mais doit être déduite de la teneur en carbone organique total (COT) : elle est de l'ordre de 4 à 6%. Les particules élémentaires sont très fines : la quasi totalité est < 80µm avec une forte proportion (50 à 80%) < 2µm. Elles se présentent cependant sous forme d'agrégats très difficiles à déflocculer. Il faut avoir recours à des résines échangeuses de cations et aux ultrasons pour obtenir une dispersion efficace (Thomas et al. 2007). Le matériau est très plastique (IP>80) et se classe dans la catégorie des argiles fortement plastiques (CH) dans le diagramme de Casagrande. Cette plasticité s'explique par la présence d'argiles gonflantes en quantité significative bien que la kaolinite soit l'élément

majoritaire. Là encore des traitements spécifiques ont dû être mis au point pour révéler la présence des smectites (Thomas et al. 2007).

2.2 Propriétés mécaniques

Le profil de résistance au cisaillement non drainé est globalement de type normalement consolidé avec une valeur en surface de l'ordre de 1 à 3 kPa et un gradient voisin de 1,5 kPa/m. Il convient toutefois de mentionner la présence sur certains sites d'un pic de résistance ($S_u = 10$ à 20 kPa) situé immédiatement sous le niveau du fond (entre 0,4 et 0,7m). Ce phénomène n'a pas reçu d'explication totalement satisfaisante à ce jour mais pourrait être au moins partiellement dû à une bioturbation intense (Ehlers et al. 2005).

Des investigations au MEB ont révélé que le matériau est fortement structuré. Se basant sur des séries d'essais oedométriques et triaxiaux sur chemins complexes drainés et non drainés, Le (2007) a montré que son comportement mécanique pouvait être interprété à la lumière du concept d'argile naturelle introduit par Burland (1990) et étendu aux argiles sensibles par Cotecchia & Chandler (2000) :

- le *Yield Strength Ratio* (YSR) est supérieur à 1 (typiquement entre 1 et 2) ;
- la compressibilité *post-yielding* est forte, indiquant une destructuration progressive du matériau ;
- la position relative de la SCL (*Sedimentation Compression Line*) et de l'ICL (*Intrinsic Compression Line*) est compatible avec les mesures de sensibilité effectuées par ailleurs, soit St compris entre 3 et 8 ($St = S_{u\text{ intact}}/S_{u\text{ remanié}}$).

Une conséquence directe de la sensibilité du matériau est la forte chute de sa résistance au cisaillement sous des états de contraintes supérieurs à son état de contrainte in situ. L'application de procédures du type SHANSEP qui nécessitent une consolidation du matériau à des états de contraintes plusieurs fois supérieurs à l'état de contrainte in situ est donc à éviter (Le et al. 2008).

3 BESOINS DE L'INGENIERIE PAR GRANDS FONDS

Les besoins de l'ingénierie géotechnique par grands fonds sont actuellement focalisés sur le dimensionnement et l'installation de systèmes d'ancrage et principalement d'ancres à succion (Randolph et al. 2005) et sur la définition des conditions d'interaction sol-conduite pour la stabilité des réseaux de flowlines posés sur le fond (Dendani & Jaek 2007).

3.1 Caissons à succion

Les paramètres essentiels pour le dimensionnement de caissons à succion sont une connaissance précise de la résistance au cisaillement non drainé sur une trentaine de mètres de pénétration, l'anisotropie de résistance du matériau qui intervient dans les calculs de capacité, sa dégradabilité sous charges cycliques, sa sensibilité pour déterminer la perte de résistance sous l'effet du remaniement lié à la pénétration des parois et sa thixotropie qui permet de déterminer le regain en capacité au cours du temps.

3.2 Pipelines

Sous l'effet de variations de pression interne et de température, les pipelines posés sur le fond peuvent se déplacer aussi bien latéralement que longitudinalement et exercer des efforts parasites considérables sur les structures auxquelles ils sont connectés. La prévision / prévention de ces phénomènes passe par une connaissance approfondie des conditions d'interaction sol-conduite. Il faut notamment connaître la résistance au cisaillement non drainé du matériau

sur les premiers décimètres de manière très précise (mieux que 1 kPa) pour déterminer l'enfoncement de la conduite à la pose. Cet enfoncement conditionne les résistances longitudinale et latérale en service. La sensibilité du matériau de surface est ici également fondamentale pour évaluer la surpénétration de la conduite due aux surcontraintes de pose (effet de pilonnement du support).

4 MOYENS DE RECONNAISSANCE

4.1 Outils de reconnaissance in situ

Une large gamme d'outils de reconnaissance in situ est systématiquement mise en œuvre (Borel et al. 2005). Ces outils sont opérés à partir de modules de quelques tonnes posés sur le fond. Ils permettent des pénétrations dans les sédiments jusqu'à 40m. Il s'agit du piezocone (CPTU), du scissomètre (VST), et des pénétromètres à refoulement complet tels le *Tbar* (TB) et la *Ball Probe* (BP) (Randolph et al. 2005)

4.2 Carottiers

Le carottier gravitaire géant STACOR® est l'outil de référence (Borel et al. 2004). Il permet de récupérer des carottes de 100mm de diamètre et 20m de longueur de très bonne qualité géotechnique (classe bonne à excellente d'après l'indice de qualité de Lunne (1998)).

Les sols de surface sont prélevés intacts à l'aide de *box corers* d'une capacité de l'ordre de 0,1m³. Pour pallier la difficulté de sur-carotter dans des sols extrêmement mous, un mini-Tbar a été développé qui permet d'obtenir directement sur le pont un profil de cohésion intacte et de mesurer la sensibilité par cyclage (Fig.1).

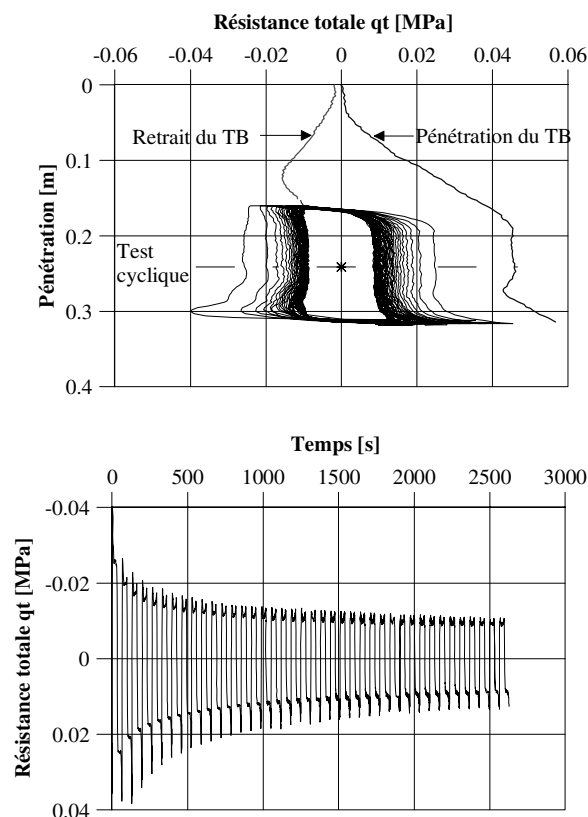


Figure 1. Exemple d'essai cyclique au mini-Tbar réalisé sur un échantillon intact prélevé au boxcorer.

5 STRATEGIE DE RECONNAISSANCE

5.1 Sur site

Compte tenu des distances entre les points d’ancrage (le rayon d’ancrage est d’ordre kilométrique) il est nécessaire d’effectuer au moins un profil continu de pénétration à chaque emplacement d’ancrage ou alternativement plusieurs profils par groupe d’ancres.

Une recommandation particulièrement importante est de prévoir quelques plots de référence où seront réalisés dans un rayon de quelques dizaines de mètres un CPTU, un VST, un Tbar et un carottage STACOR®.

En raison de leur coût (durée d’exécution) les VST sont limités aux plots de référence. On inclut quelques essais avec mesure résiduelle sur le profil. Les CPTU sont utilisés pour étendre la reconnaissance sur les autres points d’ancrage. Les TB (ou BP) sont préférés le long des tracés de pipelines en raison de leur plus grande précision dans les sédiments très mous de surface. Des essais cycliques in situ sont intégrés pour la mesure de la sensibilité.

5.2 En laboratoire

A bord du bateau on effectue des essais élémentaires (teneur en eau, poids volumique, scissomètre de laboratoire, triaxial UU). Ces essais sont dupliqués à terre pour vérifier l’intégrité des carottes après transport.

Le programme d’essais de laboratoire sur les carottes STACOR® comporte :

- du logging continu: par radiographie ou au banc MSCL (gammadensimétrie, Vp, susceptibilité magnétique) ;
- des essais oedométriques (YSR, Cc, k, indice de qualité) ;
- des essais au scissomètre de laboratoire et triaxiaux UU sur échantillons intacts et remaniés (mesure de St) ;
- des essais triaxiaux avec mesure de Ko ;
- des essais de type DSS (Direct Simple Shear), triaxial CAUc et CAUe, pour mesurer l’anisotropie de résistance ;
- des essais DSS et triaxiaux cycliques ;
- des essais de thixotropie, spécialement développés.

6 PROCEDURE D’INTEGRATION DES DONNEES

6.1 Traitement des résultats des essais in situ

Un premier modèle de site est établi à partir des résultats des essais in situ.

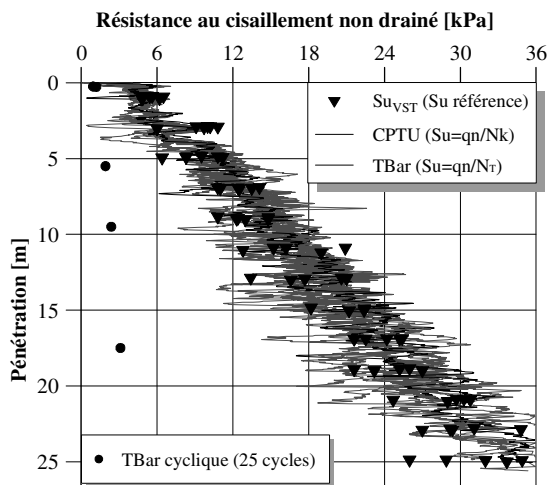


Figure 2. Calage des essais de pénétration (CPTU et TBar) par rapport aux valeurs de résistance au cisaillement non drainé intacte des VST.

Dans cette phase, la résistance au cisaillement obtenue au VST est prise comme référence. Les profils CPTU et Tbar sont transposés en profils de Su par calage des coefficients Nk et Nt (Fig.2). Une première estimation de la sensibilité est possible grâce aux données des essais Tbar cycliques.

6.2 Intégration des résultats d’essais de laboratoire

Les résultats des essais avancés de laboratoire se présentent sous la forme de profils Su_{DSS}, Sue et Sue (Fig.3). Les coefficients d’anisotropie α_e (=Sue/Su_{DSS}) et α_c (=Suc/Su_{DSS}) sont de l’ordre de 0,8 et 1,25 dans les argiles du Golfe de Guinée.

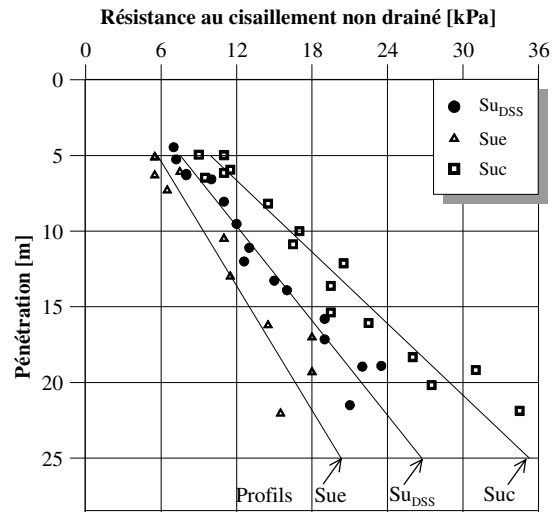


Figure 3. Détermination des profils de résistance au cisaillement non drainé des essais avancés CAUc, CAUe et DSS.

Il est alors possible d’établir un jeu de paramètres en vue d’un dimensionnement préliminaire en attente des données de laboratoire (le transport des carottes et la réalisation complète des essais peuvent prendre plusieurs mois).

Le profil Su_{DSS} servant de référence pour le calcul de la capacité des ancrés à succion, il est nécessaire d’établir une corrélation entre les valeurs de Su_{DSS} et les valeurs de Su_{VST}. Le coefficient de passage k (=Su_{DSS}/Su_{VST}) est de l’ordre de 0.8. Il permet d’établir un pont entre le jeu de données de laboratoire et le jeu de données in situ.

L’étape suivante consiste à regrouper les différents jeux de données (Fig.4).

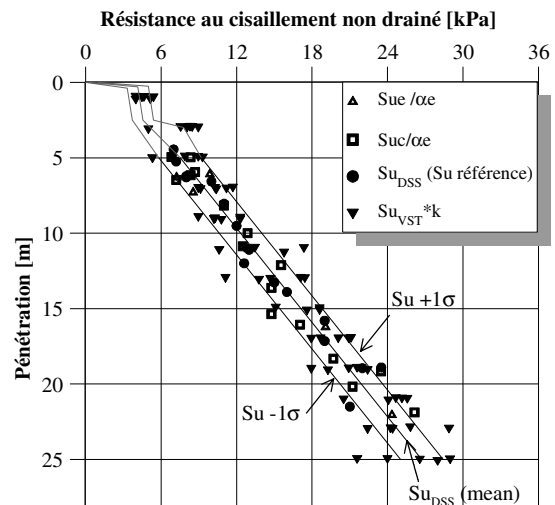


Figure 4. Analyse statistique des essais de laboratoire avancés (données Sue, Suc normalisées en Su_{DSS}).

Su_{DSS} est pris comme référence. Su_{VST} , Sue et Suc sont transformés en Su_{DSS} par l'intermédiaire des coefficients de corrélation k et d'anisotropie α_e et α_c . Des analyses statistiques permettent de juger de l'homogénéité de la base complète de données.

La dernière étape du traitement consiste à réintroduire les profils de pénétrométrie (CPTU et Tbar) comme indiqué sur la Figure 5.

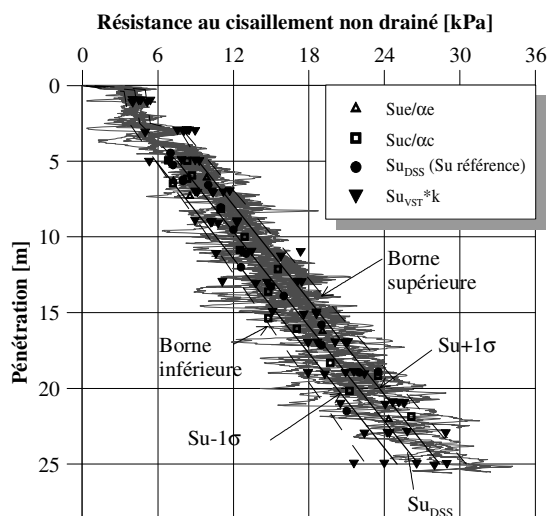


Figure 5. Intégration des essais in situ et des essais avancés de laboratoire, normalisés en Su_{DSS} .

6.3 Paramètres de projet

Lorsqu'on dispose d'une base de données complète et cohérente telle que présentée sur la Figure 5, il est aisé de définir les profils caractéristiques nécessaires à chaque application particulière, par exemple :

- profil de calcul de capacité basé sur le profil moyen ou moyen moins un écart type ;
- profil de résistance à la pénétration basé sur le profil moyen plus un écart type ou sur un profil enveloppe maximum.

7 CONCLUSIONS

L'ingénierie géotechnique des structures installées par grandes profondeurs d'eau doit faire face à plusieurs défis :

- la nouveauté des concepts (ancrage à succion par exemple) et des problèmes à résoudre (interaction sol-conduite) ;
- la spécificité des sédiments grands fonds et la difficulté d'appréhension de leurs propriétés physiques et mécaniques ;
- les contraintes opérationnelles liées aux grandes profondeurs d'eau.

L'industrie pétrolière et parapétrolière a mis en place une méthodologie qui permet de répondre aux besoins. La stratégie des reconnaissances par grands fonds est basée sur :

- l'utilisation extensive d'une large gamme d'outils in situ, innovants pour certains d'entre eux ;
- la mise en oeuvre de systèmes de carottage originaux permettant la récupération rapide d'échantillons de très bonne qualité ;
- le recours à des séries d'essais de laboratoire avancés.

Des procédures strictes d'intégration des données in situ et de laboratoire sont ensuite appliquées pour l'obtention des paramètres de projet.

ABBREVIATIONS

BP: *Ball Probe (full flow) penetration test*
CPTU: *Cone Penetration Test with pore pressure measurement*

DSS: *Direct Simple Shear*
ICL: *Intrinsic Compression Line (Burland 1990)*
MEB: *Microscope Electronique à Balayage*
MSCL: *Multi-Sensor Core Logging system*
YSR: *Yield Strength Ratio (Burland 1990)*
SCL: *Sedimentation Compression Line (Burland 1990)*
SHANSEP: *Stress History and Normalized Soil Engineering Properties (Ladd & Foott 1974)*
STACOR®: *Giant Stationary Piston Corer*
TB: *T-bar (full flow) penetration test*
VST: *Vane Shear Test*

REMERCIEMENTS

Une part importante de la connaissance du comportement des sédiments grands fonds du Golfe de Guinée a été obtenue dans le cadre d'actions de recherche menées par le CLAROM. Les partenaires sont Acergy, Doris Engineering, IFREMER, IFP, Fugro France, Saipem, Technip et Total. La contribution des organismes universitaires : ENPC-Cermes, 3S-R, LEM et ECP a été déterminante.

REFERENCES

- Borel, D. & Puech, A. 2004. Deepwater geotechnical investigations in the Gulf of Guinea: successes and challenges. *Proc. Seatechweek*, Brest, France
- Borel, D. Puech, A. Dendani, H. & Colliat, J.L. 2005. Deepwater geotechnical site investigation practice in the Gulf of Guinea. *Proc. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia, 921-926.
- Burland, J.B. 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique* 40 (3): 329-378
- Cotecchia, F. & Chandler, R.J. 2000. A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique*, 50 (4): 431-447
- Dendani, H. & Jaek, C. 2007. Pipe-soil interaction in highly plastic clays. *Proc. of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference*, London, 115-124.
- Ehlers, C.J. Chen, J. Roberts, H.H. & Lee, Y.C. 2005. The origin of near-seafloor "crust zones" in deepwater. *Proc. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia, 927-934.
- Ladd, C.C. & Foott, R. 1974. New design procedure for stability of soft clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, (100) GT7, 763-786.
- Le, M.H. 2008. Caractérisation physique et mécanique des sols marins d'offshore profond. *Thèse de Doctorat*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 252p.
- Le, M.H. Nauroy, J.F. De Gennaro, V. Delage, P. Flavigny, E. Thanh, N. Colliat, J.L. Puech, A. & Meunier, J. 2008. Characterization of soft deepwater West Africa clays: SHANSEP testing is not recommended for sensitive structured clays. *Proc. Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, OTC Paper: 19193
- Lunne, T. Berre, T. & Strandvik, S. 1998. Sample disturbance effect in deep water soil investigations. *Proc. Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour Conference*, SUT, London, 199-220.
- Puech, A. Dendani, H. Meunier, J. & Nauroy, J.F. 2005. Caractérisation des sédiments de la pente continentale du Golfe de Guinée. *Proc. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, (3):1765- 1769, Rotterdam:Millpress
- Randolph, M. Cassidy, M. & Gourvenec, S. 2005. Challenges of offshore geotechnical engineering. *Proc. of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, (1): 123-176, Rotterdam:Millpress
- Thomas, F. Nauroy, J.F. & Rebours, B. 2005. Mineralogical characteristics of Gulf of Guinea deepwater sediments. *Proc. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia, 1055-1062.
- Thomas, F. Puech, A. Nauroy, J.F. Palix, E. & Meunier, J. 2007. Specific identification test procedures for deepwater sediments of Gulf of Guinea. *Proc. of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference*, London, 441-448.