

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.

Caractérisation des sédiments de la pente continentale du Golfe de Guinée Geotechnical characterization of Gulf of Guinea deepwater sediments

A. Puech

Fugro France, Nanterre, France

H. Dendani

Total, Paris La Défense, France

J. Meunier

Ifremer, Centre de Brest, Plouzané, France

J.-F. Nauroy

Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, France

RÉSUMÉ

Cette communication porte sur la caractérisation géotechnique des sédiments rencontrés par plus de 450 m d'eau sur la pente continentale du Golfe de Guinée. Indépendamment de leur position géographique et de la profondeur d'eau, ces sols ont en commun un certain nombre de propriétés physiques et mécaniques qui les distinguent d'autres sols de mers profondes. La revue porte sur 10 sites en traitant plus particulièrement des propriétés physiques, de la résistance au cisaillement non drainé et de l'état de contrainte in situ. La plupart de ces propriétés spécifiques n'ont pas reçu d'explication satisfaisante à ce jour et des efforts de recherche sont nécessaires pour comprendre et prédire le comportement de ces matériaux.

ABSTRACT

The paper addresses the geotechnical characterization of the sediments encountered on the continental slope of the Gulf of Guinea in water depths in excess of 450m. These soils notwithstanding their geographical position and water depth have in common a number of physical and mechanical properties which differentiate them from other deepwater soils. The review refers to 10 sites and focuses on index properties, undrained shear strength and in situ stress state. Most of the specific properties of these soils have not received so far satisfactory explanations and more research is needed to understand and predict their geotechnical behavior.

1 INTRODUCTION

La première reconnaissance géotechnique par grandes profondeurs d'eau dans le Golfe de Guinée a eu lieu en 1998 sur le site de Girassol par 1500 m d'eau au large de l'Angola. Depuis cette date, une importante somme de données géotechniques a été recueillie au large de l'Afrique de l'Ouest dans des profondeurs d'eau comprises entre 450 et 1500 m.

La confrontation des données géotechniques recueillies sur les différents sites montre que les sédiments du Golfe de Guinée (GdG) présentent un certain nombre de caractéristiques communes qui les différencient des autres sols de mers profondes, notamment ceux du Golfe du Mexique (GdM). L'objet de cette communication est de mettre en évidence les propriétés spécifiques de ces matériaux.

Les procédures d'essais conventionnelles et les approches usuelles de la mécanique des sols se sont quelquefois avérées insuffisantes pour identifier correctement les matériaux et déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques. Des efforts de recherche sont nécessaires pour parvenir à une compréhension satisfaisante du comportement géotechnique des sédiments du Golfe de Guinée.

2 SOURCES DE DONNÉES

Les auteurs ont effectué une revue synthétique des propriétés géotechniques des sols recueillies sur 10 sites au large du Nigeria, de la Guinée Equatoriale, du Congo et de l'Angola, par des profondeurs d'eau comprises entre 450 et 1500 m. La limite supérieure de 450 m a été choisie de manière à s'assurer que tous les sédiments considérés se situent sur la pente continentale au-delà de la zone de transition avec le plateau continental. La limite inférieure de 1500 m correspond à la limite actuelle des investigations à caractère pétrolier dans cette région.

Un état de la pratique des investigations géotechniques par grands fonds dans le Golfe de Guinée a été dressé par ailleurs

(Borel et Puech, 2004 ; Puech et al., 2005). La grande majorité des données géotechniques discutées ci-après ont été obtenues :

- soit par carottage à partir d'un carottier géant à piston stationnaire dit carottier STACOR®. Cet équipement permet la récupération de carottes de 100 mm de diamètre et d'environ 20 m de longueur. Les échantillons généralement de très bonne qualité géotechnique sont soumis à des essais de laboratoire standard et avancés ;
- soit par mesures in situ : un grand nombre d'essais de pénétration au piézocône (CPTU) et quelques essais au scissomètre (VST) ont été réalisés jusqu'à des pénétrations de l'ordre de 40 m à partir de modules posés sur le fond.

Les propriétés des sédiments analysés sont représentatives de zones stables à morphologie simple et uniforme. Ces zones sont supposées ne pas être affectées par les nombreux « géohazards » spécifiques des grands fonds tels que hydrates de gaz, pockmarks, volcans de boue, diapirisme, etc.

3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET D'IDENTIFICATION

3.1 Teneur en eau et poids volumique immergé

Les sédiments sont caractérisés par des teneurs en eau très élevées typiquement comprises entre 150 et 250% au niveau du fond et décroissant avec la pénétration (Fig. 1). Sur les 6 à 10 premiers mètres sous le niveau du fond, la teneur en eau décroît sensiblement (environ 80-150% vers 8 m) mais reste supérieure ou proche de la limite de liquidité ($1,0 < IL < 1,2$). Au-delà la décroissance est faible au moins dans la limite des pénétrations concernées par la plupart des fondations de structures par grands fonds (soit 30 à 40 m). Les quelques sondages profonds disponibles confirment la tendance à la décroissance mais les teneurs en eau peuvent encore être de l'ordre de 80 à 100% vers 100 m de pénétration.

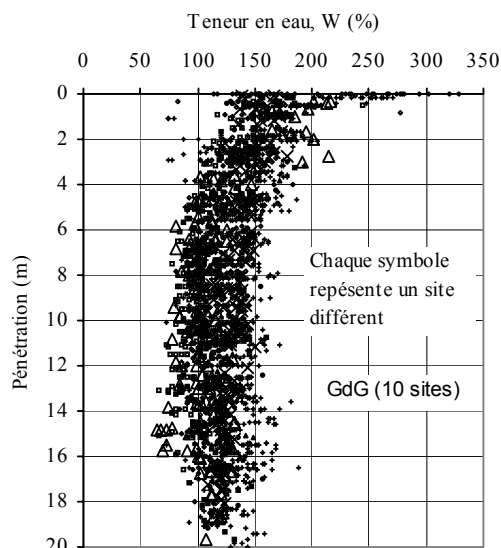


Figure 1. Évolution de la teneur en eau avec la profondeur.

Corrélativement les poids volumiques saturés sont particulièrement faibles, partant de 12 à 13 kN/m³ au niveau du fond pour atteindre 13 à 15 kN/m³ au delà de 6-8 m. Ces valeurs sont nettement inférieures à celles observées dans les sédiments du Golfe du Mexique (Fig. 4).

3.2 Teneur en carbonates

Les teneurs en carbonates sont généralement comprises entre 5 et 15% et varient de manière erratique avec la profondeur. Les observations au MEB indiquent que la calcite est sous la forme de débris de coquillages très fins (< 30 µm).

3.3 Teneur en matière organique

La détermination de la teneur en matière organique des sédiments du Golfe de Guinée a fait l'objet d'une attention particulière.

La méthode dite de la perte au feu couramment utilisée en géotechnique surestime grossièrement la teneur en matière organique (MO de 10 à 20%). Le chauffage à des températures de l'ordre de 450°C libère l'eau de constitution des kaolinites dont la réduction de poids est assimilée à de la matière organique. Cette méthode est à proscrire.

La méthode chimique par oxydation au dichromate de potassium donne des valeurs typiquement comprises entre 5 et 15% qui, pour un même échantillon, peuvent être deux fois plus faibles que les valeurs obtenues par perte au feu. Ces valeurs paraissent cependant fortes par rapport aux observations au microscope électronique et aux teneurs en carbone organique total (COT) mesurées sur quelques spécimens.

La quantité COT exprime la teneur en carbone entrant dans la constitution des molécules organiques. Sa valeur a toujours été trouvée proche de 2%. La détermination de la teneur en matière organique demanderait des analyses chimiques très complètes permettant d'identifier la nature et la proportion relative des différentes molécules organiques présentes dans les sédiments. En admettant un rapport assez vraisemblable de 2 à 3, la teneur en matière organique ne dépasserait pas 6%.

3.4 Analyse granulométrique

La granulométrie des sols fins est traditionnellement obtenue en mécanique des sols par sédimentométrie, l'hexamétaphosphate étant utilisé comme agent dispersant. Cette tech-

nique s'avère inopérante sur les argiles du GdG en raison d'une mauvaise défloculation des particules.

Des procédures spécifiques ont été développées (Thomas et al., 2005). Elles nécessitent le recours aux ultrasons et à l'usage de résines à base de sulfonates pour assurer une bonne dispersion. Il en ressort que les matériaux sont quasiment entièrement composés de fines (plus de 95% < 80 µm) avec une proportion élevée de particules < 2 µm (de 50 à 80%).

3.5 Plasticité

Une caractéristique majeure des sols du Golfe de Guinée est leur très forte plasticité (Fig. 2). L'indice de plasticité (I_p) est typiquement compris entre 70 et 120 mais peut atteindre 150 au niveau du fond. Ces valeurs sont nettement plus élevées que celles des sols du Golfe du Mexique pourtant qualifiés de très plastiques ($30 < I_p < 70$). La limite de plasticité W_p est quasiment constante avec la profondeur (voisine de 45%) tandis que la limite de liquidité W_L décroît de 150-200 au niveau du fond à 120-160 vers 6-10 m de pénétration. Dans le diagramme de Casagrande, les sédiments sont classés comme argiles fortement plastiques (CH) à limons fortement plastiques (MH).

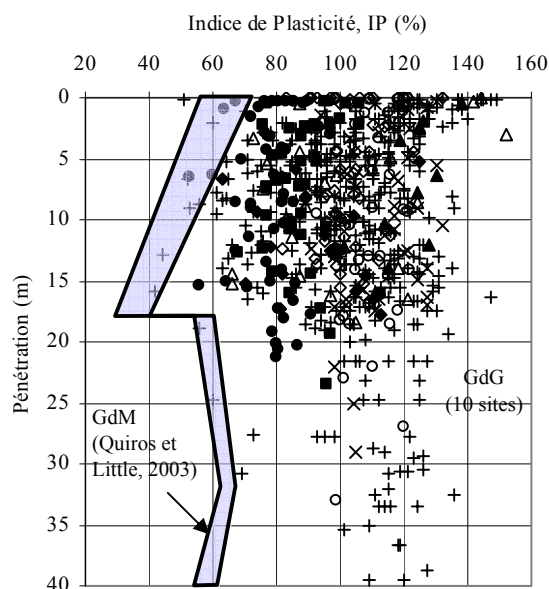


Figure 2. Évolution de l'indice de plasticité avec la profondeur.

Des analyses de diffraction aux rayons X (DRX) effectuées sur les échantillons bruts montrent que la minéralogie est dominée par la fraction argileuse (40 à 60%), résultat cohérent avec les analyses granulométriques (50 à 80% de particules < 2 µm). L'identification des différentes fractions argileuses s'est avérée plus délicate (Thomas et al., 2005) et nécessite le suivi de procédures spécifiques. Les kaolinites constituent la phase dominante (de l'ordre de 50%) mais les smectites sont en proportion significative (typiquement 15 à 25%). Les smectites sont responsables de la forte plasticité des matériaux.

4 RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT NON DRAINÉ

4.1 Profils de résistance au cône (CPT)

Deux profils de résistance de pointe pénétrométrique sont présentés sur la figure 3. Ils sont représentatifs des nombreux essais CPT réalisés sur les sites profonds du Golfe de Guinée.

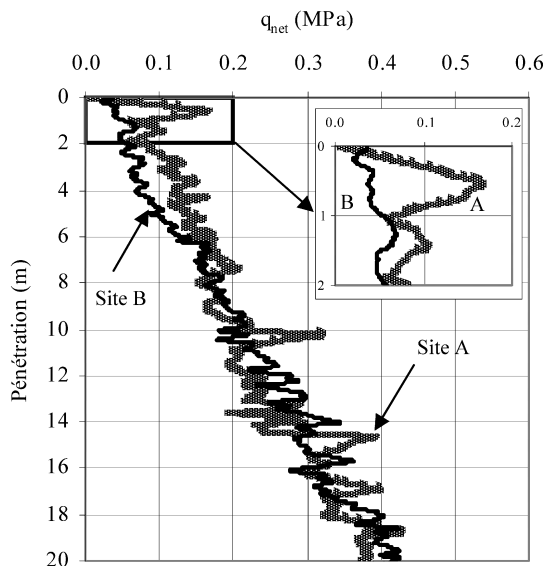


Figure 3. Profils types de résistance de pointe pénétrométrique.

Au-delà de 2 m de pénétration et jusqu'à 30-40 m sous le niveau du fond, limite de pénétration des systèmes modulaires opérés, la résistance de pointe nette q_n croît linéairement avec la profondeur. Le gradient de résistance Δq_n est compris entre 15 et 30 kPa/m avec des variations locales (sur un même site) du même ordre que les variations régionales (d'un site à un autre).

Dans les deux premiers mètres de pénétration, deux types de profils peuvent être observés :

- soit un profil « avec pic », caractérisé par une forte croissance de q_n qui atteint 120-200 kPa entre 0,4 et 0,7 m de pénétration, puis décroît progressivement pour se réaligner sur le gradient général vers 2 m sous le niveau du fond ;
- soit un profil « sans pic », avec une valeur de q_n de 15 à 30 kPa au niveau du fond et augmentant ensuite selon le gradient observé en profondeur.

La présence de ces pics de résistance situés juste sous le niveau du fond n'a pas reçu à ce jour d'explication satisfaisante. De tels pics n'ont pas été observés dans le Golfe du Mexique;

on en a trouvé en Méditerranée ; on en rencontre sur de nombreux sites du Golfe de Guinée mais pas sur tous. Certains auteurs (Sultan et al., 2001) ont suggéré que des forces de succion osmotique dues à d'intenses échanges ioniques près de l'interface sol-eau pourraient produire une « surconsolidation » apparente du matériau mais il s'agit d'une simple hypothèse.

4.2 Profils de résistance au cisaillement non drainé

Les essais au scissomètre in situ (VST) fournissent des mesures de pic de la résistance au cisaillement non drainé du sol S_{uv} à des intervalles de 1 à 1,5 m. La résistance de pointe nette q_n est liée à S_{uv} par le facteur de cône N_{kv} . Pour les sols du Golfe de Guinée, N_{kv} est compris entre 10 et 14 mais des analyses plus précises indiquent que le facteur de cône serait voisin de 11 en surface et croîtrait ensuite pour atteindre des valeurs de l'ordre de 14 à 15 en profondeur (Puech et al., 2005).

La valeur du gradient de cohésion dans les argiles profondes du Golfe de Guinée est souvent voisine de 1,5 kPa/m, peu différente de celle des sols du Golfe du Mexique en dépit de leur plus faible poids volumique. Le rapport normalisé S_u/p'_o est supérieur à 1 dans les premiers mètres et décroît ensuite pour se stabiliser à des valeurs de l'ordre de 0,4-0,5 entre 10 et 30-40 m de profondeur. Ce même rapport est nettement plus faible dans les sols du Golfe du Mexique (voisin de 0,3).

5 HISTOIRE DES CONTRAINTES/ CONTRAINTES IN SITU

Les valeurs élevées du rapport S_u / p'_o peuvent suggérer l'existence de phénomènes de surconsolidation. De fait, les essais oedométriques interprétés par la méthode de Casagrande conduisent à des valeurs de p'_c supérieures à la pression effective en place p'_o . Le rapport p'_c / p'_o est de l'ordre de 2 sur les premiers mètres de pénétration et décroît ensuite jusque vers 1,3 à 15-20 m de pénétration. Au-delà les données sont rares mais suggèrent des valeurs voisines de 1,2.

Comme il est clairement établi que les sols considérés n'ont fait l'objet d'aucune surcharge, on s'abstiendra pour éviter toute confusion de parler de « surconsolidation » et on adoptera la terminologie de Burland (1990) qui nomme YSR (Yield Strength Ratio) le rapport p'_c / p'_o .

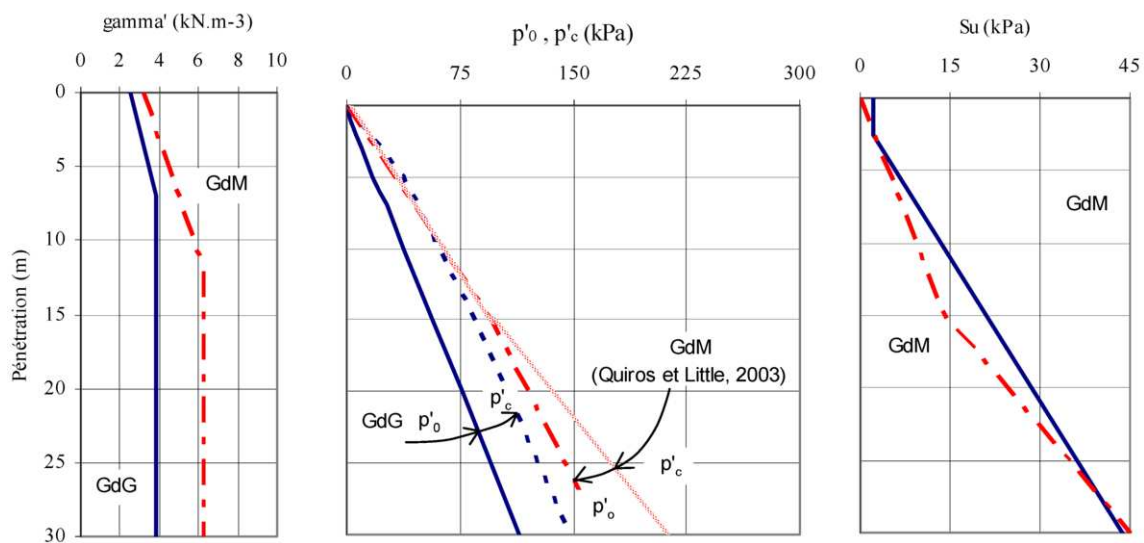


Figure 4. Profils types de poids volumiques, de consolidation et de cohésion dans les Golfes du Mexique (GdM) et de Guinée (GdG)

5.1 Sédimentation et effet de structure

La figure 4 permet de comparer les profils types de contraintes effectives de sols du Golfe de Guinée (GdG) et du Golfe du Mexique (GdM). Si les différences de gradient de p'_o s'expliquent par les différences sur les poids volumiques, les profils de p'_c sont peu comparables. Dans le GdM les sols apparaissent normalement consolidés ($p'_c \# p'_o$) jusque vers 10-15 m de pénétration puis la différence $\Delta p = p'_c - p'_o$ croît avec la profondeur suggérant que Δp peut être attribué à des changements de structure liés à la contrainte et au temps (consolidation secondaire et vieillissement). Dans le GdG la valeur de Δp est élevée sur les premiers mètres, puis tend plutôt à décroître pour retrouver des valeurs comparables à celles du GdM à plus grande profondeur. Ceci suggère que les fortes valeurs de Δp observées à faible profondeur dans le GdG auraient une origine structurelle ou chimique.

Burland (1990) a proposé un modèle conceptuel permettant de comparer la compressibilité des argiles naturellement sédimentées avec celle des argiles reconstituées. Les propriétés des argiles reconstituées, ou propriétés intrinsèques, sont inhérentes au sol lui-même et sont indépendantes de son état naturel. Dans un diagramme ($I_v, \log p'_o$), où I_v représente l'indice des vides normalisé, la compressibilité des argiles reconstituées peut être représentée par une ligne unique, dite ligne de compression intrinsèque (ICL). Les propriétés des argiles naturelles sont influencées par la structure du sol (agencement et/ou collage). La structure dépend de nombreux facteurs tels que le mode de dépôt, le vieillissement, la cimentation, le délavage. L'évolution de l'indice des vides normalisé avec la profondeur dans un dépôt naturel est appelée courbe de compression sous sédimentation (SCC). La plupart des argiles naturelles s'organisent autour d'une ligne moyenne, dite ligne de compression sous sédimentation (SCL). Le fait que la ligne SCL soit située à droite de la ligne ICL indique que pour un indice des vides donné, une argile naturelle peut supporter une contrainte verticale effective bien supérieure au poids des terres.

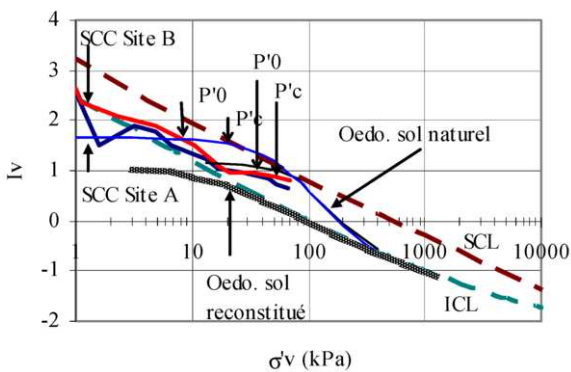


Figure 5. Argiles du Golfe de Guinée dans le modèle de Burland (1990)

On a reporté sur la figure 5 et pour deux sites donnés :

- les lignes ICL et SCL selon Burland ;
- les courbes de compression sous sédimentation (SCC) obtenues à partir des valeurs moyennes des teneurs en eau naturelles observées à chaque profondeur ;
- les courbes de compression normalisées de quelques oedomètres réalisés sur du matériau reconstitué et sur du matériau naturel.

Il est manifeste qu'il existe sur les argiles du Golfe de Guinée un net effet de structure. On distingue par ailleurs très nettement, aux très faibles valeurs de contraintes effectives correspondant aux deux premiers mètres de pénétration, les conditions prévalant pour le site A qui présente un « pic » de résistance de celles du site B « sans pic ». Des travaux plus approfondis sont

en cours pour tenter de relier la compressibilité de ces matériaux à leur microstructure (De Gennaro et al., 2005)

5.2 Coefficient K_o de pression des terres au repos

Le coefficient K_o peut être obtenu par des essais triaxiaux drainés sous déformation radiale constante. La valeur obtenue dans le domaine plastique, représentative des conditions normalement consolidées, soit $K_o(nc)$, se situe dans la fourchette 0,45-0,55.

6 CONCLUSIONS

Les sédiments rencontrés par grandes profondeurs d'eau dans le Golfe de Guinée présentent des propriétés physiques et mécaniques qui les différencient des autres matériaux rencontrés en mers profondes et notamment dans le Golfe du Mexique. La présente communication basée sur une revue de dix sites situés sur les pentes continentales de l'Afrique de l'Ouest dans des profondeurs allant de 450 à 1500 m a permis de mettre en évidence les propriétés communes de ces matériaux en se concentrant sur les propriétés physiques, les profils de résistance au cisaillement non drainé et les profils de contraintes in situ.

Des travaux de recherche ont été nécessaires pour développer des procédures spécifiques permettant une identification pertinente de ces sols. Un travail de fond reste à mener pour relier leurs caractéristiques de compressibilité et de cisaillement à leur histoire et à leur microstructure.

REMERCIEMENTS

La synthèse des données et les études mentionnées dans cette communication ont été menées dans le cadre d'un projet de recherche conjoint conduit sous l'égide du CLAROM. Les partenaires du projet sont IFREMER, IFP, Fugro France, Saipem S.A., Stolt Offshore, Technip et Total.

RÉFÉRENCES

- Borel, D. and Puech, A. 2004. Deepwater geotechnical investigations in the Gulf of Guinea: successes and challenges. *Proc. Seatechweek*, 20-22 Oct. 2004, Brest, France.
- Burland, J.B. 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique* 40, No 3, 329 – 378.
- De Gennaro, V., Puech, A. and Delage, P. 2005. On the compressibility of deepwater sediments of the Gulf of Guinea. *Proc. Intern. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia.
- Puech, A., Borel, D., Dendani, H. and Colliat, J.L. 2005. Deepwater geotechnical site investigations in the Gulf of Guinea: present practice. *Proc. Intern. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia.
- Quiros, G.W. and Little, R.L. 2003. Deepwater soil properties and their impact on the geotechnical program. *Proc. Offshore Technology Conference*, Houston, Tx, OTC paper 15262.
- Sultan, N., Cochonot, P., Cauquil, E. and Colliat, J.L. 2001. Apparent overconsolidation and failure mechanisms in marine sediments. *Proc. OTRC Intern. Conf. Honoring Prof. W. Dunlap*, Houston, Tx.
- Thomas, F., Nauroy, J.F. and Rebours, B. 2005. Mineralogical characteristics of Gulf of Guinea deepwater sediments. *Proc. Intern. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Australia.