

# 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.*

# Reconnaissance des sols marins par grands fonds

## Deep seabed reconnaissance

F. BRUCY, Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, France  
 J.-B. FAY, Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, France  
 R. MONTARGES, Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, France  
 P. LE TIRANT, Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, France

**RESUME** Pour répondre aux besoins nouveaux de reconnaissance géotechnique des sols par grandes profondeurs d'eau, deux appareils ont été spécialement développés et expérimentés en France ces dernières années : un Pressiomètre Autoforeur Marin (PAM) et un Carottier de grandes dimensions à Piston Fixe (STACOR). Les mesures pressiométriques effectuées jusqu'à des profondeurs d'eau de 625 mètres (en juin 1983), avec des pénétrations de plus de 50 mètres dans des argiles silteuses normalement consolidées, confirment la fiabilité d'emploi du PAM et l'intérêt de la pressiométrie en mer. Les résultats comparés des mesures géotechniques sur des carottes prélevées au moyen du STACOR et du carottier classique à piston montrent les avantages considérables de ce nouvel appareil par rapport aux carottiers océanographiques d'utilisation courante.

### INTRODUCTION

L'installation des ouvrages d'exploitation pétrolière par des profondeurs d'eau de quelques centaines à un millier de mètres nécessite la détermination précise des propriétés mécaniques des sols pour le calcul des fondations ou des ancrages et l'évaluation des risques d'instabilité des pentes sous-marines. Par ailleurs la connaissance des sols sous des profondeurs d'eau de plusieurs milliers de mètres s'avère indispensable à la fois pour les géologues, les sédimentologues et les géotechniciens tant pour l'exploration pétrolière que pour la recherche de sites éventuels d'enfouissement de déchets radio-actifs. Les différentes techniques de reconnaissance des sols, par carottages ou mesures in situ, développées pour l'application sur le plateau continental, ne répondent pas généralement aux besoins nouveaux posés par les investigations sur la pente continentale et au-delà. Dans ces conditions les besoins d'une connaissance complète des propriétés géotechniques des sols sous plusieurs centaines ou milliers de mètres d'eau ont conduit, ces dernières années, au développement en France d'un Pressiomètre Autoforeur Marin (PAM) et d'un Carottier de grandes dimensions à Piston Fixe (STACOR).

### 1 - APPAREIL DE RECONNAISSANCE DES SOLS DEVELOPPES POUR LES GRANDS FONDS.

Le Pressiomètre Autoforeur Marin (PAM) et le Carottier à Piston Fixe (STACOR) ont été développés et expérimentés parallèlement.

#### 1-1- Pressiomètre Autoforeur Marin : PAM

Le PAM (Offshore Self-Boring Pressuremeter), développé par l'Institut Français du Pétrole avec l'assistance des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pour les applications jusqu'à un millier de mètres d'eau, comprend essentiellement (Fig. 1) (Le Tirant et al, 1981, 1983):

- un bâti tripode posé sur le fond de la mer, assurant la pénétration dans le sol jusqu'à 60 mètres, d'une sonde autoforeuse pressiométrique de 16 cm de diamètre, suspendue à l'extrémité d'un ombilical hydraulique,
- une cabine de contrôle et de mesure disposée sur un navire,
- un câble ombilical électrique reliant la cabine et le bâti de fond.

Le PAM est communément opéré à partir d'un navire non spécialisé, équipé d'un moyen de manutention adapté (partique ou grue) (Fig. 2). Les dimensions des semelles et les dispositifs d'orientation de l'appareil permettent de poser le bâti sur des sols de cohésion  $C_u \geq 1.5$  kPa, sur des pentes pouvant atteindre 8 à 10%.

La vitesse d'avancement en autoforage est de l'ordre de 10 cm/mn et la durée d'un essai pressiométrique de 20 mn. Il en résulte que la durée d'exécution d'un sondage de 50 mètres, avec un essai pressiométrique par mètre, est d'environ 24 heures.

L'appareil entièrement télécommandé fournit deux types d'informations en temps réel :



Fig. 1 - Le PAM

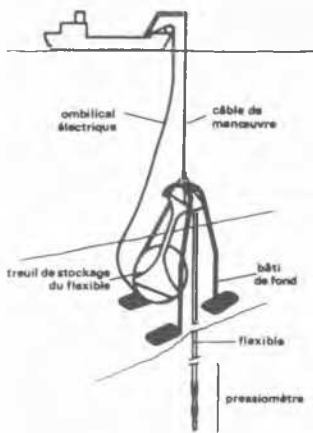


Fig. 2 - Mise en oeuvre du PAM

- d'une part les diagraphies d'autoforage,  
- d'autre part les courbes pressiométriques.

hauteur : 8.5 m

poids : 160 kN



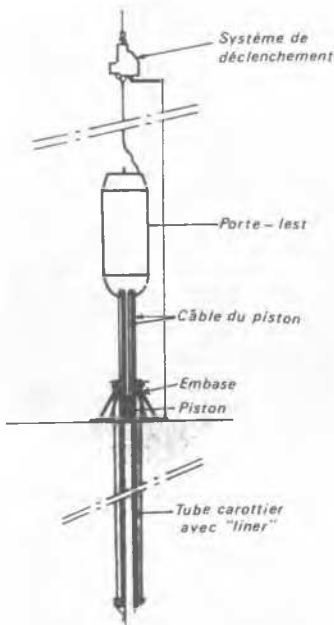
Fig. 4 - Mise en oeuvre du STACOR

plus de 35 mètres pour une longueur de tube carottier de 30 mètres. La mise à l'eau se fait par basculement de l'appareil soutenu au moyen d'un portique (Fig. 4).

Le carottier est descendu au moyen d'un câble jusqu'à proximité du fond. La hauteur de chute libre, provoquée par un système de déclenchement, ne dépasse généralement pas deux à trois mètres.

### 1.2. Carottier à Piston Fixe : STACOR

Le STACOR (Fixed Piston Corer) a été développé par l'Institut Français du Pétrole, la Société Nationale Elf-Aquitaine (Production) et la Compagnie Française des Pétroles pour le prélèvement de carottes jusqu'à des profondeurs d'eau de 5000 à 6000 mètres. L'appareil se compose (Fig. 3) :



Poids : jusqu'à 10 t  
L. tube : 30 m  
ø carotte : 11 cm

Fig. 3 - Le STACOR

- d'un tube carottier avec une chemise intérieure de protection de la carotte (de diamètre 11 cm),  
- d'un lest permettant d'atteindre un poids d'environ 10 tonnes pour une longueur de tube de 25 à 30 mètres,  
- d'un piston maintenu en position fixe grâce à une liaison par câble et poulies avec une embase reposant sur le fond de la mer durant la pénétration du tube dans le sol.

L'immobilisation du piston permet le prélèvement de carottes peu remaniées, de longueur équivalente à la pénétration dans le sol du tube carottier.

Le montage des divers éléments du tube carottier s'effectuant à l'horizontale, la mise en oeuvre du STACOR nécessite une longueur libre sur le pont du navire de

## 2 - RECONNAISSANCE DES SOLS EN MER AU MOYEN DU PAM.

### 2.1. Expérience acquise avec le PAM.

Le PAM a été testé de façon systématique, à partir de 1979, sur plusieurs sites, d'abord à terre, puis en mer.

Les sites d'expérimentation terrestres avaient été choisis en raison de la représentativité des caractéristiques géotechniques vis-à-vis de la gamme de sols rencontrés couramment en mer. Ces essais ont permis d'accumuler un grand nombre de données de référence.

De nombreux sondages ont été opérés sur divers sites marins bien identifiés : formation sableuse au port du Havre, formation bicouche de sables et silts dans le Golfe de Fos, sédiments argilo-silteux du quaternaire récent dans le Golfe de Lion sous 50 mètres d'eau et jusqu'à 30 mètres de pénétration. C'est au large de l'Espagne, à l'est du delta de l'Ebre, que le PAM a été le plus intensivement expérimenté, d'abord sur le plateau continental sous 125 mètres d'eau dans une formation argilo-silteuse relativement raide avec des passées sableuses, puis sur la pente continentale, successivement sous 225, 265 et 625 mètres d'eau dans une formation d'argile silteuse normalement consolidée. Le dernier sondage sous 625 mètres d'eau a atteint 51 mètres de pénétration, avec une vingtaine d'essais pressiométriques, en dix-sept heures d'opération.

Les expérimentations du PAM comptent à présent plus de 500 mètres de sondage et quelque 230 essais pressiométriques dans un large éventail de sols fins (sables, silts, argiles) rencontrés couramment en mer.

La fiabilité de fonctionnement du PAM et la qualité des mesures pressiométriques sont parfaitement indépendantes de la profondeur d'eau. L'acquisition des données et le traitement en temps réel assurent un suivi continu du bon déroulement du sondage et des mesures pressiométriques.

Un logiciel spécialement adapté permet actuellement l'exécution d'essais pressiométriques cycliques à amplitude de pression contrôlée.

## 2.2. Résultats géotechniques obtenus au PAM.

Un sondage PAM fournit deux types de données complémentaires : les diagraphies de paramètres d'autoforage et les courbes pressiométriques.

Les deux paramètres d'autoforage les plus significatifs sont l'effort de fonçage de la sonde et la pression dans la cellule pressiométrique non dilatée (Fig. 5):

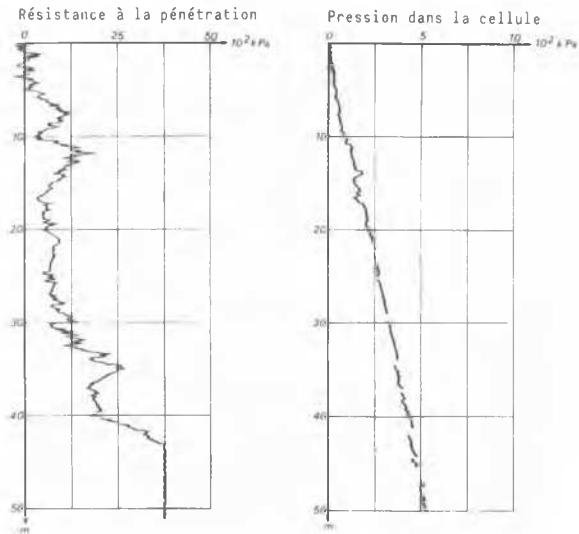


Fig. 5 - Exemple de diagraphies d'autoforage sous 625 m d'eau.

- la diagraphie de l'effort de fonçage de la sonde autoforeuse (Fig. 5), directement représentative des propriétés mécaniques du sol comme la résistance de pointe au pénétromètre (CPT), varie avec la nature et les propriétés des formations traversées et permet de déceler les hétérogénéités locales du sol. Des corrélations ont été établies entre la résistance à la pénétration de la sonde et la résistance de pointe  $q_c$  au pénétromètre.

- la diagraphie de la pression régnant dans la cellule pressiométrique non dilatée fournit des informations très précieuses sur le bon déroulement du sondage : une pression voisine de la pression hydrostatique garantit la bonne qualité de l'autoforage.

Les données pressiométriques déduites des courbes pressiométriques sont équivalentes à celles obtenues à terre, mais la fiabilité des mesures opérées en mer leur confère un intérêt accru avec la profondeur d'eau du fait des difficultés de prélèvement de carottes non remaniées :

- la pression  $p_0$  dans la cellule pressiométrique non dilatée est bien représentative de la contrainte horizontale totale dans les sols,

- la pression  $p_{20}$  (ou pression limite) est essentielle pour le dimensionnement des fondations. Les valeurs de  $p_{20}$  ont atteint 1800 kPa à 50 m de pénétration dans l'argile silteuse normalement consolidée (Fig. 6).

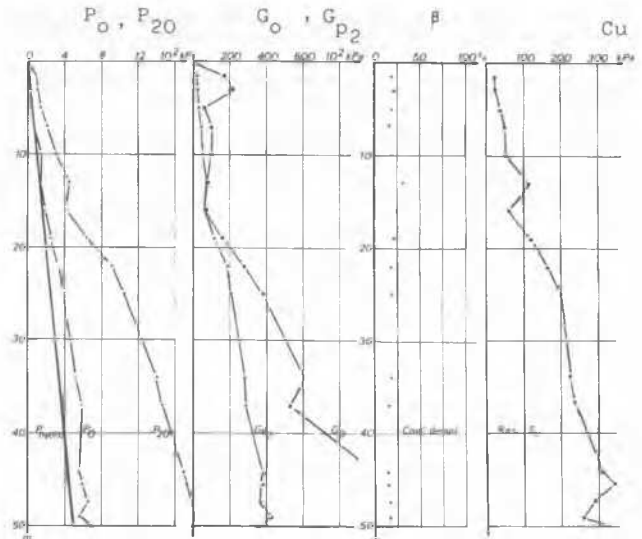


Fig. 6 - Exemple de profils de mesures pressiométriques sous 625 m d'eau.

- les modules de cisaillement pressiométriques, tangent  $G_0$  et sécant  $G_{p2}$ , sont bien représentatifs des caractéristiques de déformabilité du sol en place, non remanié,

- le coefficient  $\beta = \frac{p_{20} - p_0}{p_{20} - p_5}$  est significatif

de la nature des sols et permet une identification des couches de terrains traversées,

- la résistance au cisaillement  $C_u$  dérivée de la courbe pressiométrique est environ 1.5 fois la cohésion  $C_u$  déduite de l'essai triaxial CU dans les argiles normalement consolidées. Dans ces sols on s'aperçoit que la valeur de  $C_u$  obtenue par la corrélation de Ménard :  $C_u = (p_{20} - p_0)/5.5$  est en bon accord avec celle déduite de l'essai triaxial.

- le rapport résistance de pointe  $q_c$ /pression  $p_{20}$  est compris entre 1 et 1.5 pour 15%  $< \beta < 25\%$  dans le cas des argiles et argiles silteuses normalement consolidées. Ce rapport s'accroît avec  $\beta$  en accord avec les corrélations établies précédemment par Ménard.

## 3 - RECONNAISSANCE DES SOLS EN MER AU MOYEN DU STACOR.

### 3.1. Expérimentation du STACOR.

Le STACOR a été expérimenté, en mai 1983, dans le Golfe du Lion par des profondeurs d'eau successives de 50, 500 et 1250 mètres, dans une formation d'argile silteuse homogène du quaternaire récent, préalablement reconnue par sismique réflexion à haute résolution. Plusieurs carottages ont été effectués sur les trois sites.

Deux carottages réalisés par 500 m d'eau, avec le STACOR équipé d'un tube carottier de 20 m-

tres, d'un poids total de 7 tonnes, avaient pour objet de tester la qualité des carottes prélevées :

- dans l'essai 1, le STACOR fonctionne normalement,
- dans l'essai 2, l'appareil est gréé à la manière d'un carottier océanographique à piston classique. Le tableau ci-dessous indique les résultats obtenus.

Essai	Grément	Pénétration du tube dans le sol (m)	Longueur de la carotte	Coefficient de remplissage %
1	piston fixe	18.6	18.0	97
2	piston "mobile"	18.8	13.4	71

La longueur réduite de la carotte 2 s'explique à la fois par le tassement de la carotte et l'effet "bouchon" résultant du déplacement du piston durant la pénétration dans le sol du tube carottier.

Le carottage effectué par 1250 m d'eau avait pour but de vérifier les possibilités d'observer sur carottes représentatives la présence de discontinuités éventuelles résultant de glissements mis en évidence par sismique haute résolution. Une carotte de 15,30 m avec un taux de remplissage de 91 % a été prélevée.

3.2. Qualité des carottes prélevées.

La comparaison des carottes 1 et 2 par analyse au gamma-densimètre et mesures au scissomètre de la résistance au cisaillement met en valeur tout l'intérêt du carottier à piston fixe (Fig. 7) :

- dans le cas de la carotte 1, correctement prélevée (taux de remplissage 97%), le poids volumique croît légèrement avec la profondeur. De même la résistance au cisaillement augmente régulièrement avec la profondeur suivant un gradient bien caractéristique des formations normalement consolidées.

- dans le cas de la carotte 2, fortement remaniée au prélèvement (taux de remplissage 71 %), la résistance au cisaillement et le poids volumique en tête de la carotte traduisent un remaniement du fait d'un effet dit de "pistonage". Au-delà, les valeurs de la résistance au cisaillement, supérieures à la normale et tout à fait erratiques, sont significatives d'une carotte particulièrement remaniée.

Les pénétrations atteintes et la qualité des carottes prélevées mettent en évidence (Fig. 8) les

successions lithologiques résultant de glissements de terrains avec :

- une poche vaseuse ( $\gamma < 15 \text{ kN/m}^3$ ) au niveau -7.5m
- probablement un plan de glissement vers la cote -14.5m

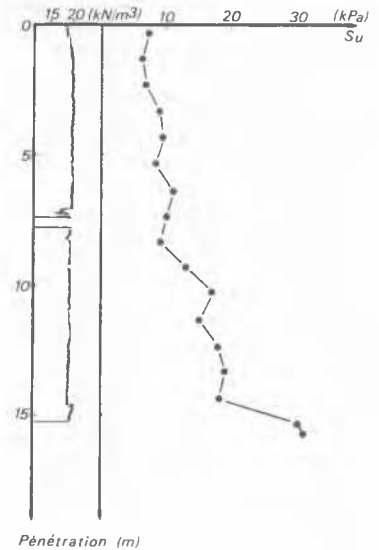


Fig. 8 - Carotte prélevée sous 1250 m d'eau

CONCLUSIONS

1. Le pressiomètre Autoforeur Marin PAM a été expérimenté avec succès dans divers types de sols (sables, silts, argiles normalement consolidées), sous des profondeurs d'eau variant de quelques mètres à 625 mètres. L'appareil actuellement opérationnel peut être mis en oeuvre jusqu'à un millier de mètres d'immersion.

La qualité des mesures opérées confirme l'intérêt du pressiomètre pour les investigations des propriétés de déformation et de résistance des sols fins en mer.

2. De nombreuses corrélations ont été établies entre les paramètres déduits des mesures au PAM et des mesures conventionnelles dans les sols rencontrés les plus fréquemment sur la pente consolidée (argiles et silts normalement consolidés).

3. Le Carottier à Piston Fixe STACOR est actuellement le seul appareil de carottage permettant de prélever des carottes de 25-30 mètres, jusqu'à 5000 à 6000 mètres d'immersion dans les plaines abyssales, sans recours à un navire de forage. La qualité des carottes prélevées montre l'avantage considérable des carottiers à piston fixe par rapport aux carottiers océanographiques classiques à piston.

4. Le PAM et le STACOR constituent deux techniques complémentaires pour la reconnaissance des sols par grandes profondeurs d'eau.

REFERENCES

Le Tirant P., J-B. Faÿ, F. Brucy and J-F. Jézéquel (1981): "A Self-Boring Pressuremeter for Deep Sea Soil Investigation", 13th Ann. Offshore Tech. Conf., Houston, Paper OTC 4019.

Le Tirant P., J-B. Faÿ et F. Brucy (1983) : Le "Pressiomètre Autoforeur Marin (PAM)". Symp. Int. In-Situ Testing, Paris, Vol. 2, p. 327-335.