

Session 5 : Stabilité des Pentes - Etudes géotechniques - Prélèvements
d'échantillons

- MESURES GEOTECHNIQUES PAR GRAND FOND

- * P. Cochonat, G. Damy, B. Leduc, J. Meunier, F. Harnegnies, L. Floury.
- * IFREMER Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

L'étude des sédiments marins, et plus particulièrement de leurs propriétés géotechniques sur les pentes ou les bassins profonds nécessite le développement d'outils nouveaux et spécifiques, pouvant travailler par grande profondeur d'eau (jusqu'à 6000 m). Ce type de développement technologique trouve son application dans la recherche scientifique. Il permettra aussi de répondre aux besoins provoqués par le déplacement des activités industrielles vers le large (exploitations minières profondes, implantation d'ouvrages de Génie Civil, pétrole profond, câbles sous-marins...).

Le comportement mécanique des sédiments est habituellement étudié à partir d'analyses de laboratoire sur échantillons. Ces analyses ne permettent pas de prendre réellement en compte l'état des contraintes in-situ. L'objectif visé est donc de déterminer in-situ les propriétés géotechniques qui dépendent essentiellement des relations entre particules fines et fluides intergranulaires (pression interstitielle en place).

A l'IFREMER ces travaux ont été entrepris dans le cadre des projets "Nodules" et "Processus Sédimentaires et Instabilités sur les Pentes". Pour cela, des mesures superficielles sont réalisées sur des points-clés identifiés sur les fonds marins, principalement à partir de données de très haute résolution comme par exemple l'imagerie sonar.

Deux types d'instrumentation ont été développés. Ces deux types correspondent à deux stratégies différentes de mise en oeuvre. L'une à partir du submersible le Nautille (au moyen d'un scissomètre pour la mesure de la résistance au cisaillement non drainée) a permis pour la première fois de réaliser des mesures géotechniques in-situ dans les sédiments des zones à nodules. Dans ce cas le submersible a permis aux géologues et ingénieurs de faire le meilleur choix possible des sites de mesures afin de conduire une spectaculaire opération de vérité-terrain.

L'autre stratégie correspond à la mise en oeuvre par câble porteur, à partir d'un navire océanographique classique, d'un châssis autonome posé sur le fond (équipé d'un piézo-cône pour la mesure de la résistance de pointe et de la surpression interstitielle induite sur 2 m de profondeur dans le sédiment). Grâce à sa facilité de mise en oeuvre et à son automatisation de fonctionnement très poussée, ce "module géotechnique" peut être déplacé près du fond et peut ainsi réaliser une série de mesures au cours d'une même "plongée" (20 max.). Les résultats acquis lors des premières campagnes scientifiques ont permis de montrer l'intérêt et la faisabilité de ce procédé. Pour l'avenir, ce type d'outil pourrait servir de plateforme de développement d'un véritable "laboratoire de mesures sur le fond" par la multiplication du nombre de paramètres mesurés.

Session 5 : Slopes stability - Geotechnical studies - Sampling

DEEP WATER GEOTECHNICAL TESTING

P. Cochonat, G. Damy, B. Leduc, J. Meunier, F. Harmegnies, L. Floury

IFREMER Centre de Brest, B.P. 70, 29280 Plouzané, France

The study of marine sediments, and more specifically of their geotechnical properties requires the development of special new tools fit to work in deepsea environment (up to 6000 m water depth) for surveying along the slopes or in deepsea basins. The technological development of new instruments is required for the purposes of the academic science research and for some deep-water geotechnical problems related to the further developments achieved by the offshore industry (deep sea mining, site investigations, deepsea oil industry, submarine cables...).

The mechanical behaviour of sediments is usually studied from laboratory core analyses which do not take into account the real state of in-situ stresses. Therefore, the aimed purpose is presently to determine the in-situ geotechnical properties which mainly depend on the relationship between fine-grained particles and intergranular fluids (pore pressure).

At IFREMER, these achievements have been pursued in the framework of two scientific programs : (1) "Nodules" and (2) "Sedimentary Processes and Instability on Slopes", for which surficial measurements have been conducted on selected seafloor targets usually pre-defined from high resolution geophysical data.(i.e. sonar images).

Two kinds of instrumentation have been developed in correlation to two different strategies of handling at sea. On one hand, there is the instrumentation of the submersible "Le Nautille" equipped with a vane shear device, which enabled us to measure for the first time the in-situ undrained shear strength of pelagic sediments in the nodule environment. The possibility of accurately choosing on the seafloor the testing sites by means of a submersible, enabled us to achieve this spectacular operation of ground-truthing.

On the other and, the other set of instrumentation is an autonomous equipped frame tethered by a cable. It is a supported rig which can be handled by any customary oceanographic vessel and which is designed to penetrate the seafloor up to 2 m with a piezo-cone. Since this "geotechnical module" is highly automatized, it can be moved close to the sea bottom and achieve several measurements in a row (20 max.). The relevance and the efficiency of such an instrumentation have been confirmed by the results obtained during the first scientific cruises. In the future, this kind of achievement may be used as a platform for further development of a real "in situ laboratory" by collecting from the seafloor an increasing number of various data.

Session 5 : Stabilité des pentes-Etudes géotechniques-Prélèvements d'échantillons

- MESURES GEOTECHNIQUES PAR GRAND FOND

- P. Cochonat, G. Damy, B. Leduc, J. Meunier, F. Harmegnies et L. Floury.

- IFREMER Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

Mots-clés : instrumentation - géotechnique - mesures in-situ - scissomètre - piézocône - sédiments marins profonds -

INTRODUCTION

Les mesures géotechniques par grand fond dont il est question dans cet article s'appliquent à l'étude des sédiments marins sur les pentes continentales ou les bassins profonds, sur la base des développements technologiques réalisés à l'IFREMER. La notion de "grand fond" correspond à la zone s'étendant au delà du plateau continental, c'est à dire par des profondeurs d'eau généralement supérieures à 200-300m. Plus qu'une limite physiographique, il s'agit en réalité de la coupure qui existe entre le domaine conventionnel de l'activité industrielle "offshore" et le domaine de la conquête profonde des océans (Fleureau, 1977, Richards, 1985). Du point de vue technologique cette coupure correspond également à la nécessité de développer des outils nouveaux par leur conception et leur mise en oeuvre, pouvant travailler par grande profondeur d'eau (jusqu'à 6000 m). Ce type de développement technologique trouve d'abord son application dans la recherche scientifique et plus particulièrement en sédimentologie marine. C'est ainsi qu'à l'IFREMER les programmes "Nodules Polymétalliques" et "Processus Sédimentaires et Instabilités sur les Pentes" ont pu servir de cadre pour le développement des deux outils présentés dans cet article : le SCISSOMETRE GRAND FOND et le MODULE GEOTECHNIQUE. Mais ces outils ont également pour objectif de pouvoir permettre de répondre aux besoins de reconnaissance de site provoqués par le déplacement des activités industrielles vers le large (exploitations minières profondes, implantation d'ouvrages de Génie Civil, pétrole profond, câbles sous-marins...).

LES OBJECTIFS

Dans tous les cas il s'agit d'étudier in situ le comportement mécanique des sédiments. Par grand fond, avant d'envisager une étude de la colonne sédimentaire sur une grande épaisseur, qui nécessiterait l'utilisation de moyens lourds comme les navires foreurs, le géologue marin va d'abord s'intéresser aux dépôts sédimentaires près de l'interface. La caractérisation géotechnique des sédiments superficiels va venir utilement compléter les connaissances acquises au moyen de reconnaissance géophysique et de carottage. Au sens purement géotechnique, cette approche correspond donc bien à étude du "comportement mécanique des sols", c'est à dire des sédiments marins superficiels.

Ces sédiments sont en fait un mélange constitué d'un assemblage de particules de nature minérale (grains), de fluides interstitiels (eau-gaz) et de matière organique. Ce mélange est destiné à devenir une roche sédimentaire par suite d'actions chimiques et physiques qui constituent la diagenèse (Caron et al. 1989). La diagenèse comporte 4 phases (figure 1) :

- 1 -la dégradation de la matière organique,
- 2 -la néoformation (précipitation de certains éléments minéraux),

- 2 -la néoformation (précipitation de certains éléments minéraux),
- 3 -la cimentation,
- 4 -la compaction (déshydratation).

Lorsque le géotechnicien s'intéresse aux sédiments superficiels, il doit éviter de ne prendre en compte que la quatrième phase (compaction) comme c'est habituellement le cas en mécanique des sols pour expliquer tous les phénomènes de consolidation. En effet la surconsolidation des sédiments superficiels s'effectue rapidement parce qu'elle est le résultat de l'action combinée de ces quatre phases agissant près de l'interface, et ne peut pas être due au seul effet de la compaction qui n'interviendra vraiment que lors de leur enfouissement.

D'autre part, seules les mesures in-situ vont nous permettre de mesurer les vrais dimensions des paramètres mécaniques des sols, en tenant compte de l'état des contraintes in-situ, et cela est plus particulièrement vrai pour la pression interstitielle en place des fluides qui va évidemment jouer un rôle majeur sur le comportement mécanique de cet assemblage. Par rapport aux mesures de laboratoire, les mesures in-situ présentent donc l'avantage de répondre aux problèmes inhérents au prélèvement qui mettent en cause la qualité des échantillons (Fleureau, 1977) :

- remaniement mécanique lors du prélèvement,
- expansion de l'eau interstitielle,
- expansion des gaz dissous,
- influence de la température,
- décomposition de la matière organique,
- précipitation des carbonates,
- manipulation et stockage des échantillons.

Les mesures in situ vont donc permettre de calibrer les mesures de laboratoire, mais également d'aborder l'étude de la variabilité latérale des propriétés géotechniques, de la dynamique sédimentaire et de la "diagénèse précoce" avant enfouissement. Enfin, elles sont un complément aux données géophysiques, notamment acoustiques, qui peuvent être ainsi calibrées -et c'est souvent l'un des premiers objectifs visés- afin de répondre à l'important problème de la corrélation entre propriétés acoustiques et propriétés mécaniques des sédiments.

LA STRATEGIE

Du point de vue de la stratégie appliquée pour atteindre nos objectifs scientifiques, les mesures qui restent superficielles devront être nombreuses afin de confirmer les résultats caractéristiques pour chaque faciès identifié et afin d'étudier leur variabilité latérale. Cette stratégie sera toujours guidée par la volonté de réaliser des mesures sur des points-clés constitués par des cibles pré-sélectionnées. La plupart du temps, l'imagerie sonar ou les données de sismique très haute résolution vont nous permettre de définir les cibles de mesures. A l'IFREMER, le SAR (Système Acoustique Remorqué) (Augustin et Voisset, 1989) est considéré comme l'outil de référence en la matière et les mesures in situ sont presque toujours réalisées en complément de la reconnaissance SAR.

LES OUTILS UTILISES

De nombreux projets ont été lancés pour répondre au besoin de mesures géotechniques par grand fond (Le Tirant, 1976, Fleureau, 1977, Richards, 1985), mais à notre connaissance, peu de réalisations ont vraiment abouti. Quelques exemples de développements parmi les plus connus sont présentés dans le tableau de la figure 2 (Richards, 1985). Ce tableau nous montre que la plupart des outils vise une pénétration réduite dans le sédiment (étant donné les difficultés de mise en oeuvre) associée à une large gamme de profondeur d'eau. Nous ne connaissons pas l'état d'avancement de

certains projets, comme le projet DORA qui vise une plus grande pénétration. Mais comme c'est fréquemment le cas dans ce domaine, de nombreux projets restent au stade expérimental sans vraiment aboutir à des systèmes opérationnels (Le Tirant, 1976). Il est évident que pour les grands fonds, les obstacles au développement technologique et à la résolution des problèmes de mise en oeuvre sont nombreux. C'est aussi la raison pour laquelle la communauté scientifique s'oriente, entre autres, vers les mesures in-situ indirectes, notamment au moyen des mesures acoustiques visant à caractériser les propriétés physiques des sédiments (Davis et al. 1989).

Cependant le besoin de mesures directes a pu partiellement être couvert à l'IFREMER, grâce aux deux développements technologiques qui sont présentés ici :

- le scissomètre,
- le module géotechnique.

Ces outils ont été réalisés à la demande du Département Géosciences Marines de la Direction des Recherches Océaniques par le Département Instrumentation et Capteur Acoustique de la Direction de l'Ingénierie et de la Technologie qui a assuré le suivi et le contrôle technique des opérations souvent confiées à divers sous-traitants. Les principaux sous-traitants sont la Société Suber de Brest pour la partie électronique, la société Meunier de Brest pour la partie mécanique et le Centre d'Etudes et de Construction des Prototypes d'Angers pour les capteurs de mesure.

LE SCISSOMETRE GRAND FOND

1 L'OUTIL

Le scissomètre est un outil qui permet de réaliser une mesure de la résistance au cisaillement non drainée des sédiments fins. C'est un paramètre géotechnique étalon pour les argiles. La mesure est réalisée au moyen de la mesure du couple appliquée sur un croisillon enfoncé dans le sédiment (Richards, 1988).

Le scissomètre a été développé pour constituer dans un premier temps, une instrumentation du submersible LE NAUTILE. Il est mis en oeuvre au moyen du bras télémanipulé du submersible et son fonctionnement est entièrement piloté par un micro-ordinateur de l'intérieur de la sphère. Cela permet au scientifique embarqué dans le submersible de choisir précisément la cible, de contrôler tout le déroulement de la mesure et grâce à un logiciel adapté de décider de tous les paramètres de mesures (vitesses de rotation des pales, durée du cisaillement, fréquence d'acquisition etc...). Ainsi, pendant une station d'environ 1/2 h, 3 mesures à 15, 30, et 55 cm de profondeur peuvent être réalisées dans le sédiment.

A l'extérieur du Nautile, le système est composé d'un bati scissométrique (21 kg dans l'eau) que l'on peut ranger dans un panier spécifique adapté au Nautile et qui est constitué des éléments suivants (Figure 3):

- un système de pénétration par action d'une vis sans fin entraînée par un moteur hydraulique,
- un module de mesure travaillant en équipression (pression ambiante maxi de 600 bars, température de 0° à 55°, couple maxi : 1 m.daN, précision 1 % pleine échelle).
- une plaque d'embase limitant la pression au sol, équipée d'un système d'ancrage pour reprendre les efforts de pénétration et de rotation.

Cet ensemble est relié au Nautile par un système de largage (la partie pénétrant dans le sédiment peut être déconnectée pour des raisons évidentes de sécurité), par les connections électriques et par une platine hydraulique reliée au circuit à la centrale du submersible (140 bars)

A l'intérieur de la sphère du submersible prennent place :

- un rack électronique constituant la centrale de mesure et d'acquisition (équipé d'un micro-processeur SUBER) en liaison avec le scissomètre par des passages de coque et relié au micro-ordinateur par une classique liaison RS 232,

- un micro-ordinateur (EPSON PX 8 : seul micro-ordinateur portable répondant à nos besoins à cette époque) pouvant être utilisé en mode terminal en liaison directe avec le micro-processeur du Scissomètre ou de façon plus conviviale à travers un logiciel spécifique de contrôle-commande-acquisition.

2 LES RESULTATS

Les résultats obtenus avec ce scissomètre ont plus que largement contribué au succès de la première campagne de plongée jamais réalisée sur les champs de nodules polymétalliques (campagne NIXONAUT) (Cochonat et Le Suavé, 1990). Du point de vue de la mise en oeuvre, la stabilité du Nautille et les performances de son bras télé-manipulé nous ont permis de conduire les essais in-situ plus facilement que nous l'avions imaginé au préalable. Du point de vue de la mesure proprement dite, le scissomètre permet donc d'obtenir en temps réel le type de courbe effort/déformation d'où l'on peut tirer facilement différents paramètres dont la valeur de la résistance au pic correspondant à ce que l'on appelle communément la cohésion. (Figure 4). Cette opération a donc permis pour la première fois de réaliser des mesures fiables de la cohésion des sédiments par 5000 m de fond. 25 stations de mesures réussies ont ainsi été réalisées en 6 plongées.

L'un des premiers objectifs majeurs de la campagne était la comparaison des résultats entre mesures de laboratoire et mesures in-situ. Sur ce point, la figure 5 montre clairement pour une même zone que la connaissance de la valeur de la cohésion dans les résultats des mesures de laboratoire est tronquée puisqu'elle n'indique pas la même largeur de gamme que les valeurs mesurées in-situ, même si la valeur moyenne reste comparative dans les deux cas. Les mesures in-situ sont donc nettement plus discriminatives.

Ainsi la notion de faciès géotechnique a pu être introduite pour caractériser différents états physiques des sédiments superficiels, pourtant de même nature (argiles à organismes siliceux de l'unité acoustique transparente) (Figure 6). Ces différents faciès géotechniques montrent une assez forte variabilité de la valeur de la cohésion. Contrairement à ce que l'on pensait, il n'existe pas de couche superficielle homogène, sur le plan géotechnique. Dans une même unité (plage minière ou "bassin" sédimentaire défini par une variation d'épaisseur de la série transparente entre deux "accidents" structuraux), les valeurs de cohésion mesurées dans les premiers décimètres semblent inversement proportionnelles à l'épaisseur de toute la série transparente d'épaisseur variable (d'ordre décamétrique). La distribution spatiale des propriétés géotechniques est totalement contrôlée par l'histoire géologique : le taux de sédimentation des argiles constituant l'ensemble de la série plio-quadernaire contrôle les propriétés mécaniques superficielles. La variabilité des conditions de dépôt conditionne donc la variabilité de la cohésion au sein d'une même unité lithologique.

LE MODULE GEOTECHNIQUE

1 L'OUTIL

Un deuxième outil a été plus récemment développé par l'Ifremer : le MODULE GEOTECHNIQUE. L'objectif visé pour l'utilisation de cet outil relève de la même thématique et de la même stratégie que pour le scissomètre mais diffère par le capteur utilisé et surtout par la mise en oeuvre.

Il s'agit d'un châssis instrumenté que l'on pose sur le fond et qui permet de réaliser plusieurs stations de mesures et une carotte (de haute qualité géotechnique) pour chaque mise à l'eau. Mise en oeuvre par simple câble porteur il fonctionne en toute autonomie énergétique sur le fond suivant un protocole de mesures pré-défini grâce à une automatisation très poussée (Figure 7). Il dispose à cet effet d'une centrale électronique embarquée qui permet le contrôle du fonctionnement, la commande des mesures et l'acquisition des données (réalisation : Sté SUBER de Brest). Il peut travailler par des fonds allant jusqu'à 6000 m avec une pénétration de 2 m dans le sédiment (avec une

poussée maxi disponible de 500 daN). Le capteur essentiel est un piezocône haute résolution de diamètre standard (36 mm) qui mesure en continu pendant la pénétration la résistance de pointe (de 0 à 1000 kPa), le frottement latéral (de 0 à 25 kPa) et la surpression interstitielle induite (de 0 à 1000 kPa) (réalisation : Centre d'Etudes et de Construction des Prototypes d'Angers).

Son originalité réside en partie dans sa mise en oeuvre, qui permet de réaliser une série de station de mesure (20 maximum). Un étude particulière a été conduite au moyen du logiciel FLOSYS (Damy, 1989) pour s'assurer de la stabilité du châssis pendant la mesure afin de gérer au mieux la disposition géométrique navire -cable-chassis (figure 8). Ainsi, l'étude a montré, et l'expérience l'a confirmé, que le meilleur solution consistait à contrôler la forme du cable en connaissant à l'aide d'un "pinger" l'altitude d'un point du cable situé au dessus d'un flotteur, en faisant varier la longueur filée. Un réseau de courbes paramétrées en fonction de la bathymétrie donne l'altitude de consigne du pinger en fonction de l'écart du bateau par rapport à sa position nominale. Il convient donc de rappeler l'importance du positionnement pour conduire ces opérations. La meilleure solution étant de disposer d'un système précis de positionnement du châssis par rapport au bateau (base courte ou base longue) ou d'un système de positionnement radioélectrique du bateau (ex : Syledis).

2 LES RESULTATS

Le module géotechnique a été utilisé récemment lors de deux campagnes scientifiques (campagne Monicya en novembre 1989 sur la pente niçoise et campagne Hudsar en juillet 1990 dans le cadre d'une opération franco-canadienne dans l'Atlantique Nord-Ouest). Les sites de mesures ont toujours été définis et sélectionnés à partir des données SAR acquises préalablement. Ces deux campagnes ont été conduites dans le cadre du projet "Processus Sédimentaires et Instabilités sur les Pentes" de l'Ifremer. Depuis son existence, cet outil a permis de réaliser près de 60 stations de mesure en 15 plongées.

L'exemple de courbes présentées sur la figure 9 montre un résultat spectaculaire et relativement inattendu, il s'agit d'un cas particulier choisi ici pour montrer la précision de ce type de mesure. (La figure 10 permet aussi de montrer d'autres types de résultats que l'on peut acquérir avec cet outil). Sur la figure 9, cinq mesures réalisées lors de la même plongée donnent curieusement des résultats très similaires. Dans ce cas, les stations de mesure sont espacées d'environ 400m. Cet exemple provient de résultat acquis à partir de mesures réalisées dans les sédiments hémipélagiques holocènes sur la pente de Nouvelle Ecosse, sur un site sélectionné à partir des données SAR. Il permet de caractériser ainsi de façon évidente l'existence d'une surconsolidation des sédiments superficiels, alors qu'il s'agit de sédiments très récents et qui n'ont pas subi de réelle consolidation mécanique. La carotte prélevée par le module géotechnique, nous a montré que l'on peut rapporter l'existence de cette surconsolidation apparente à l'existence de terrier rempli d'argiles particulières. Chaque pic de surpression interstitielle visible sur la courbe semble correspondre à un terrier, après vérification sur la carotte. Ce résultat apporte une preuve et dans ce cas l'explication du phénomène de surconsolidation apparente. Ce phénomène est difficile voire impossible à prouver au moyen d'étude sur échantillons et ceci d'autant plus que les moyens conventionnels de carottage ne garantissent pas un conservation correcte des sédiments de surface.

CONCLUSION

Les mesures géotechniques par grand fond présentent un aspect original à plus d'un titre. Elles visent d'abord à réaliser des mesures relativement classiques dans le principe, mais dont la réalisation nécessite des développements technologiques spécifiques capables de fonctionner par grande profondeur d'eau. Leur mise en oeuvre nécessite également de mettre au point des procédés particuliers (chassis autonome) ou

l'utilisation de submersible instrumenté. Les solutions techniques passent nécessairement par des systèmes faisant appel à une haute technologie qui peut alors, et doit, permettre de réaliser des mesures avec une très grande précision et une forte résolution qui réclament des capteurs performants.

Ces outils s'apparentent à des prototypes et sont donc destinés à subir des améliorations qui doivent surtout porter sur l'augmentation du nombre de paramètres mesurés. En effet, lorsque l'essentiel des problèmes techniques inhérents au type de mise en oeuvre sont résolus, l'intérêt est d'utiliser un équipement existant comme une plateforme capable de remplir des objectifs diversifiés. Ainsi à l'Ifremer où le savoir-faire existe maintenant après avoir mené à bien le développement technologique et utiliser dans des conditions opérationnelles deux outils grand fond, le module géotechnique pourra évoluer vers un système multi-paramètre. D'ores et déjà des nouveaux capteurs sont en cours d'étude pour le module géotechnique (implantation du scissomètre grand fond, développement d'une sonde gammadensitométrie dans le cadre du projet MAST I). D'autre part, pour le futur, il est envisagé de lui adjoindre un système de mesures des propriétés acoustiques (particulièrement, des ondes de cisaillement) qui permettra d'ouvrir ainsi la voie vers la caractérisation acoustique des propriétés physiques des sédiments par grand fond.

En ce qui concerne la mise en oeuvre du module géotechnique, il est évident que si la solution choisie permet une utilisation sur tout navire océanographique muni d'un câble grand fond, la conception du système et particulièrement son autonomie devrait permettre de l'adapter à tout navire océanographique de travail en station (ce qui devrait être notamment le cas du projet NEREIS).

Du point de vue des objectifs scientifiques et/ou industriels le module géotechnique a d'abord été développé pour un usage scientifique d'étude de site dans le cadre des grands programmes scientifiques nécessitant des études sédimentologiques fines des sédiments près de l'interface (ressources minérales, environnement et processus sédimentaires, risques naturels ...). Mais ce type d'équipement pourrait valablement trouver sa place dans le cadre du développement industriel vers le large nécessitant d'utiliser des outils spécifiques pour les reconnaissances géotechniques par grand fond, puisqu'en dehors des moyens lourds (type navire-foreur), ces outils grand fond n'existent pas encore sur le marché traditionnel tourné essentiellement vers les travaux de reconnaissance sur le plateau continental.

BIBLIOGRAPHIE

- Augustin J.M. et Voisset M. 1989. Image sonar et cartographie en géologie. L'onde électrique, 69, pp. 20-27.
- Caron J.M., Gauthier A., Schaaf A., Ulysse J. et Wozniak J. 1989. La planète terre. ed. Orphys. 271 p.
- Cochonat P. et Le Suavé R. 1990. In situ geotechnical measurements and submersible observations (French Nodules mining area). Technology Research Association Symposium on Deepsea Mining Technology.
- Damy G. 1989. Module Géotechnique. Etude de la mise en oeuvre. Rapport Ifremer. 23p.
- Davis A. M., Bennell J.D., Huws D.G. and Thomas D. 1989. Development of Seafloor Geophysical Sledge. Marine geotechnology, Vol. 8, pp. 99-109.
- Fleureau J.M. 1977. Etude de mécanique des sols en mer profonde. Les techniques de reconnaissance. Rapport CNEXO-Sté RHEOSOL.
- Le Tirant P. 1976. Reconnaissance des sols en mer pour l'implantation des ouvrages pétroliers. Ed Technip. 507 p.
- Richards A. F. 1985. In Situ Testing and Sampling Offshore in Water Depths Exceeding 300 m. Proceedings of Offshore Site Investigation conference. Society of Underwater Technology, London, pp. 129-162.
- Richards A.F. 1988. Vane Shear Strength Testing in Soils. Ed. A.F. Richards. ASTM STP 1014. 378 p.

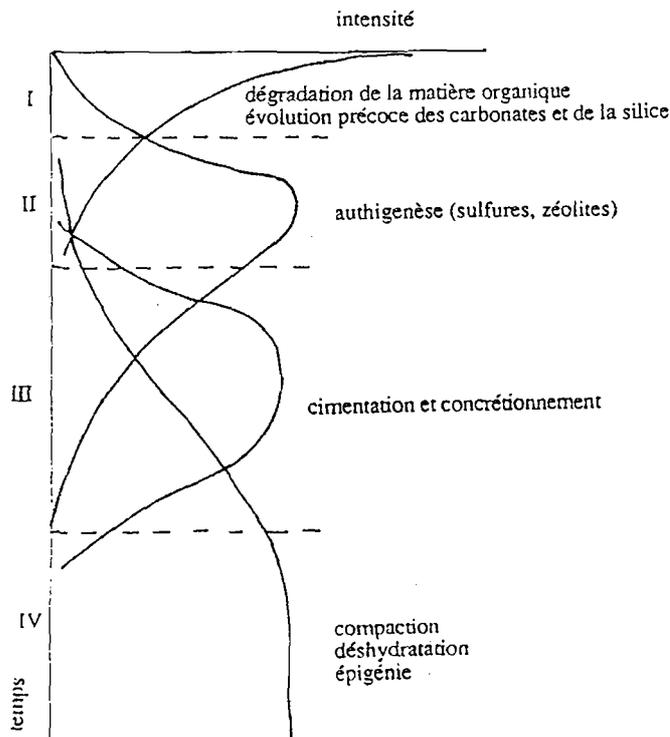


Figure 1 : Dépôts sédimentaires marins : les principales étapes de la diagenèse. (d'après Caron et al., 1988)

OUTIL	CAPTEUR	BATHY MAX (m)	PENETRATION (m)
PAM (IFP....)	Pressiomètre	1000	50
IMAGES (NRIPR, Japon)	CPT, scisso	6000	0,3
ISV (Rhode Island Univ.)	Scisso	6000	1,5
PUPPI (IOS)	Piezomètre	6000	3
DORA (Fugro)	PCPT	6000	50
SEALION (Fugro)	PCPT	6000	5
PENETRATOR (Programme Seabed)	Penetro/accelero	6000	40
SCISSOMETRE (Ifremer)	Scisso	6000	0.6
MODULE GEOTECHNIQUE (Ifremer)	PCPT....	6000	2

d'après RICHARDS, 1985

Figure 2 : Tableau résumant les spécifications de quelques outils de mesure géotechnique in-situ pour grand fond. (d'après Richards, 1985)

Figure 3 : Scissomètre grand fond de l'IFREMER . Diagramme fonctionnel.
(d'après document SUBER)

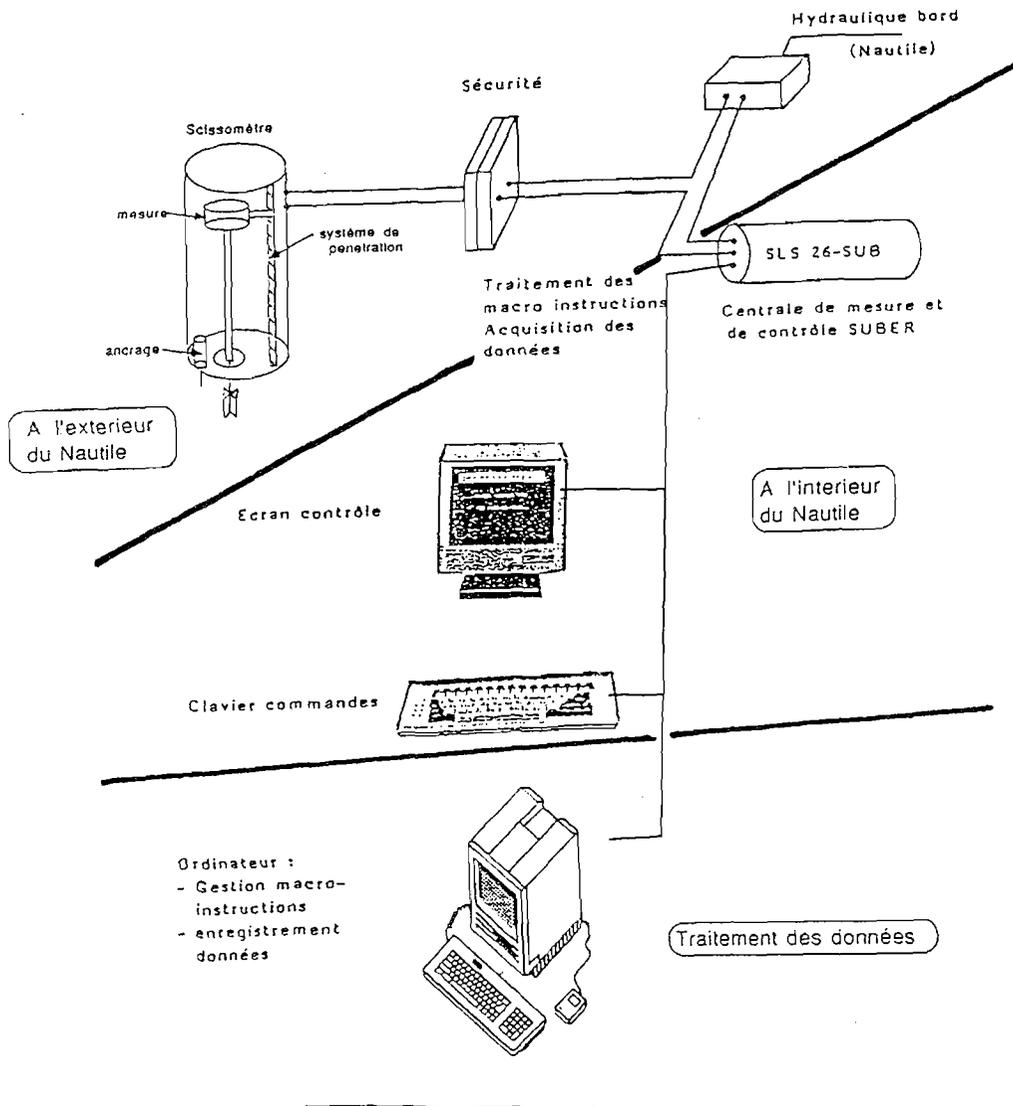
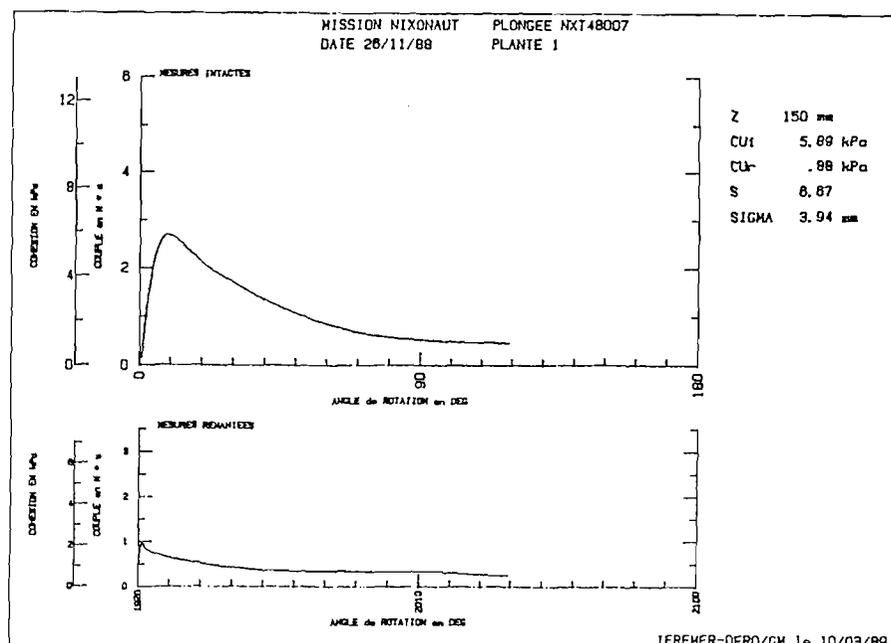


Figure 4 : Exemple de courbe scissométrique obtenue en temps réel.



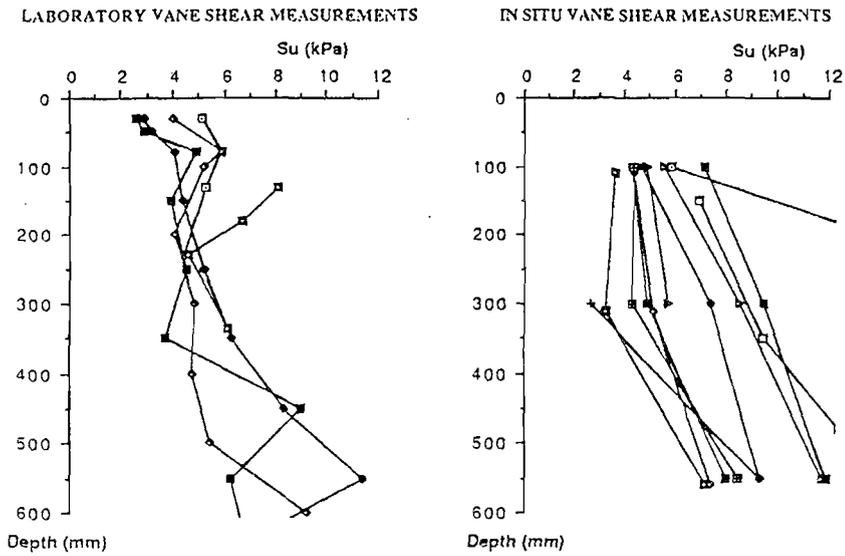


Figure 5 : Mesures scissométriques en laboratoire et in-situ. Résultats comparés pour la même zone. (Campagne NIXONAUT, décembre 1988, mesures in-situ acquises avec le scissomètre grand fond instrumentant le Nautille). (S_u = cohésion non drainée en kiloPascal)

NIXONAUT CRUISE - Results of in situ vane shear measurements showing the three geotechnical facies distribution S_u : undrained cohesion (in situ vane shear strength, in kiloPascal).
 High resolution seismic profile.:
 A : low acoustic reflectivity sonar facies, B : transparent unit, C : stratified unit.

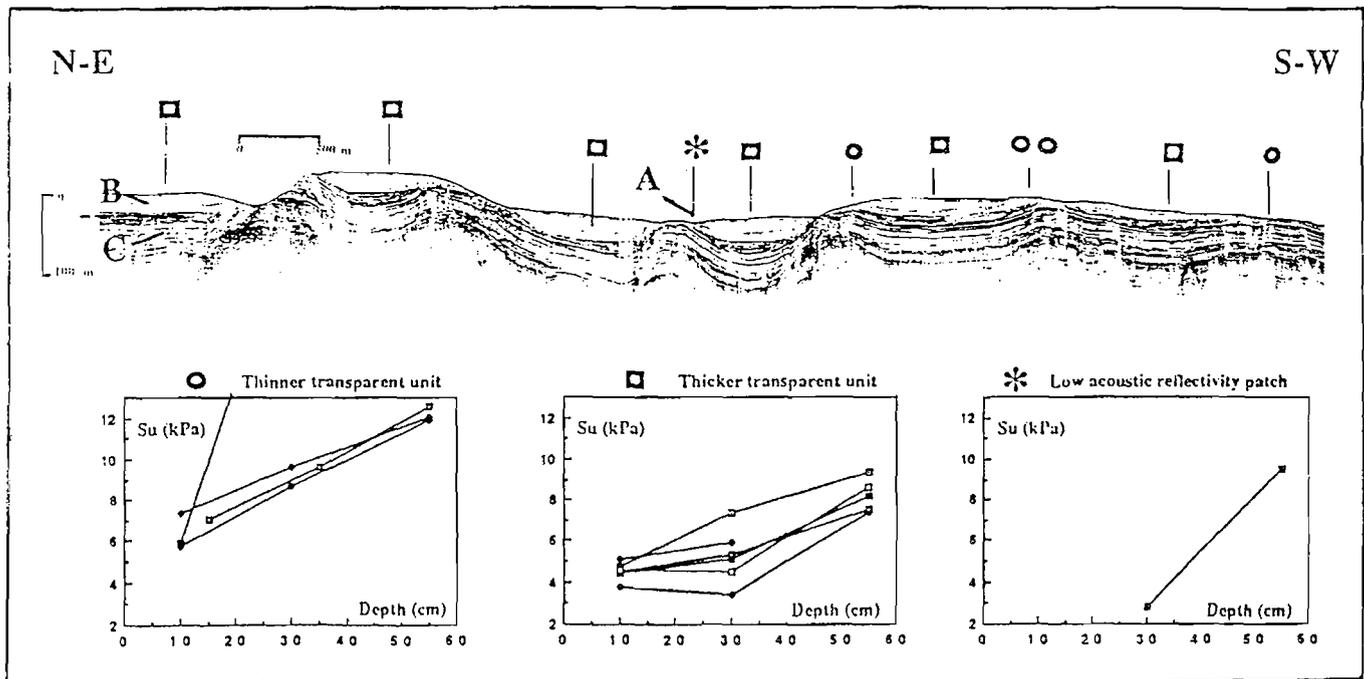


Figure 6 : Campagne NIXONAUT. Résultats des mesures scissométriques in-situ montrant la distribution spatiale des faciès géotechniques dans l'environnement morphostructural visible sur un profil 3,5 KHz du SAR (S_u = cohésion non drainée en kiloPascal)

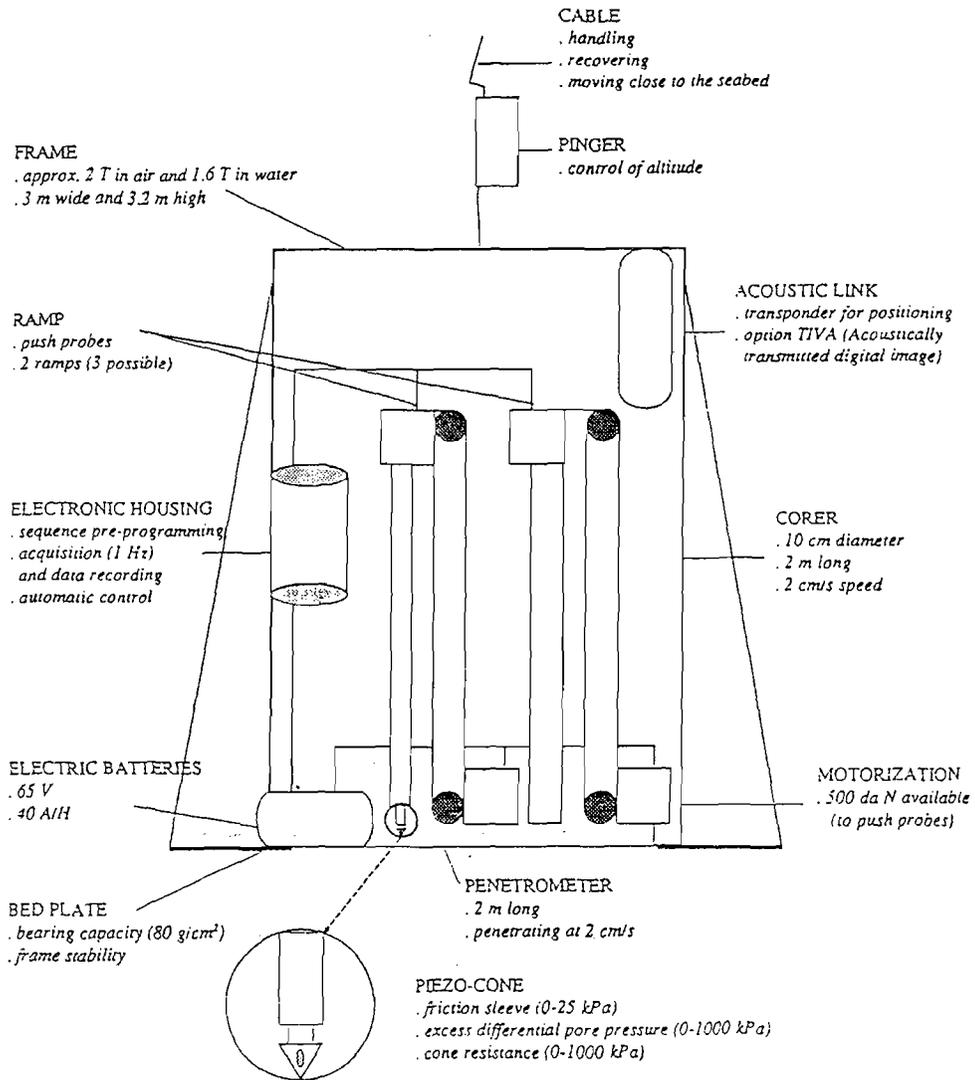


Figure 7 : Module Géotechnique de l'IFREMER. Schéma fonctionnel.

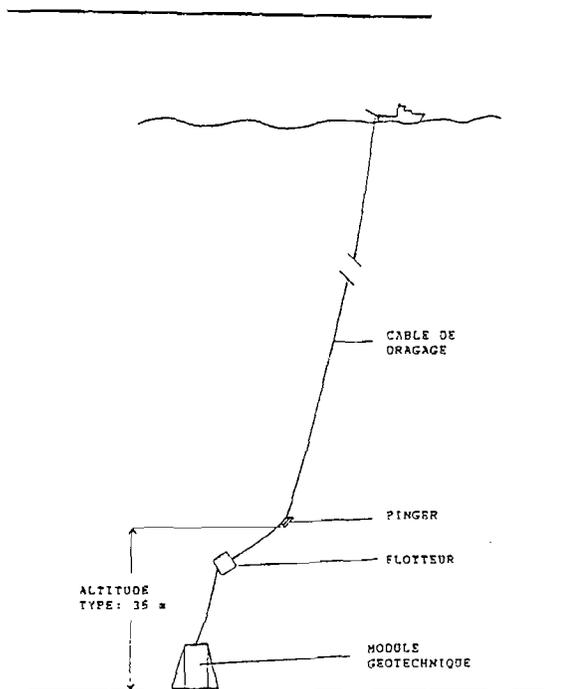


Figure 8 : Schéma de principe de mise en oeuvre du Module Géotechnique.

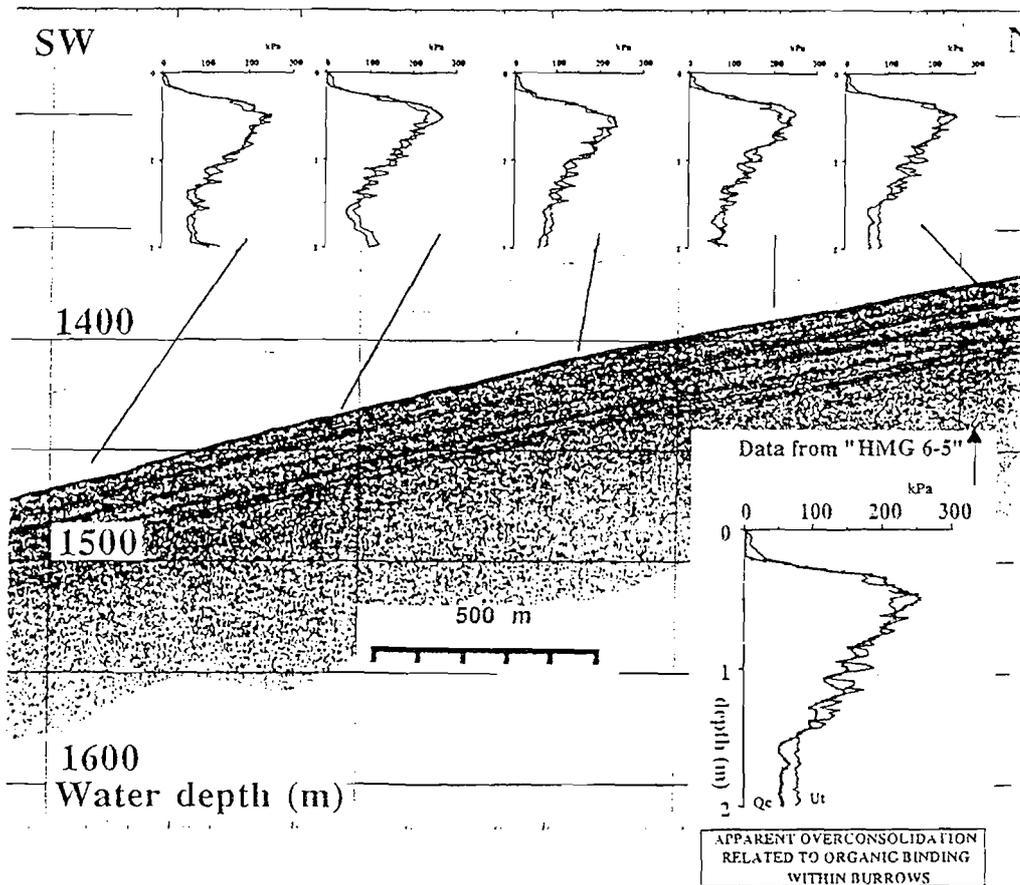


Figure 9 : Exemple de résultats acquis avec le Module Géotechnique. Surconsolidation apparente des sédiments superficiels de la pente de Nouvelle Ecosse.(profil 3,5 khz du SAR, Campagne franco-canadienne Hudsar, Juillet 1990).
 R_p = résistance de pointe qui permet une estimation de la résistance au cisaillement non drainée, donc de la cohésion sur un profil continu.
 U_t = surpression interstitielle induite, paramètre hautement sélectif du point de vue qualitatif (liée à la granulométrie).

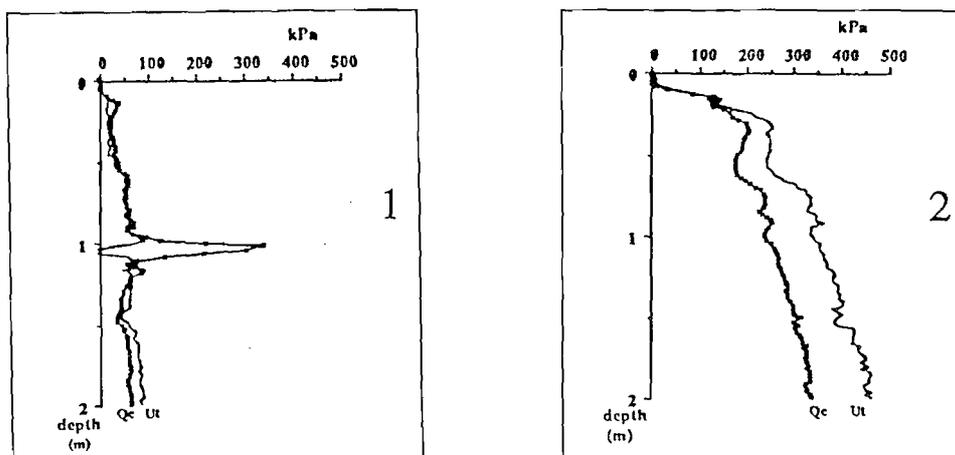


Figure 10 : Deux exemples de résultats de mesures acquises par le Module Géotechnique.
 1 - Forte résistance de pointe (Q_c) et chute de la pression interstitielle (U_t) au passage dans un niveau sableux interstratifié dans un dépôt argileux.
 2 - Mise en évidence d'un processus d'érosion : affleurement d'argile surconsolidée (fortes valeurs de résistance de pointe (R_p) et de pression interstitielle (U_t)).