



# APPROCHE GEOMECHANIQUE DES CAUSES D'ENVASEMENT. APPLICATION A LA RADE DE LORIENT.

A. Alexis

Laboratoire de génie Civil ENSM Nantes - IUT Saint-Nazaire  
B.P. 420 - 44606 Saint-Nazaire Cedex

## **ABSTRACT**

*The silting-in of estuaries and harbours has important consequences for management. Siltation problems are generally only studied from a sedimentological point of view. Our aim is to bring a geotechnical dimension to these phenomena, and to find a methodic approach including soil behaviour.*

*Geotechnical investigations are a way of identifying the nature and behaviour of fine sediments. Laboratory and in-situ experiments, however, are difficult with this kind of material.*

*Stability studies show that the security ratio, regarding the circular rupture of slopes, is sufficient.*

*Two original approaches, of cyclic mechanical stresses acting on the sediments, are suggested. In the first, we show an increase of piezometric level in tidal slopes. In the second, tidal pore pressure can induce liquefaction phenomena in the first meter of submerged mud.*

*An original apparatus is able to regionalise the soft mud thickness, and to predict areas of instability.*

*Such a methodology will be useful for a knowledge of siltation in other harbours.*

## **1. INTRODUCTION**

Le comportement des vases d'un estuaire affecte lourdement la gestion d'un port au niveau de l'implantation des aménagements et des coûts de dragage.

Cependant les problèmes d'envasement sont souvent abordés sous l'angle uniquement sédimentologique. Du fait de la difficulté des mesures en site marin, le comportement des sols estuariens lié à leur environnement spécifique reste mal connu.

C'est grâce à la collaboration de la D.D.E du Morbihan, également consciente de l'importance de ce type de problème, que nous avons mené ces travaux de recherche sur l'envasement dans la rade de Lorient.

Il a été choisi dans la rade un site particulier, la souille du Rohu (150m x 50m, draguée à -4.50m CM), présentant de forts taux d'envasement (jusqu'à 30 cm/mois).

L'approche méthodologique a consisté à mieux connaître les matériaux en place, à tenter de prendre en compte leur spécificité physique et mécanique, et leur conditions environnementales particulières au milieu estuarien; ceci afin d'aboutir à des éléments de compréhension des processus d'envasement fondés sur la mécanique des sols.

## **2. RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE**

Afin de mieux connaître les caractéristiques des sols en place, la reconnaissance a porté sur les sédiments de vase et de souille aux abords du quai du Rohu.

Le matériel destiné habituellement à un usage terrestre a été mis en oeuvre à l'aide d'un ponton (5m x 4m) utilisé à flot ou échoué.

### **2-1 Matériels**

Les principaux appareils utilisés pour les prélèvements et les essais sont les suivants :

- sur vase: piézomètres, scissomètre de chantier, carottier à piston stationnaire.
- en souille: pénétromètre statique à pointe électrique, scissomètre de chantier, carottier manuel pour le premier mètre.
- en laboratoire sur les matériaux prélevés: matériel d'essais d'identification, scissomètre de laboratoire, appareil triaxial, oedomètre.

La figure 1 donne l'implantation des différents points de mesure ou de prélèvements.

### **2-2 Caractéristiques physiques et mécaniques**

L'analyse sédimentologique montre des matériaux essentiellement limoneux, complétés par environ 15% d'argile et 30 à 40% de sable fin.

Les limites d'Atterberg indiquent une forte plasticité des matériaux rencontrés ( $w_l=140\%$  dans le premier mètre,  $w_l=100\%$  ensuite). La vase de souille présente des teneurs en eau très élevées ( $w=200$  à  $300\%$  dans les 20 premiers centimètres).

La teneur en matière organique importante (environ 10% du poids sec) confère à la fraction argileuse une forte activité.

Les essais oedométriques révèlent la forte compressibilité des sédiments rencontrés, avec  $C_c=1$  à  $1,5$  en vase et  $C_c=2$  en souille. Le coefficient de

consolidation  $c_v$  évolue de  $1.10^{-4}$  à  $10.10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ . Le matériau présente un fluage important rendant difficile d'interprétation des essais.

Les valeurs de perméabilité déduites des essais de consolidation en laboratoire montrent une bonne corrélation de la perméabilité avec l'indice des vides, et incitent à adopter une valeur de perméabilité à l'indice des vides naturel de l'ordre de  $5.10^{-8} \text{m/s}$ .

Les résistances au cisaillement sont en général faibles (inférieures à 5 kPa), mais plus fortes sur les horizons coquillés (à -4m CM en souille). Des essais spécifiques ont mis en évidence une forte anisotropie des matériaux, ils conservent une résistance au cisaillement dans un plan horizontal bien supérieure à celle observée dans un plan vertical.

Les sols étudiés sont donc, de part leur structure limoneuse assez perméables, de part leur forte teneur en matière organique très compressibles et sujets au fluage, et fortement anisotropes en résistance.

### 2-3 Limites expérimentales

La situation et la nature des sédiments estuariens ont rendu les mesures délicates.

La nécessité d'un ponton "papillonné" rend peu aisée l'utilisation du scissomètre de chantier. Nous avons pu montrer une bonne corrélation entre ses résultats et ceux obtenus avec le pénétromètre statique à pointe électrique. Le pénétromètre a l'avantage de la rapidité de mesure.

Le carottage manuel à l'aide de tube plexiglass ou PVC est très efficace mais limité au premier mètre.

Les essais oedométriques, avec un matériel classique, sont assez mal adaptés aux vases très molles, ils nécessitent une amélioration de l'appareillage.

### 2-4 Application à la stabilité du talus de souille

Les caractéristiques de résistance des vases constituant les talus de souille ont permis d'évaluer la stabilité au glissement (circulaire et plan) des flancs. La figure 2 montre les différentes hypothèses de profils de résistance prises en compte, ainsi que le cercle critique correspondant. Le coefficient de sécurité calculé est voisin de 5, et devient, après réduction due à la forte plasticité, voisin de 3. La stabilité des talus de souille paraît donc, suivant ces mécanismes, assurée.

L'analyse classique, de type terrestre, ne paraît donc pas en mesure d'expliquer les envasements constatés.

Cependant les particularités de l'environnement estuarien, notamment les conditions cycliques n'ont pas été prises en compte.

### **3. CONDITIONS**

Les conditions cycliques en estuaire sont de plusieurs types: marées, courants, clapot, crues, équilibre biologique saisonnier...

Nous nous intéressons ici à l'influence de de la variation du niveau d'eau de la marée, liée au marnage, sur les conditions hydraulique ou mécanique que subit le sol.

#### **3.1 - Niveau d'équilibre dans un talus d'estran**

Un talus d'estran soumis au marnage connaît un remplissage alternatif. En modélisant le talus (sol incompressible sur substratum imperméable) et l'écoulement (loi de Darcy, marée sinusoidale), la ligne de surface libre dans le massif se trouve régie par une équation aux dérivées partielles non linéaire. Les méthodes de résolution analytique et numérique, corroborées par quelques mesures sur le terrain font constater une surcote du niveau d'équilibre dans le talus par rapport au niveau moyen de la marée. Sur la figure 3, établie pour un sol limoneux, les talus de différentes pentes voient leur niveau d'équilibre croître quand la pente diminue, jusqu'à être voisin du niveau de pleine mer pour des pentes inférieures à l'unité.

La présence de cette quantité d'eau retenue dans le talus peut influencer négativement la stabilité d'ensemble, et la vitesse de l'écoulement sortant à marée basse peut occasionner des affouillements en pied de pente.

#### **3.2 - Contraintes cycliques dans une vase immergée**

Une vase immergée (par exemple de souille) se trouve soumise à une contrainte totale périodique, liée au marnage.

A l'aide de la théorie de Biot (CHIANG 1984) concernant les milieux poreux, et ayant le souci d'utiliser les paramètres géotechniques habituels, il est possible de calculer les contraintes effectives engendrées par ces conditions (ALEXIS 1987-1989).

Ainsi pour un matériau presque saturé, la phase fluide étant compressible, les variations cycliques entraînent une accumulation de pression interstitielle dans la couche de surface du matériau. De ce fait la contrainte effective peut s'annuler, le matériau peut être liquéfié.

La figure 4 représente l'évolution de trois paramètres suivant le type de sol:  $d$  est l'épaisseur de la couche limite dépendant du coefficient de consolidation  $C_v$ ,  $\delta_{2,5}$  est l'épaisseur maximum liquéfiable, sous une amplitude de marée de 2,5 m, dépendant de l'indice des vides  $e$ , du degré de saturation  $S_r$ , et du coefficient de gonflement  $C_s$ , enfin  $e_l$  est l'épaisseur liquéfiée déduite des deux précédents  $d$  et  $\delta_{2,5}$ .

Les sols sableux n'apparaissent pas sujets à cette liquéfaction. Les vases molles quant à elles dissipent lentement la pression interstitielle et possèdent de forts indices des vides, elles risquent de se liquéfier. En outre la présence de matière organique en décomposition assure une non saturation significative.

La vase immergée voit ainsi sa couche superficielle incapable de se consolider sous ces contraintes cycliques. Dans le cas des vases de Lorient, il a été évalué une épaisseur de couche liquéfiée pouvant atteindre 20 cm.

Ce mécanisme engendré par la pression hydrostatique périodique conduit à générer un processus de glissement sur les pentes faibles ou sous l'action d'un courant très faible.

#### 4. CONCEPTION D'UN APPAREIL DE MESURE

L'étude locale a précisé les caractéristiques du sol de la souille du Rohu à l'aide de moyens souvent délicats à mettre en oeuvre. L'extension de l'étude à la rade conduit à ne s'attacher qu'à un nombre restreint de paramètres.

Dans cet optique, il a été conçu un appareil de mesure spécifique de la couche crème centimétrique, le cône de marquage (ALEXIS 1986-1987). Il est principalement constitué d'un cône en tôle d'aluminium (diamètre 500mm, angle 90°, poids immergé 3,8 daN), muni de bandes agripantes, et fixé à un filin. Lorsque le cône est posé au fond les bandes sont marquées par la vase, la lecture de la pénétration s'opère après remontée à la surface. Son fonctionnement est analogue à celui d'un pénétromètre statique.

Cet appareil est adapté à la mesure des très faibles cohésions de surface (0 à 3 kPa) tout en gardant une grande simplicité de mise en oeuvre, très appréciable en milieu maritime.

Les pénétrations au cône peuvent être reliées au gradient de cohésion dans les 20 premiers centimètres. Cependant son avantage principal reste la facilité de mesure qui a permis de dresser une carte (figure 5) à l'aide de plus de 200 points de mesure.

Cette carte visualise trois zones suivant l'importance des pénétrations au cône de marquage.

Les zones critiques et potentiellement critiques sont d'une part en bonne corrélation avec les sites connus pour leur coût de dragage, et d'autre part mettent à jour certains sites dont l'aménagement paraît peu souhaitable.

## 5. CONCLUSION

L'étude a permis de mieux connaître les caractéristiques des vases de la rade de Lorient et surtout leur originalité de composition ou de comportement.

L'approche géomécanique particulière prenant en compte l'influence du marnage fournit un point de vue nouveau sur les phénomènes d'envasement en faisant apparaître un mécanisme probable de mouvement sur le fond.

Cette méthodologie est adaptable à d'autres sites, et son application permettrait d'identifier les mécanismes principaux d'envasement dans les régions estuariennes qui constituent généralement des lieux d'implantation des grands ports.

Nous poursuivons des études dans le domaine de la mécanique des sols estuariens, en s'appuyant à la fois sur la théorie et l'expérimentation, tant en laboratoire qu'en nature.

## 6. REFERENCES

- ALEXIS A. (1983), *Contribution à la stabilité des talus immergés*, 2èmes Journées Universitaires "Mécanique des Sols Appliquée" .E.N.S.G. Nancy p. 261-267
- ALEXIS A. (1986), *Mesure de la couche crème centimétrique à l'aide d'un cône de marquage.*, *Journal de Recherche Océanographique*. Vol.11 n°2 p.47-49
- ALEXIS A. (1987), *Etude géotechnique et sédimentologique de souilles et chenaux de la rade de Lorient. Contribution à la stabilité des sols immergés*, Thèse de Docteur Ingénieur. E.N.S.M. Nantes.pp.372
- ALEXIS A. (1989)(accepté), *Possibilités de liquéfaction d'un sol immergé sous l'action de la marée.*, Vème Colloque Franco-Polonais de Mécanique des Sols Appliquée.
- CHIANG C.MEI (1984), *Wave-induced stresses in a porous-elastic seabed. The applied dynamics of ocean surface waves*. John Wiley & Sons. New York. p.673-705



fig. 2 : calcul du coefficient de sécurité au glissement circulaire du talus de la souille du Rohu

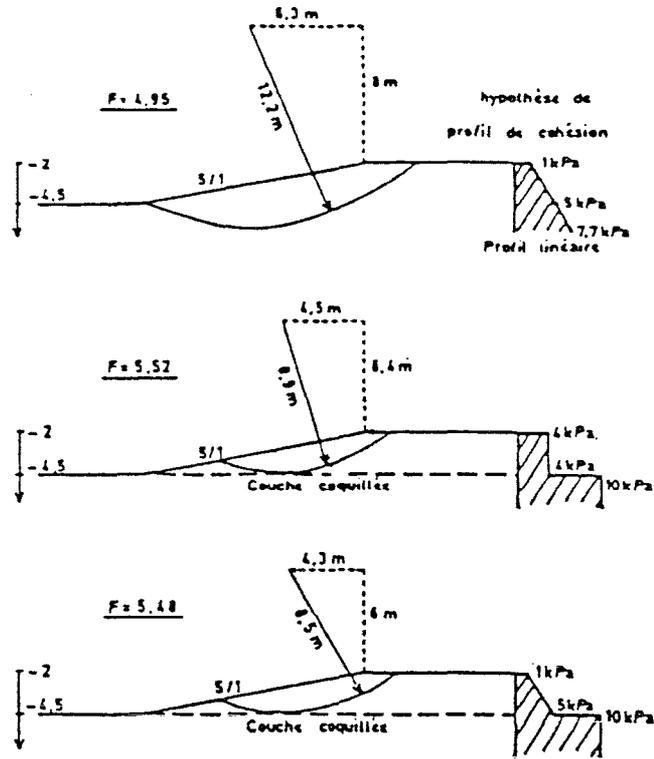


fig. 3 : évolution de la ligne de surface libre suivant la pente du talus

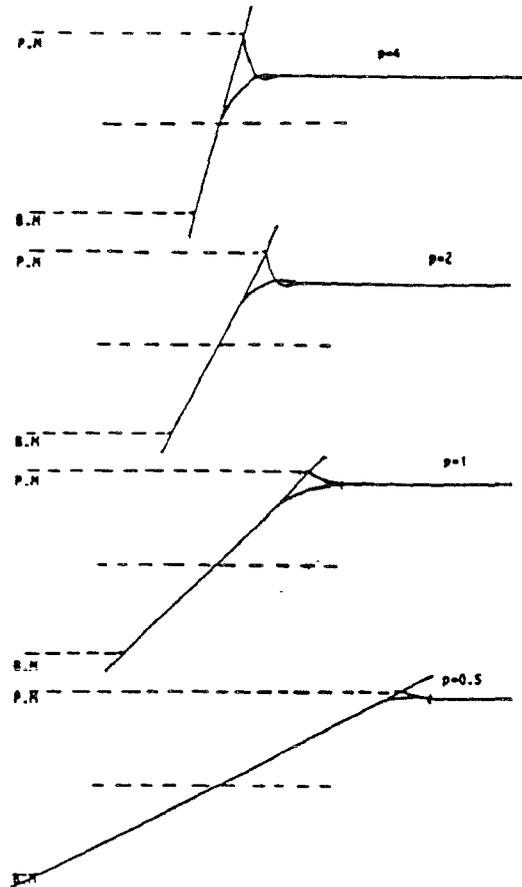


fig. 4 : évolution schématique des possibilités de liquéfaction  
 suivant les types de sols  
 ( $S_r = 0,98\%$  ;  $A = 2,5\text{ m}$ )

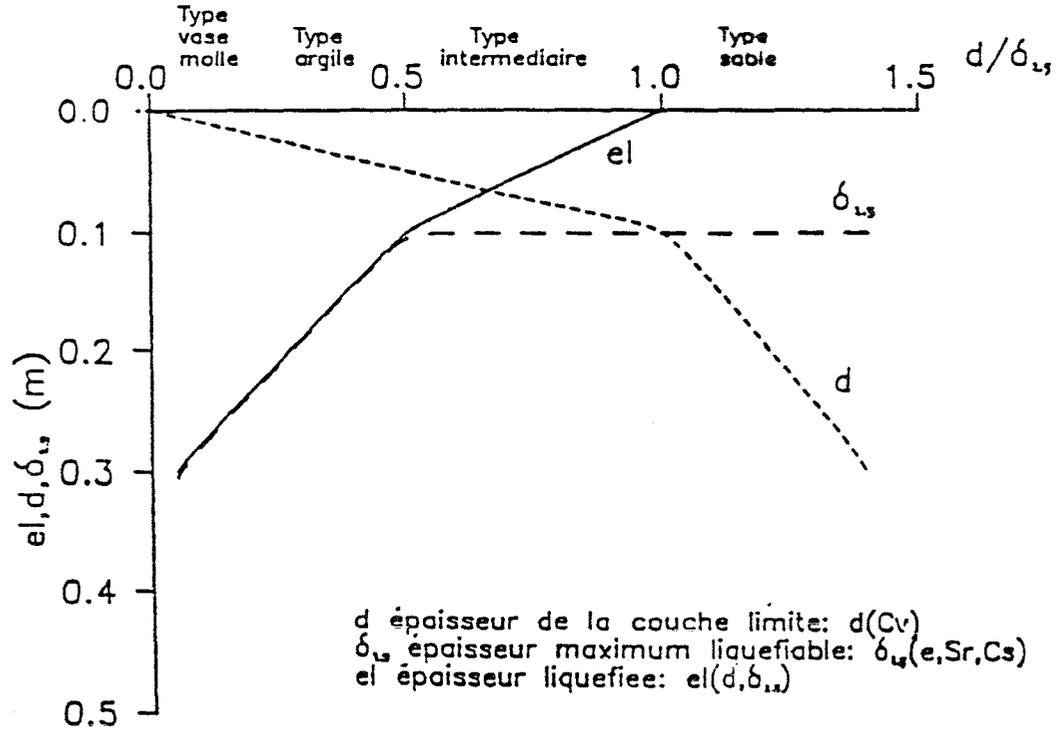


fig. 5 : carte des zones critiques de la rade de Lorient  
(mesures aux cônes de marquages)

