



Comportement des ouvrages sur sols marins à forte teneur en hydroxyde de fer

Alain GROVEL¹

1. Centre Français du Littoral, Maison de la Mer, 1 quai de la Fosse, 44000 Nantes,
France.

grovel@cfl.asso.fr

Résumé :

Dans cette communication sont décrits les sols de deux zones gagnées sur la mer, où les ouvrages ont connu des désordres dus au comportement de ces sols riches en hydroxydes de fer.

L'analyse critique d'essais géotechniques de terrain et de laboratoire, éclairée par les compositions chimiques et minéralogiques des sols en question, conduit à rattacher leur comportement à un modèle visco-élastique.

Deux exemples de désordres sont décrits, et une solution est proposée.

Mots-clés :

Génie côtier – Ouvrages – Fluage de sols – Modèle visco-élastique – Hydroxyde de fer – Bactériologie

1. Introduction

Il s'agit ici d'un retour d'expérience, de recherches ou d'expertises, sur des sols marins, c'est-à-dire saturés d'eau de mer, avec de fortes teneurs en fer, 5%, sous forme d'hydroxydes.

Dans deux exemples, on observe un fluage ; j'appelle ici *fluage*, comme en mécanique, *un écoulement uniforme horizontal de matière sous l'action d'une surpression verticale*.

Cet écoulement horizontal est de nature visqueuse, si l'application de la surpression est lente et supérieure à *une contrainte seuil* ; dans le cas d'une application rapide, au contraire, ou d'un ébranlement, on observera un comportement élastique.

Les 2 sols marins où j'ai pu constater ce phénomène de fluage étaient de nature différente pour leur phase solide ; leurs 2 points communs étaient :

- la saturation en eau de mer,
- leur forte teneur en fer d'origine terrigène.

L'eau de mer est légèrement basique, pH=8,3, conductrice et légèrement visqueuse ; elle contient 10 millions de bactéries au ml, alors qu'une eau continentale en contient en moyenne 3000. Parmi ces bactéries, il y a bien sûr des ferro-bactéries, et l'eau de mer contient toujours du fer colloïdal à l'état de traces ; toutes les conditions sont donc

réunies pour qu'un oxyde de fer terrestre se transforme en gel de limonite, $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Dans un 3^{ème} exemple, je montre donc comment, dans un sable terrestre chargé en fer, l'injection d'eau contenant des ferro-bactéries a provoqué la formation d'un gel transformant ce sable en niveau imperméable.

2. Barrage d'estuaire : le Pont Vanne du Collet

Ce pont vanne, faisant barrage vanne baissées, est situé sur un petit estuaire dans un polder de la côte atlantique française, appelé le *Marais breton*.

J'ai été nommé expert sur ce site en mai 1999 à la suite de désordres sur les pieux de la culée ; l'expertise a duré jusqu'en février 2001, à la suite de quoi les travaux ont repris avec les modifications suggérées, et l'ouvrage fini a depuis donné toute satisfaction.

Les pieux, de diamètre 600 mm, fichés de 25 m dans le sol jusqu'au rocher, avaient fléchi, et le déplacement en tête était de 300 mm. La flexion apparaissait sur 6 à 8 m.

L'étude géotechnique préliminaire avait été expédiée, mais comportait cependant des essais pressiométriques satisfaisants. Je l'ai fait compléter par 3 sondages au pénétromètre statique avec essais au piézocône, 3 sondages au carottier à piston stationnaire, 1 sondage avec essais scissométriques.

Le sol était bien décrit dans une thèse (MOUNES, 1974). Il s'agissait d'une argile marine bleue très fine : 95 à 99% d'éléments inférieurs à 40 microns. La teneur en fer total variait de 3 à 5% du poids sec.

Sur le chantier, cette argile était surmontée de 2 à 3 m de limons.

Le calcul des cercles de glissement indiquait que l'on était en sécurité, et, par ailleurs, l'analyse des enregistrements des piézocônes ne montrait aucune trace de cercles de rupture.

Les essais classiques de géotechnique ont mis en lumière les caractères particuliers de ce type de sols :

- poids volumique très faible, $14,5 \leq \gamma \leq 15 \text{ kN/m}^3$, mesuré au gamma densimètre ;
- teneurs en eau supérieures ou égales aux limites de liquidité ;
- essais oedométriques avec des courbes tassement/temps sans fin... ;
- cohésions non drainées faibles, nulles en cohésion résiduelle.

Les enregistrements des piézocônes ont heureusement montré, au niveau de la zone fléchie des pieux, l'existence d'une couche où le frottement latéral était nul : c'était la couche qui avait flué sous l'effet des seules charges du chantier, remblais temporaires, estacade de la grue etc....

Le passage d'un tombereau chargé ne provoquait aucune ornière, mais son stationnement pendant une nuit se marquait par une auréole de tassement. Le facteur *temps* semblait donc jouer un rôle essentiel et l'apparition d'une partie élastique dans la courbe pressiométrique semblait donc due à la rapidité de l'essai.

Le bureau d'études FUGRO France, mandaté, proposa la solution d'un *écran anti-fluage*, rideau de palplanches interne, ancré dans les couches stables, situé entre les remblais et la culée.

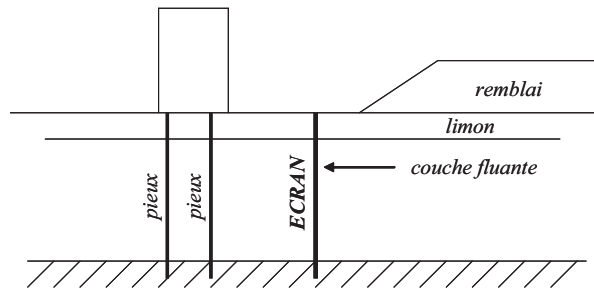


Figure 1. Solution anti-fluage.

Cette solution, conforme à mon analyse de comportement visco élastique d'un sol fluant sous la pression d'un remblai, donc avec un coefficient de poussée active $K_0 = 1$, fut adoptée et mise en œuvre.

Le fonctionnement des vannes, qui ne tolère aucun désordre de la structure, a depuis ce temps été exemplaire, démonstration *a posteriori* de la justesse de l'analyse et des choix de confortement.

3. Comblement accéléré d'une souille portuaire

Cette souille est située au Rohu, sur l'estuaire du Blavet, au nord du Port de Lorient, sur la côte atlantique française.

A Lorient, les désordres d'ouvrages construits sur des remblaiements de vasières furent fréquents et célèbres, à tel point qu'un texte officiel du Sénat, de 1997, parle, au sujet du quai de Kergroise, *de phénomènes d'instabilité et de grand glissement*.

La souille du Rohu, servit de test pour appréhender le comportement géotechnique des sols de vase ; l'étude me fut confiée par le Port de Lorient, et j'en fis un sujet de thèse pour un chercheur au sein du Laboratoire de Génie Civil de l'ENSM de Nantes.

Le problème était le suivant : une petite souille de 150 x 50 m le long d'un quai, était en équilibre naturel à la profondeur de 2,50 m. Elle fut approfondie à 4,50 m en octobre 1980 ; un an plus tard, on était revenu à 2,50 m et, deux ans plus tard à 0,50 m le long du quai. La situation après dragage était donc pire que la situation initiale!

La sédimentation, de quelques mm par an, n'expliquait rien, et l'on comptait sur notre étude géotechnique pour vérifier l'hypothèse d'un glissement circulaire. Celle-ci montra au contraire des coefficients de sécurité confortables ; une rupture brusque aurait d'ailleurs été bien observée par le remarquable suivi du remplissage de la souille qu'avait effectué le Port par sondage hydrographique.

Ce suivi, véritable cinématique, suggérait comme cause probable la succession suivante :

(1) fluage en pied de talus, (2) effondrement de tête de talus, (3) coulées de vases récentes.

Le fluage de la couche à 4,50 m, provoqué par la dépression horizontale du dragage, est dû aux propriétés de cette vase connues par des travaux antérieurs, (GROVEL, 1970). C'est un sol brun lessivé repris par la mer, moitié limon fin, moitié argile, avec 10% de matière organique, et surtout 5% de fer. Les essais de laboratoire géotechnique décrivent ces vases comme *toujours prêtes à couler*, (ALEXIS & GROVEL, 1984), avec des caractéristiques encore plus défavorables que celles de l'exemple précédent : des poids volumiques très faibles, de 13,4 à 15,5 kN/m³, $w \geq w_L$, C_u résiduel toujours nul, courbes tassement/ temps à l'oedomètre, sans fin.

Si l'on ajoute que cette vase se révèle un parfait réflecteur au Sparker, alors qu'en réfraction la vitesse de transmission est $V=700$ m/s, on aura complété le tableau d'un matériau viscoélastique

Comme dans l'exemple précédent, de nombreux essais *classiques*, c'est-à-dire adaptés à des sols élasto-plastiques, ont fourni des résultats incohérents.

4. Colmatage d'un sable ferrugineux par métabolisme bactérien

En 2008, une commune des bords de Loire, envisagea d'injecter l'eau de sortie, donc claire, d'une nouvelle station d'épuration dans les alluvions du fleuve. Je fus nommé expert dans cette affaire car le colmatage fut immédiat ; de perméable ce sable, contenant de 3 à 5% de fer, à 16 m de profondeur, était devenu imperméable. L'analyse bactériologique de l'eau de sortie révéla la présence de *Sphaerotilus natans*, ferrobactérie des plus actives, et un pompage à 16 m, ramena un gel d'hydroxyde de fer, passant à travers les orifices de la crépine. Des documents photographiques d'un bureau d'études (CALLIGEE-Nantes) sont éloquents.

5. Conclusion

Le gros problème de ce type de sols est que leur comportement viscoélastique, et notamment leur capacité de fluage n'apparaît que sur le terrain. Les essais de géotechnique sont, ou trop rapides, ou confinés, ou fonctionnant à l'eau douce, acide, stérile, aérée. Qu'en est-il alors de l'état colloïdal des hydroxydes de fer?

Sur le terrain, il faudra donc privilégier des solutions sages de protection anti-fluage.

6. Références bibliographiques

ALEXIS A., GROVEL A. (1984). *Rapport contrat DDE 56-ENSM*. DDE 56, 20 p.

GROVEL A. (1970). *Etude d'un estuaire dans son environnement*. Thèse, Université de Nantes, 249 p.

MOUNES J. (1974). *Le marais breton et ses marges : étude de géomorphologie et de sédimentologie*. Thèse, Université de Nantes, 2 vol., 345 p.