

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.

Les polymères : Application au forage des pieux de grands diamètres

Polymer slurry in large diameter pile drilling - case histories

M. Bustamante,
 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

R. Boato,
 Trevi, Cesena, Italy

RÉSUMÉ

La présente communication décrit les performances de polymères utilisés pour réaliser un grand nombre de pieux forés, de diamètres compris entre 1,2 et 2,2 m et de longueurs atteignant 40 à 75 m, sur trois sites particuliers : à Taïwan, au Bénin et en Guinée-Bissau. Les pieux devaient traverser des sols souvent pulvérulents. La mise en oeuvre des pieux définitifs a été précédée par la réalisation d'essais de faisabilité et de chargements sur fûts instrumentés avec cellules Osterberg. Les auteurs rapportent l'ensemble des mesures et observations effectuées sur les trois sites, soulignant les limites et les avantages présentés par les polymères.

ABSTRACT

The present paper reports about the performance of polymer slurries used for three projects situated in Taiwan, Benin and Guinea-Bissau. All the above projects concerned large structures to be founded on bored piles, 1.2 m to 2.2 m in diameter and 40 m to 75 m deep. Often the piles were to be excavated through non-cohesive deposits. Full scale preliminary feasibility and load tests were performed on test piles. They were instrumented with Osterberg cells and submitted to static loading. The authors are reporting on which sites the use of polymers has been successful and for which reason they have to be abandoned on others.

1 INTRODUCTION

Le forage des pieux à l'abri d'un tubage de travail récupérable ou sous boue n'est pas sans présenter quelques risques pour peu que les terrains à traverser soient réputés difficiles. Le risque est d'autant plus sérieux que le diamètre et la profondeur à atteindre sont importants. Au-delà de 1,5 m de diamètre et de 50 m de profondeur, la réalisation de tels pieux doit encore faire aujourd'hui l'objet d'une attention toute particulière et être confiée à des entreprises spécialisées.

Le choix de la boue est primordial parce que la tenue du trou en dépend et parce qu'elle peut être à l'origine d'économies importantes. Les boues relèvent de deux groupes :

- les suspensions d'argiles : bentonite, attapulgite, sépiolite ;
- les boues organiques ou polymères.

La bentonite a fait l'objet de très nombreuses publications. Les polymères, par contre, restent encore rarement utilisés en fondation et les publications relatives à leurs applications peu nombreuses. Cette confidentialité fait que ces produits passent pour être peu fiables lors de la confection de pieux destinés à fonder des ouvrages importants.

Il a été donné aux auteurs l'opportunité d'utiliser à nouveau des polymères (Bustamante et al., 1998), et d'en évaluer les performances comme fluide de forage utilisé dans le cadre de projets routiers et ferroviaires. Il s'agissait de la confection des fondations profondes pour le viaduc de la Section 7 de la ligne du TGV à Taïwan ; le troisième pont sur le lac Nokoué à Cotonou, Benin et le pont de João Landim sur le Mansôa, en Guinée-Bissau.

2 LES BOUES UTILISÉES

Le Tableau 1 récapitule, pour les sols et les ouvrages concernés, les boues confectionnées à base d'eau douce étudiées.

Les études sur les différents fluides avaient pour buts :

- a) d'optimiser des matériels de préparation et de circulation des mélanges sur chantier ;
- b) de comparer l'efficacité des différents polymères pour assurer la tenue des forages en fonction de leur dosage, des délais d'exposition et de la nature des sols ;
- c) d'évaluer l'influence du fluide sur la portance du pieu.

Tableau 1. Boues utilisées pour les essais de forage et les ouvrages

site	fluide *	viscosité (sec)	mélange (kg/1000 L)	sols
Taïwan: viaduc Sud	CDP, EXL	52 – 65	0,6 – 0,8	sable grossier et gravillon
				lentilles d'argile
	viaduc Central	CDP, EXL	52 – 65	0,6 – 0,8
viaduc Nord	CDP, EXL	52 – 65	0,4 – 0,6	sable grossier et argile
				grave avec galets (10-50 cm) conglomérats
Cotonou: 3ème pont sur le lac Nokoué	G-15 n°1	50 – 60	1,5 – 2	sable et grave
				argile organique
	G-15 n°2	50-60	2	sable fin à moyen
	G-15 n°3	55-75	2,5	
	bentonite n°1	35-45	50	
Guinée-Bissau: pont João Landim	G-15 n°1	55 - 60	1,5 - 2	vase et argile molle,
				argile raide à dure,
Novagel n°1	65-75	1		argile avec sable, calcaire altéré
				Novagel n°2
Lamgum 200	60-85	1,5 - 2,5		
				Novagel
	Lamgum 200	55-70	2,5 - 4	

* adjuvants = Pro Tek 100, Slurry Pro MPA, Insta Freeze

Comme l'indique le Tableau 1, les polymères le plus souvent utilisés ont été le Geomud-15 et le CDP & EXL. Le Geomud-15 est un mélange à molécules à haute densité (690-720 g/l.), soluble dans l'eau et à viscosité élevée. Le CDP est un polymère vinylique, soluble dans l'eau et se présentant sous forme granulaire. Le Slurry Pro CDP par exemple a été plus particulièrement conçu pour améliorer la cohésion des sols. Il est utilisé avec des adjuvants tels que : Protek 100, Slurry Pro MPA – Insta Freeze C-1, Kobbles Blok.

3 ESSAIS ET RÉSULTATS

Pour les trois projets, l'évaluation des conditions de forabilité a incité à démarrer le forage à l'abri d'un tubage de travail perdu (ponts sur le Nokoué et de João Landim) ou récupérable (viaduc de Taiwan), puis de le poursuivre sous polymère. Dans tous les cas, la validité de ce choix devait être démontrée par des essais préalables de faisabilité et de chargement statique.

3.1 Le viaduc du TGV de Taiwan (lot 260 C)

3.1.1 La fondation et les sols

Le viaduc situé à quelque 50 km de T'aichung est un ouvrage de 15 km de long, fondé sur 2253 pieux de grands diamètres, représentant un total de plus de 81 000 ml. de forage. Il comprend trois viaducs : sud, central et nord. Les caractéristiques des pieux sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Taiwan. Pieux du lot 260 C.

viaduc	nombre de pieux	diamètre (m)	profondeur moyenne (m)	longueur chemise récupérable (m)
sud	750	2	41	4,5 à 6,5
central	610	2	33	4,5 à 6,5
nord	600	2	40 à 44	4,5 à 6,5

* longueurs extrêmes de 22 à 56 m

La majorité des pieux ont été mis en œuvre dans des sables, des graves ou des graves sableuses grossières, moyennement denses à très denses avec passages d'argiles dans certaines parties du tracé des viaducs Central et Sud. Pour le viaduc Nord, ces mêmes matériaux reposaient sur des graves avec galets (10-50 cm) et un conglomerat. La figure 1 montre la coupe type des sols relevée à l'aplomb de l'un des viaducs.

prof.	strati.	nature	SPT
2,70		argile limoneuse	6
6,40		sable limoneux	9
			13
		sable fin	22
			17
13,00			19
14,20		grave	19
			20
17,15		sable grossier	20
18,00		argile	10
20,00		grave	27
			29
23,55		sable limoneux	29
			78
		grave blocs ?	>100
28,00			

Figure 1. Taiwan. Coupe des sols

3.1.2 Les essais de faisabilité et de chargement

Le premier essai de faisabilité réalisé pour le viaduc Sud a débuté en septembre 2000. Le pieu Ø2000 a été foré au bucket et entièrement sous polymère CDP & EXL jusqu'à une profondeur de 45 m. La boue avait des viscosités de 52–65, pour un mélange dosé à 0,4–0,6 kg/1000 l. Le forage a été laissé ouvert pendant plus d'une semaine. Durant ce laps de temps, aucune instabilité de paroi ou de fond n'a été observée. Ce résultat fut confirmé par une série de nouveaux essais de forage avec ces mêmes polymères.

Les essais de chargement ont été réalisés sur un total de huit pieux de Ø2000 mm, équipés d'une ou deux cellules Osterberg. Les relations caractéristiques de l'un de ces essais sont indi-

quées sur les figures 2a et 2b. Tous les essais ont confirmé que les portances réelles étaient satisfaisantes.

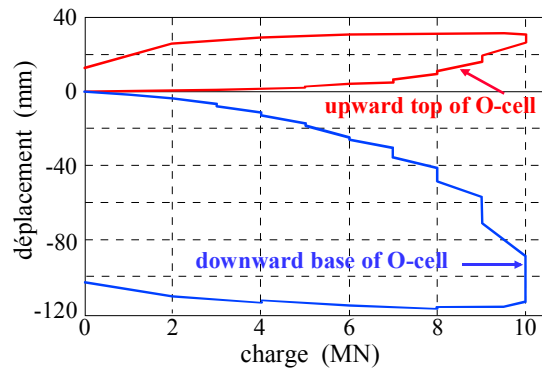


Figure 2a. Taiwan. Relation déplacement-charge

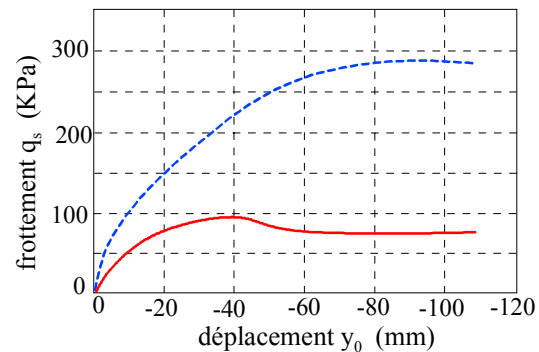


Figure 2b. Taiwan. Frottement dans les sables et graves avec galets

3.1.3 Application à l'ouvrage

Suite aux campagnes d'essais préalables, la Maîtrise d'Œuvre autorisa la réalisation des 2253 pieux définitifs. Débutée en avril 2001, celle-ci fut achevée en octobre 2002 sans incidents majeurs.

3.2 Le pont sur le lac Nokoué

3.2.1 Mode de fondation et conditions de sols

Le troisième pont sur le lac Nokoué est un ouvrage de 350 m de long, conçu pour être fondé sur 72 pieux forés Ø1200 de 56 à 73 m, avec chemise perdue de 20 m. Il était envisagé de forer au bucket à l'abri de la chemise perdue puis, une fois sous cette dernière, sous polymère. La perforation devait traverser trois horizons :

- les sables et graves sableuses lâches à denses, de 17 à 20 m d'épaisseur ;
- des argiles et limons organiques raides d'une épaisseur d'environ 45 m avec passages de calcaires grésifiés et poches de gaz ;
- des sables moyens à fins reconnus jusqu'à 70 m.

Les figures 3a et 3b illustrent les profils CPT et SPT, ainsi que les granulométries typiques des matériaux.

3.2.2 Essais de faisabilité et de chargement

La première tentative de forage sous Geomud-15 pour tenter d'atteindre en Ø1200 une profondeur de 57 m, se solda par une suite d'éboulements. On réalisa de nouveaux essais :

- deux forages sous Geomud-15, dosé à 2 kg/m³, avec et sans soude ;
- un forage sous bentonite dosée à 50 kg/m³.

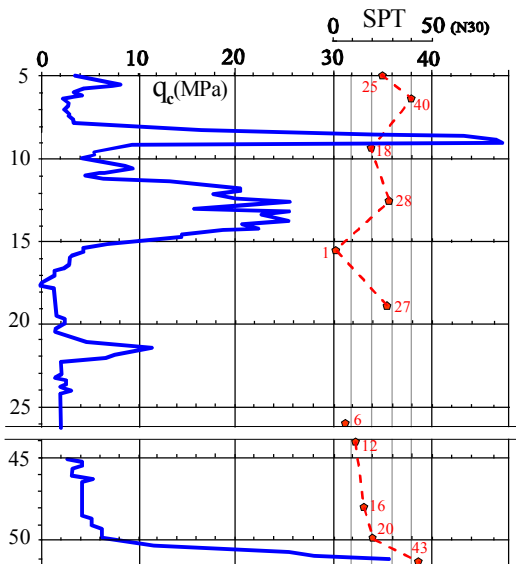


Figure 3a. Lac Nokoué. Profils CPT et SPT

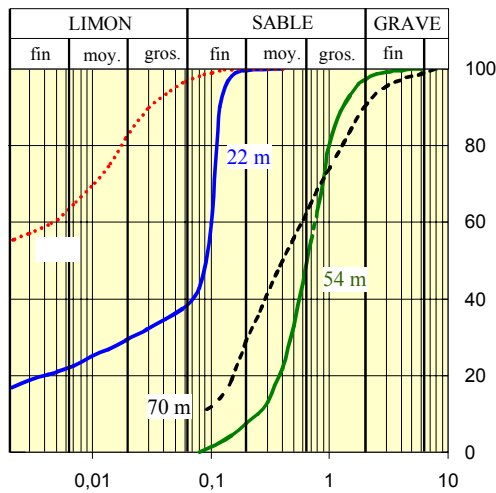


Figure 3b. Lac Nokoué. Granulométries des sols

La tenue d'aucun de ces trois forages n'était suffisante pour permettre le bon déroulement des opérations d'insertion et de raccordement des armatures puis de bétonnage. On envisagea une nouvelle série de deux essais avec un Novagel, dont les caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Pont sur le lac Nokoué. Caractéristiques du Novagel

essai	dosage (kg/m ³)	viscosité (sec)	adjuvants	pH
1er	1	65-75'	Depth Charge + soude	10 à 11
2ème	2-2,5	75-100'	Depth Charge + soude	11

Ces deux tentatives se soldèrent par deux nouveaux échecs : dans le premier cas, le forage de 48 m s'effondra 11 heures après avoir été achevé et, dans le second cas, environ 12 heures après la fin de la perforation des 57 m. On décida d'abandonner définitivement les polymères, mais de procéder à une étude de la minéralogie et de la texture des sols concernés (Forlani et Forlani, 2002 ; Bustamante, 2002), et cela afin d'établir les causes de l'instabilité des forages. Des essais en laboratoires, réalisés sur des échantillons de sols prélevés tout au long du forage, révélèrent que les éboulements étaient attribuables à l'action d'agents de contamination présents au sein des argiles en quantités inattendues (Bustamante et Le Roux, 1993) :

sel = 20 142 mg,
chlorure (Cl) = 7215 mg,
sulfate (SO₄) = 2510 mg,
soude (Na) = 5442 mg.

Il fut décidé de revenir à la bentonite. On opta pour une Laviosa 120-E dosée à 45-50 kg/m³, adjuvantée au CMC, d'où une viscosité de 35 à 43 secondes, $\gamma = 10,5-11,8$ kN/m³ et une valeur de pH entre 11 et 12, obtenue par addition de soude. Un dernier essai de forage en Ø1200 apporta la preuve de l'efficacité de cette boue. En effet, après avoir atteint la profondeur de 67 m, on vérifia que la tenue du trou pouvait excéder 60 heures.

Quatre pieux furent soumis à des essais de chargement de type Osterberg (Fig. 4). Tous ces essais ont été considérés comme concluants.

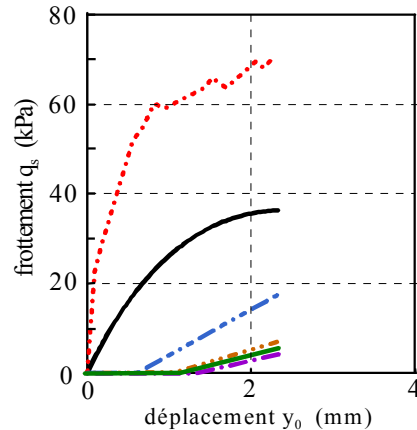


Figure 4. Cotonou. Frottements mobilisés

3.2.3 Extrapolation à l'ouvrage

Les difficultés rencontrées lors des essais de forage ont amené des retards importants. Pour le respect du planning de l'ensemble des travaux, on décida d'augmenter sensiblement les longueurs des chemises perdues, passant celles-ci à 24 m au lieu de 19 m. Enfin, les teneurs en sulfate obligèrent à utiliser des ciment appropriés pour la confection des bétons.

Le premier des 72 pieux du pont, foré en rive gauche, débuta en août 2002 et le dernier fut achevé en février 2003 (Fig. 5).

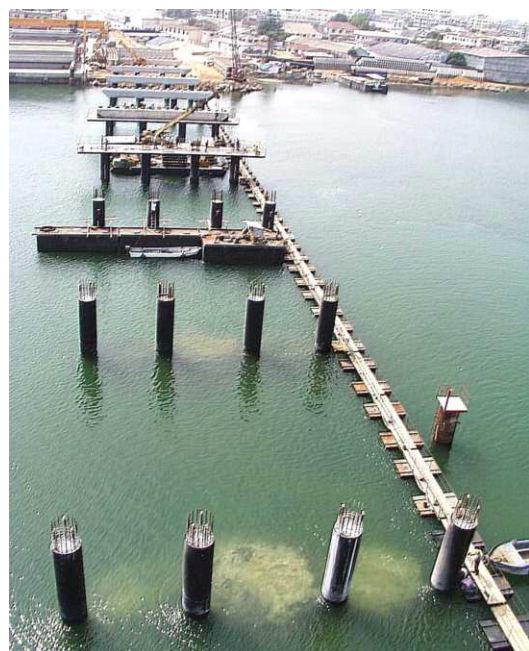


Figure 5. Cotonou. Vue des pieux Ø1200 du pont

3.3 Le pont de João Landim

3.3.1 La fondation et les conditions de sols

Le pont de João Landim franchit le Mansôa à quelque 20 km de Bissau. Au niveau de l'APD, la longueur du tablier était de 712 m, pour 17 appuis reposant sur 34 pieux de Ø1800 à Ø2000 et de 55 à 75 m.

Les pieux devaient traverser :

- 10 à 25 m d'argile molle vasarde ;
- 10 à 20 m d'argile ferme à raide ;
- 20 à 30 m d'argile dure ;
- le calcaire dur, légèrement altéré en toit.

Une telle configuration autorisait à recourir aux polymères pour forer sous la chemise. En fait, on observa leur dysfonctionnement lors de la réalisation du pieu d'essai en rive gauche.

3.3.2 Les essais

Le fait de descendre les pieux au calcaire dur, rendait superflu tout essai de chargement ; quant à l'essai de forage il a été réalisé en juin 2001 sur un pieu Ø1800 (Fig. 6). Après l'insertion de la chemise perdue sur 24 m, on forait sous Geomud-15 dosé à 2 kg et avec une viscosité de 55-60 sec. L'observation des déblais révéla que la nature des sols rencontrés différait sensiblement de celle décrite dans le rapport géotechnique. C'est ainsi que les argiles dures comportaient de nombreuses inclusions de sables moyens à grossiers très instables et qui donnèrent lieu, alors que le forage atteignait 64,5 m de profondeur, à des éboulements après une nuit d'observation. Plusieurs autres tentatives de forage sous Geomud-15 dosé différemment et réalisées pour les pieux définitifs cette fois, se soldèrent par de nouveaux échecs.



Figure 6. João Landim. Forage du pieu d'essai en cours

On décida finalement de ne conserver les polymères que pour faciliter les opérations de mise en place des chemises perdues : le temps de stabilisation du forage de 10 à 12 h. qu'ils présentaient étant suffisant pour achever les opérations de levage et de aboutage.

3.3.3 Extrapolation à l'ouvrage

Les difficultés rencontrées lors des travaux de confortement des berges et de l'essai de forage, ont conduit à revoir l'ensemble des dispositions relatives à l'ouvrage, à savoir :

- ajouter deux travées supplémentaires et fonder les remblais sur colonnes ballastées, ce qui porta la longueur du pont à 786 m et le nombre de pieux à 39 degrés ;

- augmenter les longueurs des chemises perdues, en les passant suivant l'appui de 50 à 74 m.

Le forage des premiers pieux définitifs en rivière démarra côté rive gauche en août 2002. Le dernier pieu fut achevé fin février 2003 et le pont en septembre 2003 (Fig. 7).



Figure 7. Vue du pont terminé. Juin 2003.

4 CONCLUSIONS

L'emploi de polymères dans le cadre de trois projets comportant des pieux forés de diamètres 1200 à 2200 mm et de longueurs allant de 22 m à 75 m, a donné de bons résultats pour le viaduc TGV de Taiwan. Dans le cas du pont sur le lac Nokoué et de João Landim (Bénin et Guinée-Bissau), c'est la nature des sols qui a mis en défaut l'utilisation des polymères. Ces boues ont même dû être complètement abandonnées sur le lac Nokoué, pour revenir à des bentonites dont les adjuvants ont été choisis en conséquence. Dans le cas de João Landim, l'action limitée des polymères a été mise à profit pour faciliter l'installation des chemises perdues à grande profondeur.

Les observations faites sur les trois sites ont montré que les chances de succès liées à l'utilisation de ces boues dépendaient essentiellement du sol. Il est donc nécessaire de le reconnaître par des essais in situ habituels, complétés par un minimum d'essais d'identification, sans oublier l'étude minéralogique et texturale. Enfin, l'intérêt des polymères a été encore une fois démontrée sur le plan de la portance et des rendements en matière de forage.

RÉFÉRENCES

- Bustamante M. 2002. *Avis technique sur la réalisation des pieux forés du 3^{ème} pont sur le lac Nokoué*. Rapports internes du LCPC de juillet 2002.
- Bustamante M. et Gianceselli L. 2002. *Rapport de Mission du 20 juin 2002*. Document interne du LCPC. pp.1-30.
- Bustamante, M., Gianceselli, L., Boato, R. et Conedera, A. 1998. Performance of polymer slurries in large diameter bored pile. *3rd Deep Foundations on Bored & Auger Piles Seminar* in Ghent, Van Impe (ed.), Balkema, Rotterdam. 19-21 October, p.119-127.
- Bustamante M. et Le Roux A. 1993. Minéralogie et texture des sols indurés, leur importance pour le géotechnicien. *Proc. of geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks*, Anagnostopoulos et al. (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54 10 3442, p.939-944.
- Forlani E. et Forlani F. 2002. *The problem of the drilling mud in Benin*. Rapport, août 2002.
- Kort D.A., Usab J.F. et Fickling K. 2002. *Test Pile, Lac Nokoué*. LOADTEST Intern. Inc. Report. September, 2002.
- Molnit T. et Jakstis D. 2000. *Test Pile, THSR, Taiwan*. LOADTEST Intern. Inc. Report. October 18, 2000.