

## Pathologie d'un pieu foré à la bentonite

**Francis BARDOT**

Ingénieur civil des Mines  
Expert près de la cour d'appel  
de Lyon

**Jack GAUCHEZ**

Docteur en géologie  
Expert près de la cour d'appel  
de Lyon  
Responsable du Laboratoire  
départemental de l'Équipement  
du Rhône

Le site choisi pour le franchissement de voies SNCF par un viaduc est constitué, sur le plan géologique, par des alluvions de rivière reposant sur un substratum rocheux d'origine métamorphique.

La coupe géologique schématisée du site est la suivante :

- 0 à -3 m de profondeur : remblai, graves polluées ;
- -3 à -8 m : alluvions grossières (sables, graviers, galets, blocs) sans cohésion ;
- -8 à -16 m : alluvions fines (argiles grises et silts), niveau de la nappe à -10 m ;
- à partir de -21 m : substratum rocheux, gneiss.

La solution retenue pour les fondations d'un viaduc comprend la réalisation de massifs et de pieux répartissant les efforts dans le substratum rocheux (fig. 1).

Pendant la réalisation d'un pieu d'une des piles du viaduc, un accident s'est produit, entraînant la mort par ensevelissement de deux ouvriers.

## Études préliminaires

Lors de la conception de ce projet, le site a fait l'objet d'une étude géotechnique comprenant la réalisation de sondages destructifs à l'emplacement des futures piles et culées du viaduc. Ces sondages ont pénétré dans le massif rocheux sur une hauteur d'une dizaine de mètres.

Des essais pressiométriques ont aussi été effectués tous les 1,50 m de profondeur.

Le géotechnicien a conclu à la nécessité de réaliser des pieux forés tubés, du fait du manque de cohésion des terrains rencontrés (fig. 2).

La méthode de foration utilisée en destructif ne permet pas de dresser une coupe géologique précise du site. C'est ainsi que les sables, graviers et blocs rencontrés entre -3 et -8 m de profondeur apparaissent sous la forme de sables grossiers ; de même, les alluvions situées entre -16 et -21 m sont données comme étant constituées de sables grossiers, argileux.

Toutefois, les mesures pressiométriques réalisées dans ce sondage permettent de mettre en évidence une zone sans cohésion, entre -5 et -8 m de profondeur. En effet, à ces profondeurs, nous constatons que la pression limite  $p_l$  et le rap-

port  $E/p_l - p_0$  sont faibles (2,2 à 6,4 pour ce dernier). Ceci est caractéristique de la présence de matériaux sans cohésion ou remaniés.

## Note

## technique

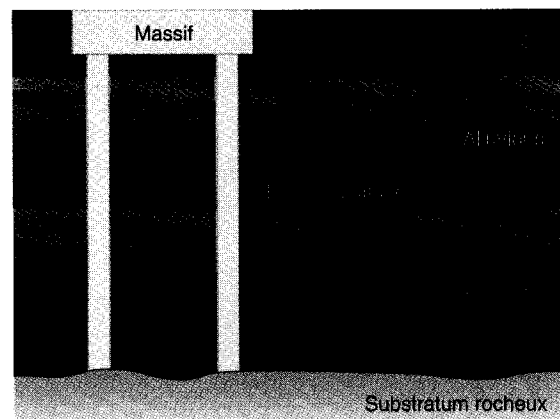


Fig. 1 - Coupe schématisée des fondations du viaduc.

Nivellement : NGF 172,60 m

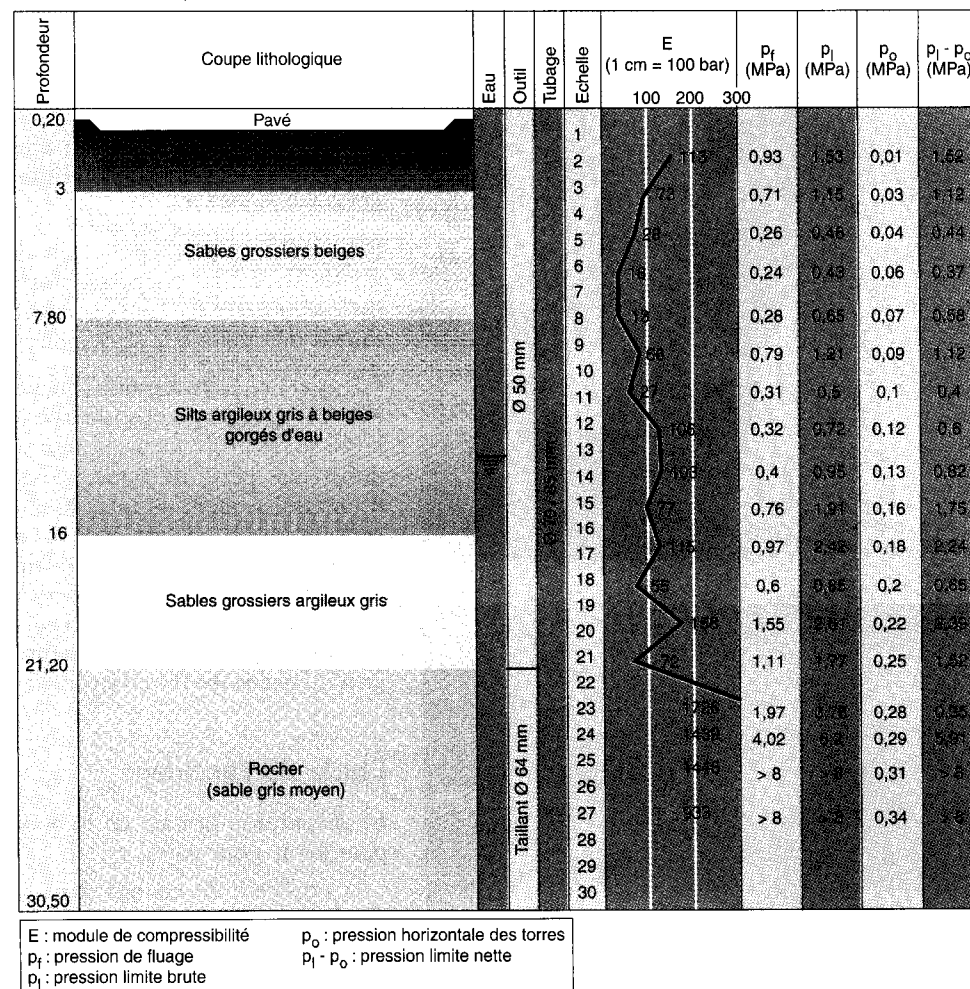


Fig. 2 - Sondage pressiométrique dans la zone de l'accident.

Les contraintes imposées par la présence de voies ferrées à proximité des ateliers de réalisation des pieux (interdiction d'utiliser

des techniques de vibro-fonçage) ont conduit le maître d'œuvre à abandonner la technique du pieu foré tubé pour retenir celle du pieu foré à la bentonite.

Lors de la mise en œuvre du premier pieu de la semelle située dans la zone du sinistre, la coupe géologique précise du site fut dressée. Elle faisait apparaître la nature sablo-graveleuse des terrains, avec la présence de blocs dans les cinq premiers mètres, de même que la nature très grossière des alluvions rencontrées entre -18 et -22 m de profondeur. Ces dernières comprennent des horizons crus, complètement dépourvus de matériaux fins (fig. 3).

Une perte de boue d'un volume de 30 m<sup>3</sup> se produisit alors que le substratum rocheux avait été trépané sur une hauteur de 80 cm. Lors de la réunion de chantier qui suivit cet incident, on a considéré que la perte de boue s'était produite dans le massif rocheux.

### L'accident

La réalisation du deuxième pieu fut entreprise après avoir terminé le pieu précédent.

Le diamètre de foration était de 1,20 m. Les cinq premiers mètres furent forés à l'abri d'un tube métallique d'une longueur de 5 mètres.

Lorsque l'outil de foration (bucket à l'extrémité d'un kelly) se trouva à -18 m de profondeur, il se produisit une perte de boue, suivie d'un affaissement du tube de tête et du terrain situé autour du tube. L'effondrement était de forme cylindrique, avec un diamètre de 3 m et une profondeur de 2 m (fig. 4). Deux ouvriers qui se trouvaient à proximité du tube furent ensevelis.

### Étude de l'accident

La disparition brutale de la boue peut avoir pour cause :

- la présence de cavités dans le sous-sol,
- l'existence d'un horizon saturé de forte perméabilité.

Les terrains rencontrés sur ce site (alluvions, substratum gneissi-

que) ne peuvent pas renfermer de cavités naturelles.

L'existence d'une cavité créée par l'homme à une profondeur de -18 m, soit -8 m sous le niveau de la nappe, ne paraît pas plausible. Une étude par photo-interprétation du site, ainsi qu'une recherche bibliographique montrent qu'il n'existe pas d'ouvrage réalisé par l'homme sur ce site.

La perte de la boue s'est donc produite dans un horizon très perméable. Les matériaux remontés lors de la dernière passe de l'outil de foration sont constitués par des graviers et des galets crus (fig. 5).

Le sondage, réalisé à notre demande à proximité de la zone d'effondrement, montre l'existence de niveaux de blocs, graviers, galets crus et saturés entre -16 et -21 m de profondeur. La perméabilité de ces horizons, calculée à partir d'essais Lefranc, d'un essai de pompage et d'analyses granulométriques (relation de HAZEN), varie entre 10<sup>-2</sup> et 10<sup>-1</sup> mètres par seconde.

Un autre sondage effectué dans la zone effondrée montre la présence de blocs, galets et graviers légèrement sableux juste au-dessus de la partie supérieure de l'outil de foration (profondeur -15,45 et à 17,90 m). Ces matériaux ne correspondent pas à ceux rencontrés à la même profondeur dans le terrain en place (sable gris argileux, sable silteux gris). Ils proviendraient d'un niveau en place entre les cotes -5,10 et 6,50 m. Les formations argileuses du terrain en place présentes de -8 à -16 m ne sont pas ou peu retrouvées dans la zone effondrée. Seules sont rencontrées les formations superficielles à faciès sablo-graveleux dominant.

Le volume de la masse de terre retrouvée dans le trou du pieu est de 14,8 m<sup>3</sup>, et celui de l'effondrement en surface d'environ 14 mètres cubes.

### Origine du sinistre

Nous pouvons donc conclure que l'origine de cet accident est de nature purement géologique.

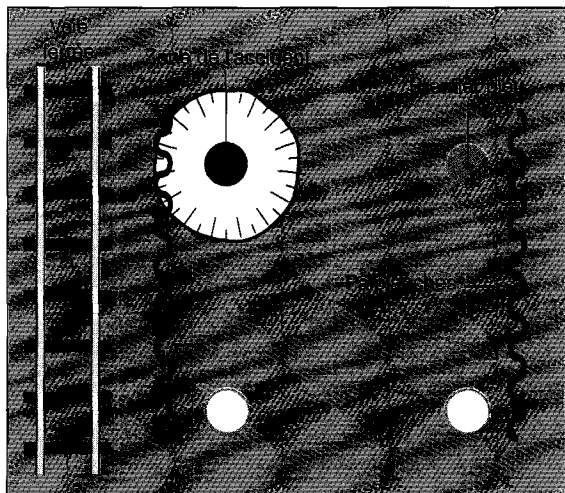


Fig. 3 - Plan schématique de l'emplacement d'une semelle.



Fig. 4 - Cratère de l'affaissement.

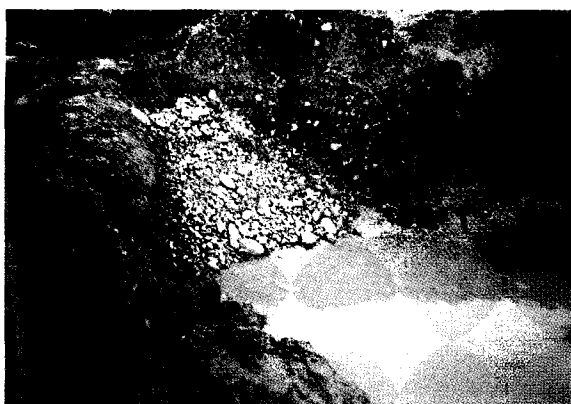


Fig. 5 - Matériaux remontés lors de la dernière passe du bucket, avant l'accident.

Lors de la réalisation du pieu, la boue a pénétré dans les formations superficielles sans cohésion et a contribué à faire chuter leur résistance. Puis, lorsque l'outil a atteint un horizon très perméable saturé, la boue s'est vidangée brutalement dans ce dernier. Il en est résulté l'effondrement des parois du trou, qui n'étaient plus retenues par la bentonite, entre le toit de la formation argileuse et la base du tube de tête, soit entre -5 et -8 m de profondeur. Ce mouvement a été suivi d'une boulangée de la formation superficielle (fig. 6).

## Conclusions

Cet accident aurait pu être évité si :

- le tube de tête avait été ancré dans la formation argileuse intermédiaire. Il aurait été nécessaire de le prolonger jusqu'à -9 mètres ;
- l'horizon saturé très perméable avait été injecté.

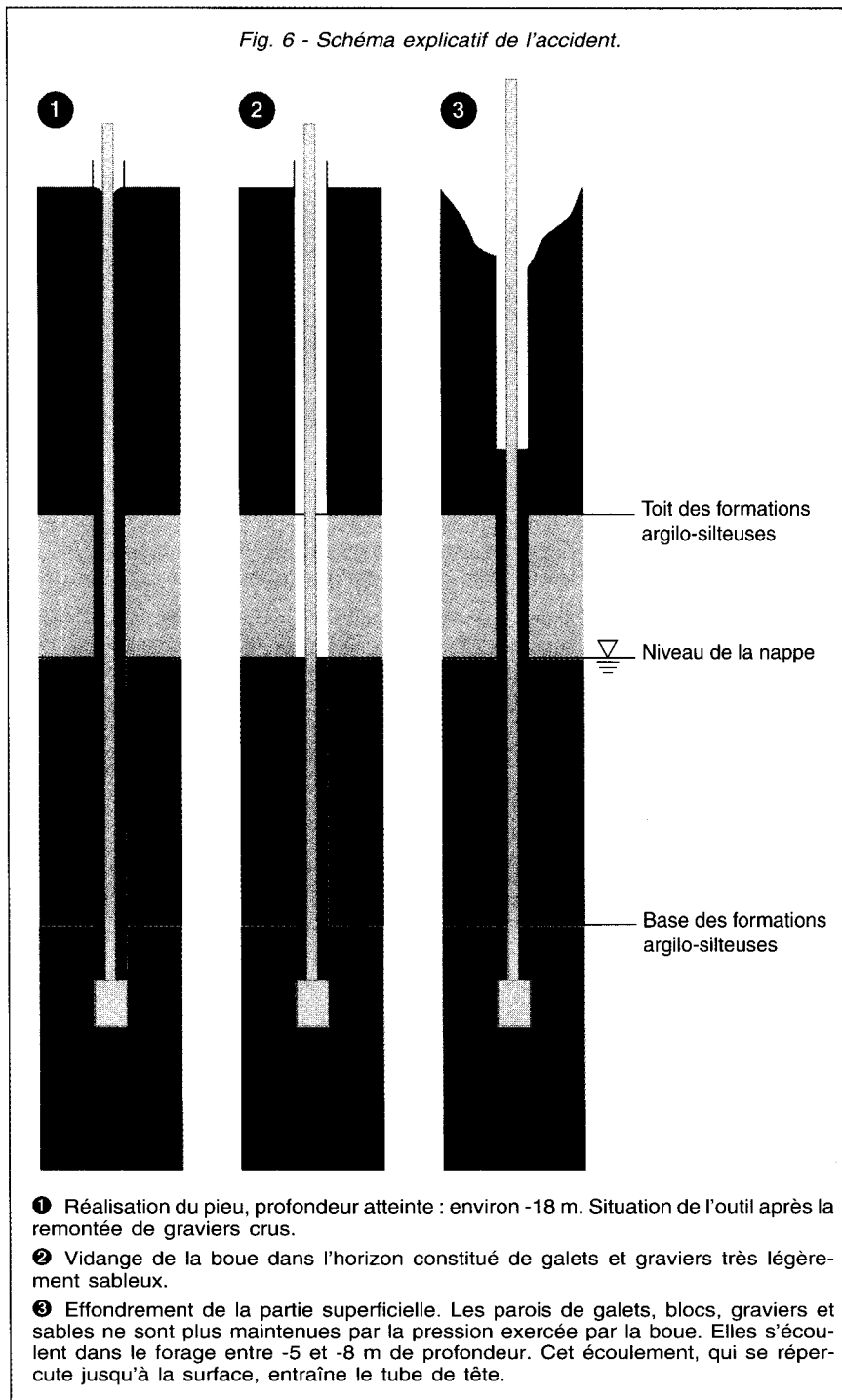
Une reconnaissance spécifique détaillée aurait dû être réalisée au préalable. Elle aurait dû comprendre :

- une coupe géologique précise des alluvions traversées (sondage de reconnaissance à la soupape avec construction d'une coupe géologique précise) ;
- des essais de détermination de la perméabilité de ces alluvions (essais de type Lefranc).

Actuellement, aucun texte réglementaire n'impose ce type de reconnaissance, ce qui est regrettable. Il nous semble désormais nécessaire que, pour la réalisation de pieux forés à la bentonite, il soit exigé au préalable une telle reconnaissance. La longueur du tubage de tête doit ensuite être définie en fonction de la géologie du site. La mise en évidence de terrains saturés très perméables devrait obligatoirement conduire à la réalisation d'injections.

On notera que, pour terminer ce chantier, la longueur des viroles des pieux réalisés après l'accident était telle qu'elles étaient ancrées au toit de la formation argileuse intermédiaire. De plus, les alluvions saturées très perméables ont été injectées. Aucun incident n'a été signalé. Par contre, pour la réalisation de pieux de faible diamètre d'une des culées de l'ouvrage, où ces précautions n'ont pas été prises, il a été observé des effondrements de la paroi des forages et leur colmatage, sans toutefois, que ces incidents présentent un caractère catastrophique.

Fig. 6 - Schéma explicatif de l'accident.



## Commentaire

En 1976, devant le développement important des pieux forés, le SETRA et le LCPC publiaient le Recueil des règles de l'art qui connut un grand succès ; son contenu est toujours d'actualité même si une révision, intégrant les technologies nouvelles, serait à entreprendre.

Est actuellement à l'enquête la future norme européenne relative à l'exécution de travaux géotechniques spéciaux et concernant les pieux forés (groupe de travail GT 3 du Comité technique TC 288 du CEN).

Vingt ans séparent ces deux documents, l'un de recommandations, l'autre de normalisation.

Ce dernier texte répondra en principe au souci exprimé par les auteurs, regrettant l'absence de texte réglementaire sur les reconnaissances, indispensables pour le dimensionnement, mais également pour la faisabilité des fondations de tous types d'ailleurs.

Mais, règlement ou non, ce type d'incidents, aux conséquences ici tragiques, reflète plus un défaut de sensibilisation, lié à une méconnaissance technique, de la part des divers acteurs, depuis la maîtrise d'ouvrage jusqu'à l'entreprise, et qui concourt à devoir résoudre les problèmes en aval. Dans un contexte de « qualité », où les contrôles (tant d'études que de réalisations) sont très organisés, on ne peut qu'être inquiet pour ce type de travaux géotechniques particuliers. En effet, très généralement, les maîtres d'œuvre les connaissent mal, ils délèguent le contrôle extérieur, qu'ils assurent officiellement, à des organismes dont les compétences, quant à l'aspect exécution, se font rares. L'entreprise rencontre les mêmes problèmes pour le contrôle externe auquel elle doit faire appel ; c'est dire que c'est elle même, avec son contrôle interne, qui doit faire face...

Pour terminer, il nous paraît utile de compléter la liste des facteurs signalés par F. Bardot et J. Gauchez, et ayant pu contribuer à l'instabilité des forages : la qualité de la boue, le niveau piézométrique et les circulations d'eau dans les graves de fond. Enfin, il ne faut pas, loin de là, généraliser l'obligation d'injection des niveaux saturés très perméables, ce qui doit rester une opération exceptionnelle, à envisager en tout état de cause au stade du projet et à comparer à d'autres techniques de fondations profondes.

Pour conclure, ce sont de telles difficultés de réalisations de pieux forés, qui ont motivé, il y a une vingtaine d'années, l'édition du Recueil des règles de l'art évoqué en tête de commentaire.

**Olivier Combarieu**  
Adjoint au directeur  
du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen