

# LE RENFORCEMENT DES SOLS PAR IMPRÉGNATION À L'AIDE D'UN FLUIDE BENTONITIQUE : APPLICATION À L'ÉTUDE DE LA STABILITÉ D'UN OUVRAGE RÉALISÉ PAR FORAGE HORIZONTAL DIRIGÉ

---

**M. CEBRIAN, D. DIAS, A. PANTET, J-P. BRAZZINI, S. MURGIER**

DIRECTION DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION GDF SUEZ,  
CENTRE DE RECHERCHE GAZ ET ENERGIES NOUVELLES – 93210 SAINT-DENIS LA PLAINE  
INSA LYON, LABORATOIRE DE GENIE CIVIL ET D'INGENIERIE ENVIRONNEMENTALE – 69100 VILLEURBANNE  
UNIVERSITÉ LE HAVRE, LABORATOIRE ONDES ET MILIEUX COMPLEXES, FRE 3102-CNRS, 76600 LE HAVRE

---

## 1. INTRODUCTION

Le forage horizontal dirigé pour la pose de réseaux est une technique adaptée pour le franchissement d'obstacles (rivière, autoroute, voies ferroviaires...), qui limite les inconvénients liés à l'ouverture d'une tranchée (délais, interruption du trafic, sécurité...). Dérivée des forages pétroliers multidirectionnels, cette méthode de pose de réseaux est fréquemment utilisée dans de nombreux pays, notamment les Etats-Unis où elle est largement suivie avec des actions de formation, de recherche et de développement de nouvelles machines et d'équipements [ALL,00]. Bien que performante et relativement bien maîtrisée, en France elle est peu adoptée, à cause des craintes des

Maitres d'Ouvrage, concernant la stabilité de la cavité horizontale dans le temps.

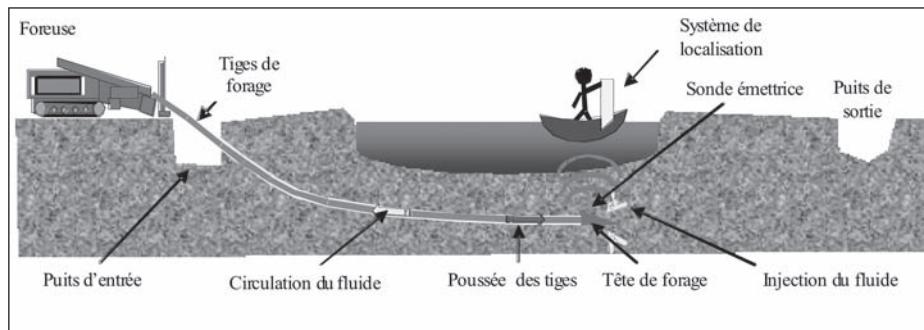
Lors du creusement, dans des terrains difficiles et à faible profondeur, des mouvements (contraction, effondrement, soulèvement...) peuvent se produire autour de la cavité, se propager jusqu'en surface en s'amortissant plus ou moins et être préjudiciables aux ouvrages avoisinants [PAN,96]. Des désordres sont susceptibles d'apparaître à court et à long terme, sans réelle possibilité de prévision à ce jour, en particulier dans les sols sableux ou peu cohérents. Certaines règles pratiques, différentes d'un exploitant à l'autre, ont été éditées [ARI,00], [COM,03], [BAU,05] toutefois elles méritent d'être précisées, car les mécanismes liés au creusement et à la pose de la conduite sont particulièrement complexes et mal connus.

Le travail présenté s'inscrit dans un programme de recherche soutenu par la FSTT (France Sans Tranchée Technologies), qui consiste à mieux appréhender les mouvements de sol associés à la réalisation d'un ouvrage souterrain, de diamètre compris entre 0,10 à 1 m et à faible profondeur, dans des sols de surface [PAN,03]. Les conditions de stabilité de la cavité horizontale sont particulièrement délicates dans ce contexte. Lors de l'excavation d'ouvrages souterrains de faible diamètre (le cas de forages dirigés) et en terrains difficiles, les fluides de forage sont largement employés [GUS,94]. Ils sont principalement à base de bentonite, activée et éventuellement adjuvante de polymères. Leurs principales fonctions sont d'évacuer les déblais [MAL,01] et de maintenir les parois latérales [HAR,04]. En fin de chantier, ces travaux d'excavation amènent une production de déchets sous forme d'un marinat, constitué d'un mélange qui peut être très diversifié suivant le milieu traversé [PAN, 06]. Le développement des techniques sans tranchées, la volonté d'utiliser une technologie propre et bien gérée, ont motivé la FSTT à soutenir ces activités de recherche.

L'objectif de cet article est de décrire les conditions d'imprégnation de sols sableux parfaitement identifiés (nature, densité, granulométrie, teneur en eau et porosité) par un fluide bentonitique connu (nature de la bentonite commerciale et concentration) à partir d'essais d'imprégnation en colonne pressurisée. Les sols granulaires peu ou pas cohérents sont pour les foreurs particulièrement délicats à excaver à cause des possibilités de cavage, de lessivage et d'effondrement locaux de ces matériaux dans la cavité, qui provoquent, soit le non retour du fluide et sa mise en surpression à l'origine de soulèvements, soit des tassements en surface pouvant entraîner des ruptures.

## 1.1 Le forage horizontal dirigé : description de la technique

Plusieurs descriptions de la technique peuvent être trouvées dans la littérature [COM,03]. La technique nécessite des moyens performants de détection, de guidage, de foration, de contrôle des fluides et des résistances de traction des conduites, ainsi l'emploi de personnel qualifié est indispensable. Elle peut-être utilisée dans une grande variété de sous-sol grâce à une large gamme d'outils disponibles. Le chantier se déroule en trois étapes principales représentées sur la figure 1 :



**Figure 1. Principe du forage dirigé**

### Tir pilote

La tête de forage, de dimension choisie et adaptée à la nature du terrain, est fixée à l'extrémité d'un train de tige. Par combinaison de poussée et de rotation imposées par la foreuse, elle suit une trajectoire définie par le projet. Elle est équipée d'une sonde qui permet sa localisation depuis la surface. Lors de l'excavation, un fluide de forage est injecté sous pression afin de stabiliser provisoirement la cavité, transporter les cuttings en continu vers le puits d'entrée, et refroidir les outils. L'évacuation des cuttings est importante pour faciliter le creusement et éviter de coincer le train de tiges. Dans la pratique, elle est imparfaite, seulement 10 % à 30 % des déblais sont éliminés.

### Alésage

Pour obtenir le diamètre requis, la cavité pilote est agrandie, un aléseuse est substitué à la tête de forage dans le puits de sortie. Il est entraîné en rotation, en direction de la foreuse en continuant l'injection de fluide. L'utilisation d'aléseuses de tailles croissantes permet d'atteindre environ un diamètre final égal à environ une fois et demi celui de la canalisation à installer.

### Pose de la canalisation et revêtement définitif

Lors du dernier alésage, la canalisation est attachée derrière l'aléseuse dans le puits de sortie et tirée jusqu'au puits d'entrée. Le fluide de foration a ici une action de lubrifiant, qui réduit les efforts de traction [DEL, 95].

Ainsi le fluide de forage à base de bentonite est un véritable outil indispensable, dont les fonctions sont multiples, il nécessite une bonne connaissance de ses constituants et de ses propriétés rhéologiques et celles de filtration.

## 1.2 Définition et fonctions du fluide de forage

### 1.2.1. De la bentonite naturelle au produit commercial

La poudre bentonitique, nommée en général bentonite dans la pratique est un matériau industriel, dont peu d'informations sont fournies par le vendeur. Il est nécessaire de mieux préciser l'origine et les transformations de la matière première (bentonite de gisement) au produit industriel (bentonite commerciale) [MAL,01], [BES, 03].

La bentonite est une roche argileuse, qui contient essentiellement des argiles appartenant au groupe des smectites, mais aussi d'autres minéraux argileux tels qu'attapulgite, kaolin, mica et illite et des minéraux non-argileux tels qu'essentiellement quartz, feldspath, calcite, gypse. Les smectites se sont formées suivant des mécanismes variés soit résultant de l'altération sous conditions géologiques hydrothermales ou supergéniques comme dans des systèmes lagunaires, soit néoformées par précipitation. Les bentonites sont souvent exploitées dans des carrières à ciel ouvert, avec une teneur en eau moyenne naturelle de 30%.

Il existe plusieurs gisements dans le monde (USA, Wyoming – Allemagne, Mossburg – Algérie, Maghnia – Sardaigne, Grèce, Inde, Egypte, Argentine). Chaque gisement présente ses particularités, toutefois les bentonites sont essentiellement calciques, rares sont celles qui sont naturellement sodiques (elles sont généralement mixtes, calci-sodiques ou sodi-calciques avec du magnésium et du fer).

Le matériau de la carrière est ensuite concassé, à différentes granulométries, des cailloux aux poudres fines suivant les applications recherchées. Dans le cas de bentonites calciques, le matériau peut être activé avec du carbonate de calcium pour donner une bentonite sodique artificielle, qui offre des possibilités de gonflement bien meilleures que la bentonite naturellement calcique. Toutefois la qualité de l'échange cationique n'est pas pérenne ( $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{Na}^+$ ) et la présence des minéraux accessoires même en faible quantité peut avoir un effet sur les propriétés rhéologiques. Ensuite, les bentonites concassées ou en poudre sont livrées en containers ou en sacs après avoir été éventuellement séchées pour avoir une teneur en eau moyenne de 10 à 15%. Pour d'autres applications, les traitements sont différents et plus complexes ; de la catalyse à l'acidification.

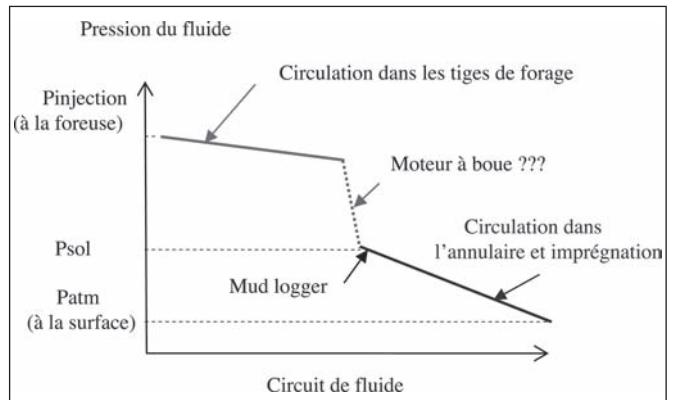
La bentonite doit ses propriétés à la présence de smectites, qui sont des argiles particulièrement réactives, notamment à l'eau. Les propriétés rhéologiques (seuil d'écoulement, viscosité, thixotropie) et celles de filtration et colmatage sont dues à la capacité de gonflement des smectites et sont largement utilisées lors de la réalisation de forages.

### 1.2.2. La fonction stabilisatrice du fluide

Les conditions de stabilité des parois de la cavité sont complexes, elle est assurée en partie par l'application d'une pression de fluide dans le vide annulaire et par imprégnation locale de la boue dans les pores et fissures du milieu traversé [MOH,86], [PAN, 96], [WAN, 07].

Le fluide contenu dans l'annulaire est un mélange de boue propre et de débris de sols excavé, dont les propriétés sont variables suivant la nature des cuttings [BES, 02]. La pression est définie en un point de la cavité à partir des données de pression d'injection de la machine, des pertes de pression dues à la circulation en conduite et dans l'annulaire. Les pertes de pression sont dépendantes des propriétés rhéologiques du fluide et de la géométrie des conduites et tuyères d'injection. La détermination de la pression est complexe dans l'outil. De plus en plus souvent, un dispositif de mesure de la pression de fluide dans l'annulaire

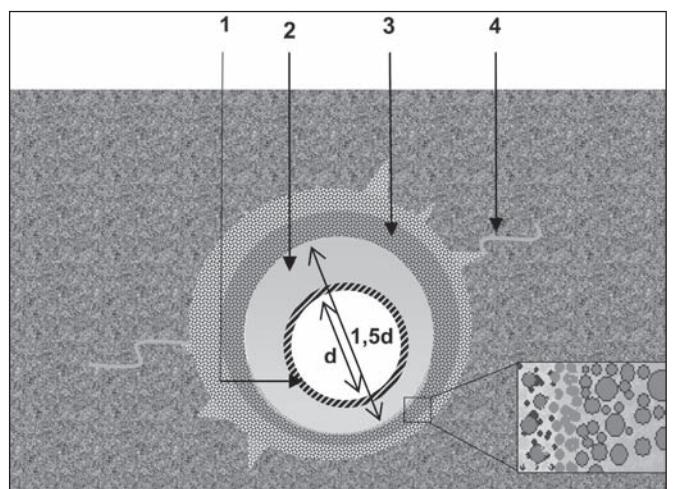
(mud logger) est placé à proximité de l'outil, la pression mesurée est proche de la pression hydrostatique de la colonne de boue. La répartition théorique des pressions peut être schématisée sur le profil de la figure 2.



**Figure 2. Répartition schématique des pressions dans le circuit de boue (intérieur des tiges puis retour par l'annulaire)**

Les conditions de la transmission de la pression de fluide sur le sol environnant sont mal connues, en particulier le développement et l'effet de la présence d'une zone imprégnée (épaisseur et caractéristiques hydro-mécaniques) représentée sur la figure 3 et/ou d'un cake membrane. Le marinat et le sol imprégné présentent des caractéristiques mécaniques différencierées ; l'un se comporte comme un fluide pâteux (visco-élastique à seuil) et l'autre comme un solide (élastoplastique) [COM, 03]. Dans l'hypothèse classique du cake membrane [HAR, 04], [WAN, 07] la répartition est simple mais la formation d'un cake membrane n'est pas systématique, voir inexistante. Les principales anomalies constatées sont :

- en cas de pertes de boues (fracturation, cavité...), l'ouvrage et son environnement sont menacés car la pression de boue en chutant modifie les conditions d'équilibre ;
- en cas d'un éboulement local, l'espace annulaire partiellement comblé ne permet plus l'écoulement de la boue vers la surface. Ainsi piégée, elle se met en pression si l'alimentation continue, car elle est nécessaire au fonctionnement des outils.



**Figure 3. Profil d'un forage en sous-sol sableux :**  
**(1) Canalisation ; (2) Espace annulaire - fluide de forage et cuttings en suspension ; (3) Zones d'imprégnation ; (4) Fractures hydrauliques éventuelles.**

Par ailleurs, dans les semaines suivant la mise en place de l'ouvrage, ce sont les caractéristiques mécaniques de la zone infiltrée qui déterminent principalement à leur tour la stabilité de l'ensemble du massif. Quelques prélèvements en terrains sableux [ARI, 01] ont montré que la zone infiltrée par le fluide après pose de la canalisation ne dépassait pas une dizaine de centimètres (figure 3), et que les résistances mécaniques à la compression et au cisaillement de cette zone évoluaient rapidement après la réalisation de l'ouvrage.

Il est à présent nécessaire de connaître plus précisément non seulement le rayon de cette zone infiltrée en fonction des pressions d'injection au cours du forage, mais aussi d'étudier l'évolution de ses caractéristiques mécaniques dans les heures et les jours suivant la pose de l'ouvrage. Ces deux points constituent l'essentiel de l'étude suivante.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Pour comprendre, les mécanismes de formation de la zone imprégnée et/ou colmatée par un cake membrane en fonction de la nature des sols, de la concentration du fluide et de la pression, un dispositif classique API (American Institute Petroleum) de dimensions normalisées (diamètre de 3 pouces, hauteur de 5 pouces) a été utilisé.

### 2.1 Caractérisation des sols

Le sable utilisé est un sable d'Hostun [FLA,90], qui est un sable siliceux fin de couleur blanche purement frottant, propre et homogène. Le choix de ce matériau s'explique par une bonne connaissance de ses caractéristiques mécaniques et par la petite taille de ses grains. Le diamètre moyen des grains est de 210 mm, et la proportion de grains de diamètre inférieur à 300 mm est de 90 %.

### 2.2 Le fluide bentonitique

La poudre commerciale est une bentonite sodique industrielle à haut rendement, de couleur ocre-jaune, ayant naturellement une teneur en eau de 13 % (mesurée à 105°C). Le mode de préparation du fluide en laboratoire se rapproche de celui utilisé en chantier avec des concentrations similaires de 40 et 60 g.l<sup>-1</sup>. La poudre de bentonite est progressivement dispersée dans un volume d'eau distillée, à l'aide d'un agitateur à ailettes, en veillant à obtenir un mélange homogène. La suspension ainsi obtenue est cisaillée durant 20 minutes à 1500 rotations par minute (rpm). Puis, le fluide est laissé au repos 24 h, pour permettre l'hydratation. Avant utilisation, la boue est cisaillée pendant 5 minutes à 1500 rpm. [BES, 00], afin de mettre toutes les suspensions dans un même état structurel.

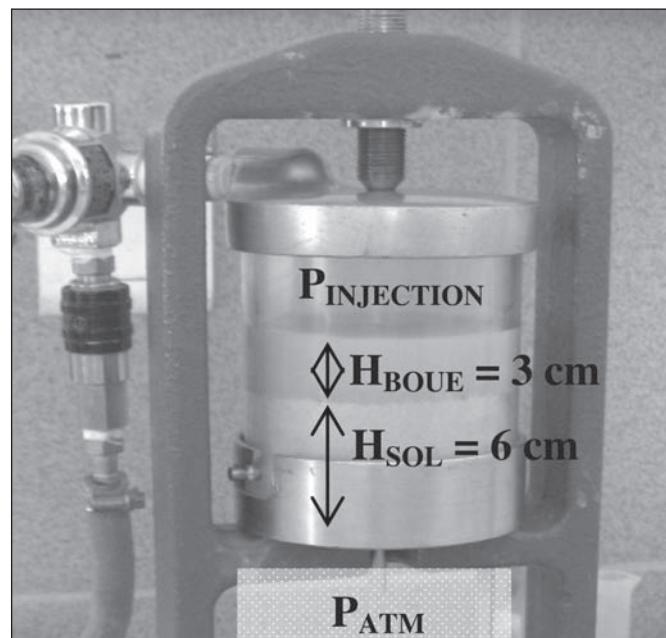
Une mesure au viscosimètre FANN électrique à 6 vitesses (3, 6, 100, 200, 300 et 600 rpm) est réalisée avant chaque essai, afin de vérifier l'homogénéité du comportement rhéologique des différentes suspensions préparées. Cet essai simple permet de définir un seuil d'écoulement apparent, qui indique la transition entre un état solide et un état liquide.

### 2.3 Description de la cellule et mise en place des matériaux

La cellule API en plexiglas permet de mesurer directement des longueurs d'imprégnation avec le changement des couleurs, elle est représentée sur la figure 4.

Un lit de sable de 6 cm est déposé par pluviation à une densité de 1,6 sur une pierre poreuse, qui protège l'orifice d'évacuation du filtrat, qui n'a pas été récupéré. Une couche de 3 cm d'épaisseur de suspension est déposée délicatement sur le lit granulaire. La pression de cellule appliquée est proche de celles mesurées usuellement dans les travaux de forages directionnels par le mud logger.

Des paliers de pressions croissantes de 20 kPa maintenus durant 5 min sont appliqués. Chaque essai est réalisé deux fois. Le temps nécessaire à la stabilisation de l'imprégnation et la longueur de la zone imprégnée sont mesurés pour chaque pression de boue. Après essai, les éprouvettes sont démoulées et utilisées pour mesurer leurs caractéristiques.



**Figure 4. Essai d'imprégnation par suspension bentonitique sur lit filtrant sableux en cellule API.**

### 2.4 Caractérisation des sols imprégnés

Les éprouvettes ont été laissées à l'air libre. Leurs dimensions (hauteur, diamètre) sont mesurées afin d'évaluer les diminutions de volume en fonction du temps de séchage lent ( $t=0, 1, 5, 10, 35, 50$  heures) permettant ainsi de déterminer la déformation volumique. La teneur en eau finale des éprouvettes est quantifiée après passage à l'étuve à 105°C durant 24 h. La cohésion non drainée Cu a été approchée avec un scissomètre de laboratoire motorisé qui permet d'appliquer un cisaillement, de mesurer un moment de torsion et d'obtenir une résistance au cisaillement. Les dimensions des pales utilisées sont de 12,7 mm sur 12,7 mm. L'enfoncement (exprimé en 1/10 de mm) d'une pointe normalisée (cône de 60 g) conformément à la norme NQ2501-110, permet de suivre également l'évolution des propriétés mécaniques au cours du temps de séchage.

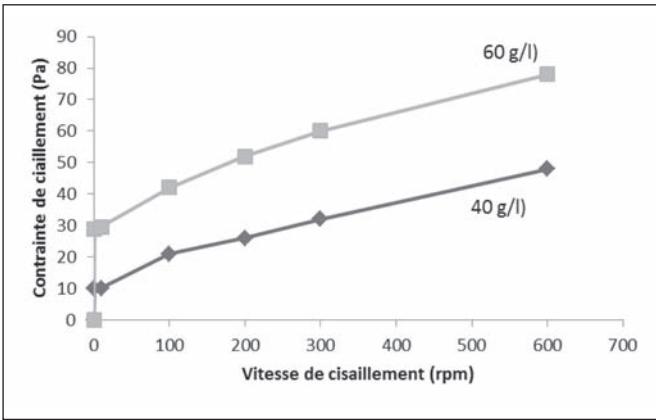


Figure 5. Courbes d'écoulement au FANN test – boues 40 et 60 g/l.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1. Caractérisation rhéologique au FANN test

La figure 5 indique l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation. Le fluide bentonitique est un fluide non newtonien à seuil  $P_0$  déterminé pour la vitesse de cisaillement nulle. La valeur  $P_0$  (basée sur 4 essais bien reproductibles) est de 9,2 Pa et de 31,4 Pa, respectivement pour les suspensions à 40 g/l et à 60 g/l. Pour cette bentonite industrielle, il est possible d'établir la relation entre la concentration massique et le seuil apparent mesuré au FANN test, en fonction de la concentration de la suspension (figure 6).

#### 3.2. Identification des longueurs d'infiltration.

Les conditions des matériaux (boue et lit filtrant) pour les essais sont présentées dans le tableau 1. Le lit filtrant est constitué de sable d'Hostun.

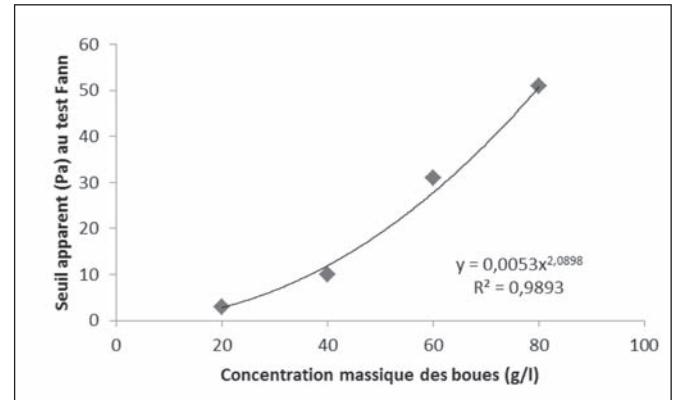


Figure 6. Seuil apparent, déterminé au FANN test, en fonction de la concentration de la suspension.

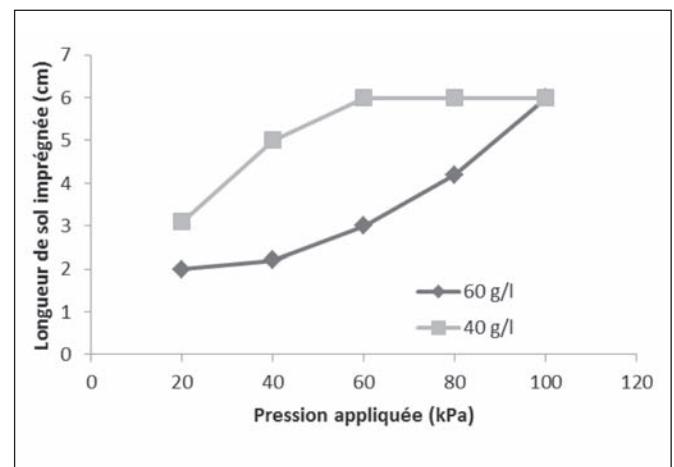


Figure 7. Epaisseur du lit imprégné (sable d'Hostun) pour deux suspensions bentonitiques en fonction de la pression.

Le fluide de forage a été chargé en sable (10 %) pour simuler l'apport des cuttings lors de l'excavation. Le lit filtrant granulaire a été (1) humidifié pour juger de l'effet de l'eau interstitielle et (2) enrichi en fines argileuses non réactives (5 % kaolinite) pour représenter un sable légèrement argileux. Les mêmes conditions de pression ont été respectées.

La figure 7 présente les longueurs d'imprégnation du fluide dans le lit filtrant (6 cm). A la même pression, le

Nom de l'essai	Boue		Lit filtrant	
	Concentration (g/L)	Pollution en sable (%)	Teneur en eau initiale (%)	Teneur en Kaolin (%)
Arèf	40 g/L	0 %	0 %	0%
B	60 g/L	0 %	0 %	0%
C	40 g/L	0%	10 %	0%
D	40 g/L	0 %	0 %	5%
E	40 g/L	10 %	0 %	0%

Tableau 1. Détail des paramètres expérimentaux concernant la boue et le lit filtrant.

Boue	Boue 40 g/l chargée	Boue propre à 40 g/l		
Lit filtrant	Sable sec	Sable sec	Sable humide	Sable argileux
Longueur imprégnée	4,9 cm	5 cm	5,2 cm	1,8 cm

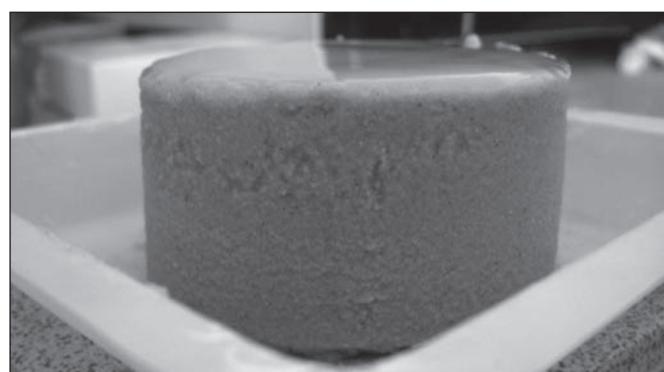
**Tableau 2. Valeurs des longueurs imprégnées en fonction du type de boue et de la nature du lit filtrant pour le palier de pression de 40 kPa**

fluide à 60 g/l pénètre moins dans le sable que le fluide à 40 g/l. Il apparaît, manifestement que le lit filtrant est insuffisamment épais, notamment pour la boue légère qui l'imprègne en totalité pour une pression supérieure à 40 kPa. L'imprégnation est maximale pour la boue concentrée à 100 kPa.

La moyenne des temps stabilisés pour chaque palier est de 83 s et de 35 s respectivement à 40 g/l et 60 g/l. Le temps stabilisé diffère peu d'un palier à l'autre. La teneur en eau moyenne des sols imprégnés est de 17,8 % et de 19,5 % en fin d'essai, pour les fluides à respectivement 40 g/l et à 60 g/l. Pour simuler un changement de tiges, (environ toutes les 10 min sur chantier), la pression a été annulée instantanément au milieu du palier de pression (60 kPa). Cette chute est ensuite suivie d'une remise sous pression à la valeur initiale durant 5 mn. Pour un fluide à 60 g/l de bentonite, aucune modification n'a été constatée sur la longueur d'imprégnation et le temps de stabilisation associé. Le palier suivant (80 kPa) est identique que l'essai sans chute de pression ; longueur imprégnée 4 cm en 30 s.

Le tableau 2 indique que la présence d'eau dans le sable et celle de sable dans la suspension ne modifie pas sensiblement les longueurs d'imprégnations du cas de référence. Mais la présence d'argile (Kaolin) dans le lit filtrant, diminue sensiblement l'imprégnation. Ce résultat est en accord avec les observations en laboratoire [BES, 00] et celles sur chantiers [ARI, 01], indiquant une faible extension de la zone imprégnée dans les terrains argileux, la présence de macropores étant fortement limitée et la fermeture du milieu poreux encaissant est rapide avec une nette diminution des pertes de boue. Ce même constat est observé pour tous les paliers de 0 à 60 kPa.

La figure 8 présente une éprouvette (épaisseur moyenne 6 cm) juste démoulée de la cellule avec le fin cake membrane et le lit sableux imprégné.

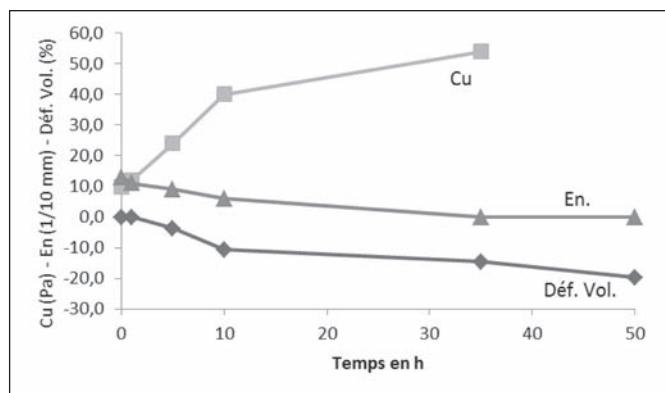


**Figure 8. Aspect des éprouvettes au démoulage – cake membrane – lit sableux imprégné.**

### 3.3 Évolution des propriétés mécaniques

Les éprouvettes, laissées à l'air libre sont soumises à des essais en fonction du temps de séchage naturel ( $t = 0, 1, 5, 10, 35, 50$  h).

La figure 9 donne l'évolution des valeurs de Cu, d'enfoncement, et de déformation volumique pour l'éprouvette obtenue avec un fluide maintenu sous pression par paliers croissants sous pression et concentré à 60 g/l. La résistance au cisaillement (Cu) au scissomètre n'est qu'indicative à cause de la taille réduite de l'échantillon. Elle n'est plus mesurable à cinquante heures car les pales ne pénètrent plus l'échantillon sans le détruire.



**Figure 9 : Evolution des paramètres mécaniques de la zone infiltrée par le fluide de 60 g/l au cours des heures suivant l'essai.**

Le séchage augmente la résistance mécanique des sols imprégnés et provoque une réduction de volume de 20 % à 50 h et ne semble pas se stabiliser, alors que Cu et En s'amortissent après 10 h de séchage. L'enfoncement est nul dès 30 h de séchage.

La comparaison des tests réalisés sur les différentes éprouvettes, constituées à partir de différentes concentrations initiales de fluide (20, 40, 60 et 80 g/l) montre qu'il n'y a pas de différence significative. Le gain des propriétés mécaniques existe certes mais dépend peu de la concentration du fluide a priori. Toutefois, il faut rappeler que les conditions de conservation sont bien différentes des conditions in situ.

## 4. CONCLUSION

L'évaluation du risque de déformation, voire de rupture du massif de sol soit par surpression excessive, soit par pression insuffisante fait intervenir de nombreux paramètres.

Les différents facteurs déterminants pour la définition des contraintes ou des pressions dans le sol dans le forage sont ; la géométrie de l'ouvrage et des outils employés, les caractéristiques rhéologiques du fluide chargé de cuttings et les propriétés mécaniques des sols constitutifs du massif initial et celles après le mécanisme d'imprégnation.

Au cours de cette étude, il apparaît que les longueurs et les temps d'imprégnation sont directement liés à la concentration du fluide et par conséquent à son seuil d'écoulement et à la pression appliquée. Il est intéressant de noter qu'à une pression donnée, cette épaisseur se stabilise au bout de quelques dizaines de secondes.

Une boue concentrée permettra donc aux foreurs de consommer moins de fluide en terrain sableux, le temps d'imprégnation sera court mais la longueur imprégnée d'extension limitée. La légère modification de la teneur en eau et en fines dans le lit filtrant n'a pas modifié les valeurs dans les conditions d'étude, toutefois il ne faut pas généraliser cette observation. Sous l'effet de la pression de fluide, le massif de sol initial est modifié, sur plusieurs centimètres autour du forage, ses propriétés hydro-mécaniques augmentent avec le temps de séchage.

La diminution des risques au cours d'un forage horizontal dirigé passe donc principalement par la maîtrise des paramètres de fluide (concentration) mais aussi mécaniques (pression d'injection du fluide), eux-mêmes étroitement liés à l'ensemble des données du forage (vitesse d'avancement, trajectoire...) en tout point de la galerie afin d'éviter le cavage et de créer une couronne améliorée afin d'éviter les pertes de fluides et le soulèvement du terrain.

Les perspectives de ce travail consistent en l'élaboration d'un modèle conceptuel, construit à partir des lois de la mécanique des sols et de la mécanique des fluides pour déterminer un facteur de risque. Ce modèle repose sur le principe développé dans la méthode convergence-confinement en définissant une courbe caractéristique du terrain et une caractéristique du soutènement provisoire que sont la boue mélangée aux débris de sol et la zone imprégnée.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ALL,00] E.N. Allouche, S.T. Ariaratnam, J.S. Lueke, "Horizontal directional drilling: profile of an emerging industry", *Journal of construction engineering and management*, vol. 26, n° 1, January February 2000, p. 69-76.
- [AME,90] *Recommended Practice Standard Procedures for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*, Washington DC, American Petroleum Institute Specification RP 13B-1, 1990.
- [ARI, 01] S. Ariaratnam, S. Lueke, 2001, "Evaluation of the annular space region in Horizontal directional drilling installations" *Arizona State university report*, 2001
- [ARI,00] S.T. Ariaratnam, E.N. Allouche, "Suggested Practices for Pipe Installations Using Horizontal Directional Drilling", *Practice periodical on structural design and construction*, vol. 5, n° 4, November 2000, p. 142-149.

[BAU,05] M. Baumert, E. Allouche, I. Moore "Drilling Fluid Considerations in Design of Engineered Horizontal Directional Drilling Installations", *International Journal of Geomechanics © ASCE*, December 2005, p.239-249.

[BES, 02] A. BESQ, A. PANTET, Ph MONNET (2002) - Caractérisation des fluides de forage : boues propres et chargées - *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*. Nancy 8-10 octobre 2002. 12 p.

[BES, 03] A. BESQ, C. MALFOY, A. PANTET, Ph. MONNET, D. RIGHI - Physico-chemical characterisation and flow properties of some bentonite muds - *Applied Clay Science* - Volume 23, Issues 5-6, October 2003, Pages 275-286.

[COM,03] *Forage dirigé, recommandations*, comité de rédaction, Lavoisier, 2003.

[DEL, 95], P; Delorme, « Analyse et amélioration de la technique du forage horizontal dirigé pour la pose de canalisations en polyéthylène » *thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, 1995.

[FLA,90] E. Flavigny, J. Desrues, B.Palayer « Note technique, le sable d'Hostun RF » *Revue Française de géotechnique*, n°53, Octobre 1990 - p.67-70.

[GUS,94] J.M. GUSIK, A. PANTET, Ph. MONNET (1994) Etude des caractéristiques rhéologiques de suspensions de bentonite - *Les Cahiers de Rhéologie*, vol. XIII, n°1-2, p 150-159.

[HAR,04] N. HARISPURE, A. PANTET, Ph. MONNET, M. VINCENT (2004) Fonction stabilisatrice des fluides de forage à base de bentonite dans le cas de forages dirigés, *Conférence Internationale de Géotechnique*, 19-21 mai 2004, Beyrouth.

[MAL, 01] C. MALFOY, A. BESQ, A. PANTET, Ph. MONNET (2001) A better knowledge of bentonite fluids for directional drilling : physical, chemical and rheological properties to control flow conditions. *DCA, 6<sup>th</sup> annual congress Strasbourg, Development, Construction, Approval*, 9 p.

[MOH,86] M. MOHKAM (1986) Etude de la boue de soutènement liquide et de la stabilité du front de taille. *Rapport d'études n° 01-86-2-1*, ENTPE Lyon.

[PAN,96] A. PANTET, Ph. MONNET, D. RIGHI (1996) Le cycle de la bentonite au cours du creusement des galeries: caractérisation physico-chimique et rhéologique de boues bentonitiques. *Les Travaux souterrains: des techniques et des hommes, CR journées d'études internationales*, Chambéry, 21-24 oct. 1996. Balkéma, 1996. p.509-514.

[PAN,03] A. PANTET, Ph. MONNET (2003) Bentonite Muds ; a tool for Horizontal - *Drilling Session D1-031- No Dig International*, Las Vegas (USA) – 10 p.

[PAN,06] Fluides de forages : gestion, traitement et recyclage pour les travaux sans tranchée. *Déchets, Sciences et Techniques. Revue Francophone d'Ecologie Industrielle*, p 25-30.

[WAN, 07] X. Wang, R.L. Sterling, "Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling", *Tunnelling and Underground Space Technology* 22 (2007) pp. 620-632.