

Fluides de forages : gestion, traitement et recyclage pour les travaux sans tranchée

Pantet Anne ^a, Merlet Nicole ^b, Guérin Michel ^{c*}

a : HydrASA-ESIP, UMR 6532 - 40, avenue du R.-Pineau - 86022 Poitiers

b : LCEE-ESIP, UMR 6008 - 40, avenue du R.-Pineau - 86022 Poitiers

c : Süd Chemie – SFBD – 6, rue L.-Michel - 94603 Choisy-le-Roi

* : FSTT – atelier 7

Le forage horizontal dirigé est une technique assez récente, qui permet de passer sous des obstacles (voies d'eau, voies ferrées, bâtiments...), de linéariser les réseaux et de limiter la gêne due aux travaux en tranchées ouvertes. La réussite d'un forage dépend notamment du fluide de forage utilisé, qui est souvent composé de bentonite et de polymères. Or la nature de ce fluide peut varier fortement d'un site à l'autre en fonction des terrains traversés. En fin de chantier, la boue devient un déchet, qu'il faut éliminer et traiter éventuellement. Les entreprises sont juridiquement responsables, comme productrices et détentrices, des boues de forage considérées comme un déchet. L'objet de ce travail est de présenter une analyse permettant de définir des critères à considérer pour l'admissibilité en décharge, et des résultats de tests pratiqués en laboratoire sur plusieurs types de fluides.

Mots-clefs

forage, fluides, déchets, gestion, bentonite

Trenchless Technology, mainly Horizontal Directional Drilling (HDD) & Micro tunnelling using drilling fluids, has been expanding for several years. These new construction methods have undoubtedly gained wide acceptance, particularly in highly congested urban areas and in environmental engineering like soil remediation of industrial sites. In the framework of the National Project "Microtunnels" a work group of FSTT (French Society for Trenchless Technology) has proposed "a drilling fluids research program" to manage the drilling fluids used during soil's excavation. It's worth looking at for various criteria : technical performances, economic and environmental considerations to reduce dumping and wastage during the underground works.

HDD requires the use of large volumes of drilling fluids that provide the following functions : hydraulic cutting with a jet, providing energy to the drill motor, lubricating and cooling the cutting head to reduce torque and drag, transporting drill cuttings to the surface, stabilising the hole against collapse, guarding against loss of drilling fluid into surrounding formations. The drilling mud is pumped downhole, circulates back to the surface and is collected in return the pit, then passed through machinery that separates the cuttings from the slurry. Drilling muds are bentonite based. They are very sensitive to either physical chemical contamination. During drilling operation, their physico-chemical properties are

constantly modified because of the excavated soil/water interaction inducing different flow and filtration properties, which have implications for the drilling performance. Significant amounts of drilling mud are normally disposed of at the end of a project. Logistics for disposal is extremely site specific. This drilling mud can be disposed of by :

- Use at another drilling location.
- Spread onto raw land for water retention improvement.
- Evacuation to dump site after treatment with cement, lime, water retention polymer...
- Treated to separate the solid phase (bentonite and cuttings) and the liquid fraction (water).

This paper describes :

1. Consequences of waste treatment and disposal at the working end ; management criteria, key parameters and limit value.
2. Different cases obtained from standard bentonite fluids to more complex bentonite/polymers systems.

Keywords :

drilling, fluid, waste, management, bentonite

INTRODUCTION

La technique de forages dirigés est très employée pour installer différents réseaux (eaux potables, pluviales et usées, fibres, câbles de télécommunications, électricité, gaz...) dans les milieux urbains et également dans des sites difficiles d'accès comme les passages sous rivière ou sous ouvrages existants, et dans des zones protégées. L'utilisation de cette technique est également en développement pour la dépollution in situ des sols pollués. Le forage permet d'atteindre la zone polluée et d'installer des drains et conduites. L'eau est ensuite pompée, traitée en surface et réinjectée dans le système phréatique. Cette technique est également utilisée comme moyen de reconnaissance pour implanter et réaliser dans les meilleures conditions des galeries au tunnelier ou au microtunnelier. Des applications remarquables de cette technique ont été réalisées pour la pose de pipelines dans des zones environnementales particulièrement protégée pour leur sensibilité et leur biotope (Brésil, Mato Grosso). Comme chaque chantier est spécifique et comme il existe peu d'études pour les opérateurs et concepteurs de travaux sans tranchée, nous proposons une méthodologie d'analyse pour

améliorer la gestion des déchets de forage dans un cadre réglementaire. Des cas d'applications spécifiques sont présentés, ainsi que les moyens expérimentaux disponibles et usuels.

PRÉSENTATION DE LA TECHNIQUE ET GESTION DES DÉCHETS GÉNÉRÉS

Présentation de la technique de forage dirigé

Les trois principales étapes permettant la pose des conduites sont représentées sur la figure 1 :

- Le forage du trou pilote
- L'élargissement du diamètre initial
- La pose de la conduite par tirage.

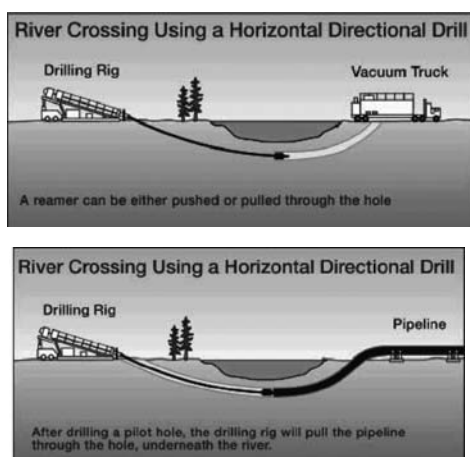


Figure 1. Représentation schématique des étapes 2 et 3.

Pour réaliser des galeries en toute sécurité et limiter les déplacements autour de l'ouvrage qui se propagent en surface et peuvent provoquer des dommages aux structures existantes, il y a lieu d'utiliser un fluide de forage adapté pour stabiliser provisoirement les parois du forage (la position horizontale est très préjudiciable à sa stabilité ; Harispure et al., 2004), pour évacuer les déblais et refroidir les outils. Très souvent, il s'agit de fluides à base de bentonite, éventuellement adjuvantés de polymères en très faible quantité. Les débris d'excavation, intimement liés au fluide de forage, sont traités généralement directement sur le chantier avant de pouvoir être déposés soit en centre de stockage, soit dans le milieu naturel sous certaines conditions. Dans la programmation des travaux de forage dirigés, il est important de gérer l'usage des boues de forage et de leur devenir à la fin du chantier, à la fois en termes de coût et de respect de l'environnement.

La gestion des déchets

Une analyse générale a été réalisée récemment dans le cadre du Projet national de la Fédération Française des Travaux sans Tranchées (FSTT, 2003), notamment par les auteurs.

La gestion des déchets dépend de plusieurs critères essentiels :

- Site : les conditions géologiques et géotechniques, ainsi qu'environnementales du site (pollué reconnu ou non reconnu et non pollué) doivent être correctement identifiées,
- Projet : la géométrie de l'ouvrage et par conséquent le volume

de terrain à excaver et à traiter, ainsi que la localisation du projet (milieu urbain ou en campagne) sont des données à considérer,

- Nature du fluide de forage : les fluides de forage sont souvent à base de bentonite avec ou sans polymères ou fluides uniquement à base de polymères.

Bien que chaque projet soit unique et doit être analysé en fonction des critères prédéfinis, des règles générales peuvent être établies.

La meilleure solution pour réduire la consommation de matières premières et le volume de déchets (pour réduire le coût) consiste à traiter sur le chantier le fluide bentonitique qui transporte les débris, puis à le réinjecter dans le circuit avec éventuellement une partie neuve. Il existe différentes capacités de stations de traitement adaptées aux chantiers pour séparer les débris (grossiers à très fins) provenant du terrain et le fluide benzénique, avec en série des tamis vibrants, des dessableurs, des desilteurs et des hydrocyclones. Cependant, dans tous les cas, à la fin du chantier, un volume de déblais (fluides de forage et sols excavés) doit être éliminé du site. En règle générale, les volumes sont faibles, de 10 à 100 m³, exceptionnellement de 1 000 m³. Comme les fluides de forage contiennent essentiellement de l'eau (70 à 90 %), le principal traitement consiste en une séparation liquide-solide. Ce traitement se fait souvent en deux étapes : (1) séparation des débris grossiers d'une pulpe chargée d'éléments fins et colloïdaux ; (2) clarification de cette dernière permettant de concentrer les éléments fins et colloïdaux et afin d'obtenir une eau clarifiée. Après vérification des tests environnementaux, la phase liquide peut être rejetée dans le milieu naturel ou le système épuratoire local, et la partie solide entreposée dans les décharges adéquates. Une solution alternative consiste à valoriser ces déchets. Toutefois, elle est rarement mise en œuvre actuellement. Ces déblais pourraient être solidifiés en les associant à des fibres ou du ciment pour la construction de remblais ou de parois moulées, mais cette possibilité n'est économiquement rentable que si les deux ouvrages sont proches l'un de l'autre. En cas de non-respect des tests environnementaux, des solutions spécifiques sont étudiées en fonction de la nature du problème.

La législation européenne

Suivant la classification européenne des déchets, les fluides de forage sont considérés comme des déchets inertes sous réserve de quelques critères à respecter. Les tests recommandés pour rendre acceptable le dépôt des phases solides dans des décharges comme déchets inertes (classe III en France) sont essentiellement la siccité et des analyses de percolation au travers des colonnes de déchets (AFNOR/X30YN56, 2000). Pour les phases liquides, les tests recommandés sont le pH, la demande chimique en oxygène (DCO, en mg.L⁻¹, AFNOR/NFT90-101, 1988), la demande biochimique en oxygène (DBO, en mgO₂.L⁻¹, AFNOR/NFT90-103, 1975), la teneur en matière en suspension (MES) et les analyses chimiques comme les sulfates, les métaux lourds (Pb, Cu, Cr, Ni, Zn, Mn, Sn, Hg, Fe, Al) et les hydrocarbures. Les valeurs limites sont

Etat du déchet	Valeurs acceptables
Solides	Siccité > 30 % Tests de percolation et analyses chimiques des lixiviats
Liquides	pH : 5.5 à 9 température < 30 °C MES : 35 mg.L ⁻¹ DCO < 125 mg.L ⁻¹ [DBO < 30 mg.L ⁻¹ , COT < 70 mg.L ⁻¹ , sulfates < 250 mg.L ⁻¹ , métaux lourds totaux < 15 mg.L ⁻¹ et hydrocarbures < 10 mg.L ⁻¹]

Remarque : les tests définis entre crochets n'ont pas été pratiqués dans cette étude.

tableau 1. Quand les seuils ne sont pas respectés, d'autres traitements doivent être pratiqués et leur définition est fonction de la nature des polluants présents.

données dans le tableau 1. Quand les seuils ne sont pas respectés, d'autres traitements doivent être pratiqués et leur définition est fonction de la nature des polluants présents.

CONSTITUANTS ET PROPRIÉTÉS DES FLUIDES DE FORAGES

Le fluide de forage est très souvent de la bentonite, une argile naturelle utilisée essentiellement pour ces propriétés rhéologiques intéressantes. Au fur et à mesure de la réalisation de la cavité, le fluide bentonitique injecté sous pression favorise la stabilité de la cavité grâce à la constitution d'un cake ou d'une membrane étanche sur les parois. La pression du fluide est alors suffisante durant le temps du creusement pour supporter les parois et réduire le risque de rupture jusqu'à la pose finale de la canalisation, dimensionnée pour résister à la poussée des terres et de l'eau interstitielle. Dans certains cas, la bentonite est soit adjuvantée avec des polymères, donnant un fluide mixte, soit remplacée par des polymères biodégradables.

Constituants

Bentonites (naturelles et commerciales)

La bentonite est une argile naturelle, résultant très souvent de l'altération de cendres volcaniques. Elle contient essentiellement de la smectite, notamment de la montmorillonite. Il existe d'autres espèces minérales dans ce vaste groupe d'argiles, comme l'hectorite, la saponite, la beidelite et la nontronite. La cristallographie des smectites indique qu'elles sont formées de trois couches : deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique. Les feuillets constitués de ces trois couches superposées présentent une légère charge négative, liée à des phénomènes de substitution atomique. Ce déficit de charge est compensé par la présence de cations interfoliaires, qui ont la possibilité de s'hydrater facilement en présence d'eau et de provoquer un gonflement important. Très souvent dans la nature, les cations prédominants sont le calcium, le magnésium et le sodium. Dépendant de leur mode de formation, des minéraux accessoires sont souvent associés aux smectites dans la bentonite, comme le quartz, les feldspaths, la calcite, le gypse, voire de la palygorskite. La présence de ces minéraux accessoires peut avoir des effets positifs ou négatifs sur la définition de la qualité industrielle de la bentonite. Les bentonites, du fait de leurs propriétés cristallographiques, présentent des propriétés colloïdales importantes. En présence d'eau, elles s'hydratent

en augmentant de volume et constituent des suspensions présentant des structures de gels, de la viscosité et de la thixotropie. Ces propriétés sont largement employées dans le cadre des travaux souterrains pour réaliser les forages et les galeries.

Les bentonites sont souvent exploitées dans des carrières à ciel ouvert, avec une teneur en eau moyenne naturelle de 30 %. 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, elles peuvent être activées avec du carbonate de calcium pour donner une bentonite sodique artificielle, qui offre des possibilités de gonflement bien meilleures. En conséquence, les propriétés rhéologiques sont également améliorées, du fait du pouvoir gonflant et de dispersion des bentonites sodiques. Ensuite, les bentonites concassées ou en poudre sont conditionnées en containers ou en sacs après avoir été éventuellement séchées pour avoir une teneur en eau moyenne de 15 %.

Polymères

Trois classes de polymères sont communément définies :

- Organiques (Guar, Zanthan, considérés comme biodégradables)
- Semi-synthétiques (polymères organiques modifiés comme CMC, PAC)
- Synthétiques (polyamides et dérivés phpa).

Généralement, les polymères sont utilisés en faible quantité comme additifs aux fluides de bentonite, permettant d'améliorer leurs propriétés. Cependant, ils peuvent aussi être utilisés seuls dans des cas de remediation de sites pollués où l'usage de la bentonite n'est pas possible à cause de l'effet colmatant sur les parois, qui nuiraient au pompage des eaux polluées en vue de leur traitement en surface. Plusieurs fabricants ont développé des produits biodégradables. Toutefois, cette notion doit être précisée pour l'usager (notamment les temps nécessaires et les méthodes de dégradation).

Méthodes de contrôle des propriétés des fluides en cours de travaux

Parce qu'une mauvaise formulation de fluides peut être la cause de dommages en cours de travaux, il est nécessaire, dans le cadre de la préparation du projet, de définir un programme boue en fonction du type d'ouvrage envisagé (géométrie, géologie, environnement). Les procédures ont été développées dans diverses recommandations. On peut se référer aux articles de Besq et al. (2000) et Pantet et Monnet (2002). Les contrôles classiques consistent à mesurer régulièrement la densité, la viscosité de Marsh, la résistance au gel, les paramètres de filtration et le pH.

Durant les travaux, le fluide initial est modifié à cause des déblais, généralement de petites tailles, qui peuvent être ou non réactifs avec l'eau (dissolution de certaines phases minérales, gonflement des argiles du sol.). En conséquence, les propriétés du fluide évoluent et doivent être surveillées. Si besoin, elles sont réajustées avec du fluide fraîchement préparé.

La densité ($d = 1.02$ à 1.30) est contrôlée régulièrement avec une balance à boue. La viscosité de Marsh est une mesure rapide du temps d'écoulement d'un volume de boue défini dans un entonnoir calibré. Les propriétés rhéologiques (résistances au gel, viscosité plastique et viscosité apparente) sont mesurées avec un rhéomètre Fann, adapté également aux conditions de chantier. De nombreux travaux ont été entrepris pour déterminer le couplage entre les propriétés rhéologiques et la nature de la bentonite (Malfoy et al., 2001), ainsi que les relations entre les propriétés rhéologiques et les paramètres nécessaires au dimensionnement des installations de marinage (Besq, 2000). Les paramètres de filtration sont mesurés avec une cellule cylindrique API. Il s'agit de mesurer la quantité de filtrat obtenue en appliquant une pression d'air comprimé de 700 kPa sur un fluide de forage au bout de 30 minutes. Les pH du filtrat et de la boue sont régulièrement contrôlés.

ETUDE EN LABORATOIRE

Le programme analytique proposé ici consiste à comparer différents fluides de forage bentonitiques et mixtes en distinguant d'une part des fluides initiaux (formulation primaire) et des fluides chargés de débris d'excavation (fluides utilisés au cours des travaux et éventuellement régénérés).

Les tests pratiqués sont ceux recommandés pour admettre, dans des unités de stockage classique les matériaux de fin de chantier, à savoir le pH, la siccité et la DCO. La définition de ces grandeurs et les modes de mesure ont été définis précédemment. Nous considérons ce cas, car il s'agit du plus couramment rencontré dans l'industrie des forages dirigés. En effet, quand il y a des éléments toxiques dans le déchet, ils proviennent du sol excavé, qui est identifié ou non identifié comme pollué lors des travaux préparatoires au chantier ou par les indications fournies par le maître d'ouvrage.

Matériels

Trois bentonites commerciales ont été utilisées : IKO, Volclay, Wyoming. La caractérisation minéralogique de ces bentonites indique qu'il s'agit essentiellement de montmorillonite sodique, probablement naturelle pour Volclay et Wyoming et activée pour IKO. Trois polymères, noté $P_{x=1 \text{ à } 3}$ ont été employés avec uniquement la bentonite du Wyoming. Deux types de boue ont été comparés à différents pH, d'une part le fluide initial noté M + Px, d'autre part le fluide chargé de déblais, référencé Mc + Px.

La préparation de suspensions, dosée à 40 g/l, suit une procédure stricte pour obtenir un fluide homogène et complètement hydraté. Etant donné que dans les applications d'ingénierie, la bentonite n'est pas préparée avec de l'eau distillée, nous avons choisi d'utiliser l'eau du réseau de la ville de Poitiers. Une masse de 100 g de sable est ajoutée dans la formulation de base pour simuler la présence des débris de forage. Le niveau de dispersion est important pour obtenir une suspension stable dans le temps, c'est-à-dire qui ne sédimente pas rapidement, et également pour favoriser l'hydratation des feuillets pour

augmenter l'effet gel et visqueux du fluide. A la fin de son utilisation, lorsqu'on doit traiter la suspension granulaire en séparant la phase fluide de la phase solide, il est recherché à l'inverse d'agglomérer les particules. Le problème est que la bentonite est un bon agent dispersant, un bon absorbant et que cette étape de séparation n'est pas facile à obtenir pour ce matériau initialement fortement dispersé. Nous avons utilisé une méthode de séparation par filtration pour obtenir un matériau solide, dont on a mesuré la siccité.

Résultats

Le tableau 1 rassemble les valeurs des propriétés rhéologiques et des principales caractéristiques (pH, siccité, DCO). La viscosité et les valeurs de filtration sont communes pour des bentonites commerciales à cette concentration. Il apparaît qu'après une simple filtration (700 kPa), le solide obtenu contient encore une teneur en eau trop importante pour être déposé, alors que la phase fluide peut être rejetée dans le milieu naturel (sous réserve de ne pas contenir des éléments toxiques issus du sol). La procédure par séparation est meilleure que la dilution, qui utilise beaucoup d'eau et disperse les particules argileuses.

Concentration 40 g.L ⁻¹	Bentonite V	Bentonite I	Bentonite W
pH	8.7	9.3	9.3
Marsh viscosité (s)	30	31	32
Filtrat API (mL)	32.5	23.9	20
Siccité cake (%)	16.4	15.1	17.7
DCO susp. (mg O ₂ .L ⁻¹)	300	360	140
DCO filtrat (mg O ₂ .L ⁻¹)	40	50	<30

Tableau 1. Propriétés rhéologiques des trois fluides bentonitiques et leurs réponses aux tests environnementaux.

Les résultats du tableau 2 montrent que l'acidification des mélanges augmente les teneurs en Ca et Na contenues dans le filtrat. En effet, l'acidification dissout une partie des minéraux annexes présents dans les bentonites, notamment la calcite, et déstabilise l'environnement électrique des particules suivant les concepts de la théorie DLVO unanimement utilisés pour interpréter les phénomènes d'agrégation, comme la coagulation et la floculation.

Concentration 40 g.L ⁻¹ en conditions naturelles	Bentonite V	Bentonite I	Bentonite W
Ca (mg.L ⁻¹)	10.4	15	14
Na (mg.L ⁻¹)	300	400	300
avec acide (pH = 6)			
Ca (mg.L ⁻¹)	16.8	345	112
Na (mg.L ⁻¹)	400	700	600

Tableau 2. Teneurs en Ca et Na dans les filtrats avec et sans acidification.

Les tableaux 3 (a, b, c) rassemblent les résultats obtenus pour les deux familles de fluides (M et Mc) avec les trois types de polymères dosés à des concentrations usuelles et à différents pH. Le pH du filtrat est directement lié au pH de la suspension. La figure 2 indique que l'addition de polymères augmente notablement la DCO mais réduit la siccité. La siccité des fluides chargés (Mc) est nettement plus élevée que celle des fluides initiaux (M), l'effet des débris est manifeste sur ce paramètre.

Concentration bentonite 40 g.L ⁻¹	Polymère concentration 0.1 %						P.c. 0.5 %				P.c. 1 %	
	sans acide		pH = 6		pH = 3		pH = 6		pH = 3		pH = 3	
	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc
pH	9.1		7.2	6.4	6.2	4.3	7.1		4.9	3	3.1	3
Turbidité (NTU)	1		0.9	9.1	1.3	0.7	1.2		3.2	1.5	3.4	7.7
Sicité cake (%)	11.3		5.7		10.2	39.5	18.1		18.1	30.8	10.7	28.6
DCO filtrat (mg O ₂ .L ⁻¹)	86		48	97	24	37	108		72	65	196	152

Concentration bentonite 40 g.L ⁻¹	Polymère concentration 0.1 %						P.c. 0.5 %				P.c. 1 %	
	sans acide		pH = 6		pH = 3		pH = 6		pH = 3		pH = 3	
	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc
pH	8.8		7.7	6.6	4	4.1	7.7		3	3.2	3.3	3.9
Turbidité (NTU)	0.6		0.8	2.8	0.4	1.1	1.6		12	1.03	0.2	1.9
Sicité cake (%)	9.9		6.4		8.5	38.6			18	36	12.9	30.4
DCO filtrat (mg O ₂ .L ⁻¹)	86		76	76	48	63	153		132	140	225	333

Concentration bentonite 40 g.L ⁻¹	Polymère concentration 0.1 %						P.c. 0.5 %				P.c. 1 %	
	sans acide		pH = 6		pH = 3		pH = 6		pH = 3		pH = 3	
	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc	M	Mc
pH			7	7	4.8	4.7			5.2	4.1	2.5	3.9
Turbidité (NTU)			2.1	3.1	1.5	0.5			2.1	1.45	2.5	33.1
Sicité cake (%)			6.1	25.2	10.5	40.5				33.1	10.9	27.7
DCO filtrat (mg O ₂ .L ⁻¹)			86	51	24	42			58	71	103	106

Tableau 3. Résultats des tests environnementaux.

CONCLUSIONS

Comme pour toutes les activités humaines, la pose de canalisations par forages dirigés a un impact sur l'environnement. Ce travail traite de la gestion des déchets générés lors de travaux d'excavation à l'aide de fluides bentonitiques ou mixtes et a développé deux aspects. Le premier présente le problème général, suivi d'une analyse détaillée permettant de mettre en avant les critères importants à considérer pour la gestion de ce déchet de chantier particulier, en respectant le contexte réglementaire européen. La seconde partie rassemble des résultats de laboratoire mettant en évidence l'influence du type de bentonite, de la nature du fluide (initial et de travail) et le rôle des polymères (nature et concentration).

Ainsi, la gestion des fluides de forage doit être considérée comme une part du projet. Elle doit être efficace et réfléchie, pour ne pas créer des contraintes inutiles au développement de ces techniques qui réduisent fortement les nuisances par rapport aux techniques traditionnelles.

Références

AFNOR/NFT90-101, 1988, Chemical Oxygen Demand

AFNOR/X30YN56, 2000, Protocole de percolation ascendante : application prénormative européenne. ADEME-BRGM 9974079.

AFNOR/NFT90-103, 1975, Biochemical Oxygen Demand.

Besq A., Malfoy C., Pantet A., Monnet Ph., Righi D., 2003, Physico-chemical characterisation and flow properties of some bentonite muds, Applied Clay Science, 10 p.

French Society Trenchless Technology, 2003, Recommandations "forages dirigés", Projet national « Microtunnels », paragraphe 6.5, pp. 104-116 et annexe 5, pp. 191-196. Editions Hermès-Lavoisier, ISBN 2.7462-0792-3.

Harispure N., Pantet A., Monnet Ph., 2004, Fonction stabilisatrice des fluides de forage à base de bentonite dans le cas de forages dirigés, Comité International de Mécanique des Sols, Beyrouth, 8 p.

Malfoy C., Besq A., Pantet A., Monnet Ph., 2001, A better knowledge of bentonite fluids for directional drilling : physical, chemical and rheological properties to control flow conditions, DCA, 6th Annual Congress Strasbourg, Development, Construction, Approval, 9 p.

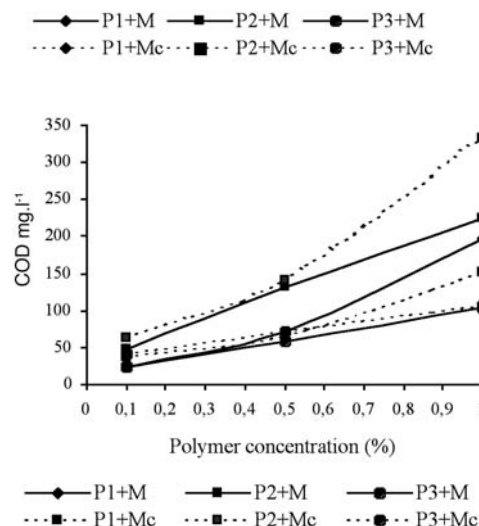
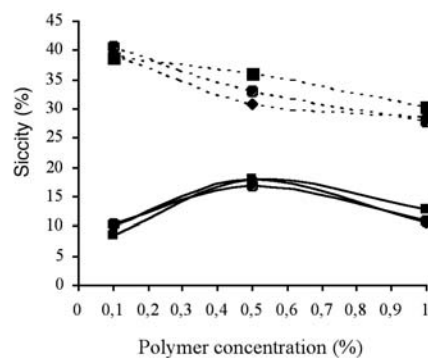


Figure 2. Données (sicité - DCO) pour les six mélanges avec (Px+Mc) et sans (Px+M) cuttings à pH = 3 et pour trois concentrations de polymères.

Pantet A., Monnet Ph., 2003, Bentonite Muds ; a tool for Horizontal Drilling, in Proceedings of the NASTT/ISTT International No-Dig 2003 Show, Las Vegas, Nevada, ISTT, Session D1-031, 10 p.

Pantet A., Merlet N., Ouvry J.-F., Didier G., 2000, Traitement et recyclage des boues : document technique et législatif, FSTT, Projet national « Microtunnels », 26 p.

Remerciements

Les auteurs remercient la FSTT (French Society Trenchless Technology) pour leur soutien dans les recherches menées sur les fluides d'excavation.