

UTILISATION DES PARAMETRES DE FORAGE EN RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE

DRILLING PARAMETER RECORDING USE IN GEOTECHNICAL INVESTIGATION

Philippe REIFFSTECK¹,
1 Université Paris Est, LCPC, Paris, France

RÉSUMÉ – L'observation de la variation des paramètres de fonctionnement des machines de forage permet souvent d'avoir une idée assez précise de la position des transitions des couches de sols ou de roches de natures différentes. Cette communication présente un état des pratiques et insiste sur l'importance de l'écriture de protocole spécifique à cet essai qui doit être considéré comme un essai à part entière et doit être adapté à l'objectif de la reconnaissance.

ABSTRACT – The observation of changes in operating parameters of drilling machines can often provide a fairly accurate position of the transition layers of soil or rocks of different kinds. This paper presents a state of practices and emphasizes the importance of writing protocol specific to this technique that must be considered as a full test and must be adapted to the purpose of the investigation.

1. Introduction

Dans le cadre d'une campagne de reconnaissance géotechnique, la réalisation de forages est une source d'informations importante. En effet, réalisés pour le prélèvement, l'insertion de sondes d'essais (dilatomètre, cross-hole, pressiomètre,...), la mise en place de systèmes de mesure (piézomètres,...), ou simplement pour faire des diagraphies instantanées, ces forages sont souvent plus nombreux que les essais eux-mêmes et mieux disséminés sur la surface de terrain étudiée. L'observation de la variation des paramètres de fonctionnement de la machine permet souvent d'avoir une idée assez précise de la position des transitions des couches de sols ou de roches de natures différentes par une visualisation de contrôle. Le traitement des paramètres de fonctionnement pour la transformation en paramètres physiques permet l'interprétation de ces paramètres et la réalisation de combinaison pour une comparaison avec des paramètres géotechniques de ces mêmes terrains.

2. Mesure et enregistrement des paramètres de forage

De manière générale, on peut classer les paramètres de forage en quatre catégories (Cailleux, 1986) :

- les paramètres imposés par la méthode et non enregistrés numériquement (type d'outil et diamètre, nature du fluide d'injection, performances limites de la machine et du système d'injection) ;
- les paramètres fixés par l'opérateur (poussée sur outil P_O , vitesse de rotation V_R , débit d'injection Q_I) ;

- les paramètres dépendant de la réponse du terrain (vitesse d'avancement V_A , couple de rotation C_R , pression d'injection P_I , débit de retour Q_O , pression de retenue P_R) ;
- les paramètres évolutifs non maîtrisés (usure des outils, variation de la composition du fluide).

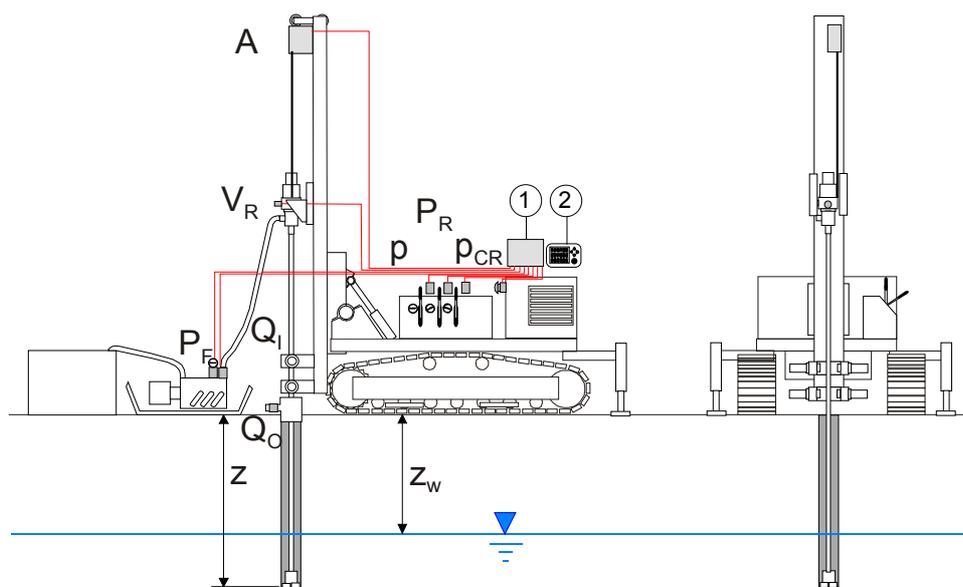
2.1. Systèmes de mesure

Le système de mesure est constitué (Cailleux, 1986 ; Gui et al., 1999 ; Gui et al., 2002) (figure 1) :

- d'un enregistreur possédant une interface utilisateur et un dispositif de transfert des données ;
- d'un conditionneur alimentant les capteurs, multiplexant les voies de mesure et conditionnant les signaux (parfois intégré dans l'enregistreur) ;
- d'un ensemble de capteurs disposés sur la machine.

Le système de mesure possède un interrupteur appelé « bouton sondeur » permettant à l'opérateur d'interrompre l'enregistrement lors des manœuvres telles que l'ajout de tiges.

Les figures 1 et 2 donnent des exemples de localisation des différents capteurs listés dans ce paragraphe pour une sondeuse géotechnique de taille moyenne.



Légende :

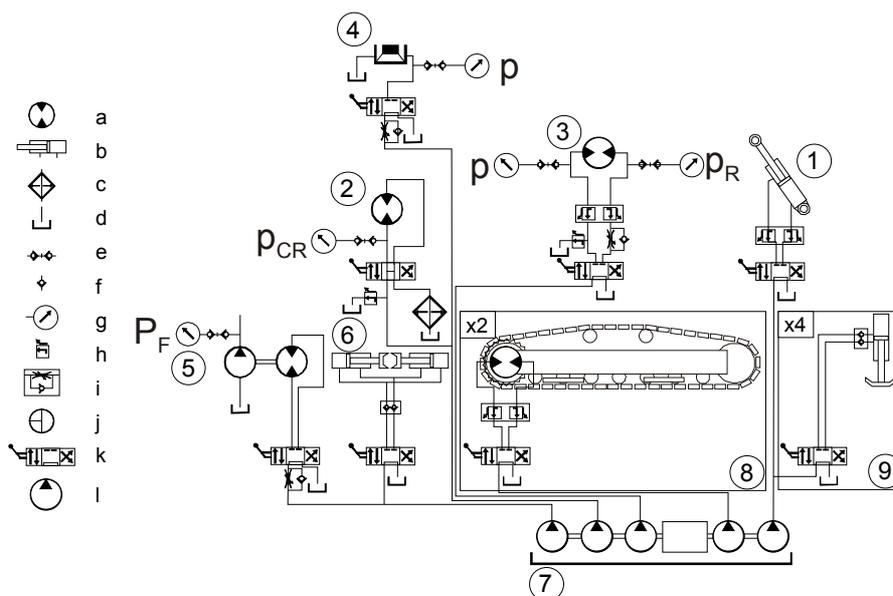
1 : conditionneur

2 : enregistreur

Figure 1. Exemple de localisation des capteurs sur une machine de forage

La méthode de mesure et le point de fixation doivent être choisis de façon à minimiser les pertes de charges ou jeux pour limiter les bruits ou les lissages artificiels des signaux de mesure.

Pour tirer le meilleur des enregistrements de paramètres, la fréquence d'acquisition du système de mesure doit être supérieure à 10 Hz et l'enregistrement est réalisé de préférence en fonction de l'avance et non du temps avec un pas de mesure maximum du centimètre.



Légende :

1 : vérin mât	4 : marteau	7 : groupe hydraulique
2 : moteur de rotation	5 : pompe de fluide de forage	8 : chenille
3 : moteur d'avance	6 : mors du frein de tige	9 : vérin de stabilisation

Avec les symboles hydrauliques usuels : a : moteur, b : vérin, c : refroidisseur, d : réservoir, e : coupleur, f : clapet anti-retour, g : manomètre, h : limiteur, i : étrangleur variable avec clapet anti-retour, j vanne trois voies, k : distributeur avec commande à levier, l : pompe

Figure 2. Exemple de schéma hydraulique d'une machine de forage et localisation des capteurs

2.2. Paramètres enregistrés

Conformément à la norme EN ISO 22475-1, en forage en rotation, les paramètres enregistrés sont les pressions hydrauliques de poussée p , de couple p_{CR} et de retenue p_R , la pression du fluide d'injection P_F et l'avance A de l'outil, la vitesse de rotation de la tête V_R ainsi que le débit du fluide Q_I (CEN, 2006). Certains de ces paramètres nécessitent une mise à l'échelle afin de disposer de mesures représentatives de l'action de l'outil.

2.2.1 Vitesse d'avance

La vitesse d'avance V_A est obtenue directement à partir de la mesure de la profondeur ou avance A et de l'intervalle de temps dt entre les mesures.

$$V_A = \frac{A_{t+dt} - A_t}{dt} \quad (1)$$

2.2.2 Poussée sur outil

La mesure de la force de poussée $S_O.P_O$ correspond à la pression hydraulique régnant dans le cylindre du piston du vérin ou du moteur hydraulique p mise à l'échelle avec la poussée maximum P_{max} évaluée lors de l'étalonnage tête en butée

basse à laquelle on ajoute le poids de la tête de forage $W_{tete\ forage}$ et du nombre de tiges n de poids unitaire W_{tige} .

$$S_o \cdot P_o = \frac{\rho}{\rho_{max}} \cdot P_{max} + W_{tete\ forage} + n \cdot W_{tige} \quad (2)$$

S_o est la surface d'action de l'outil de diamètre D .

2.2.3 Pression de retenue

Complémentaire de la poussée sur outil, la mesure de la pression de retenue P_R régnant dans le circuit de retour est indispensable pour calculer la poussée nette appliquée sur l'outil $P_E = P_o - P_R$.

$$S_o \cdot P_R = \frac{\rho_H}{\rho_{H\ max}} \cdot H_{max} \quad (3)$$

ρ_{Hmax} est évaluée par étalonnage en imposant un effort H_{max} sous lequel la pression de retenue est dépassée et la descente de la tête démarre.

On notera que ce freinage dû au frein de sécurité sur la translation de la tête, aux valves de charge et aux pertes de charges dans le circuit retour (flexibles, filtre, etc.) est la cause principale de l'interprétation erronée des combinaisons de paramètres.

2.2.4 Pression d'injection du fluide de forage

La pression du fluide de forage P_F est mesurée à l'aide d'un capteur de pression placé sur la sortie de la pompe d'injection ou du compresseur. Pour avoir la pression au niveau de l'outil P_I , il est nécessaire de corriger, en terrain perméable, de la hauteur de colonne de fluide de forage (de poids volumique γ_M), présente dans le train de tiges, réduite de la hauteur du toit de la nappe phréatique mesurée à partir de l'outil (voir la définition de z_w en figure 1).

$$P_I = P_F + z_w \cdot \gamma_M \quad (4)$$

2.2.5 Couple de rotation

La pression envoyée au moteur de rotation p_{CR} est mesurée à l'aide d'un capteur de pression placé sur le circuit hydraulique de la foreuse à l'entrée du moteur hydraulique. Cette mesure du couple de rotation C_R est donc une estimation indirecte du couple réel à partir de la pression p_{CR} et du couple maximal C_{max} évaluée lors de l'étalonnage.

$$C_R = \frac{p_{CR} - p_{CRO}}{p_{CR\ max}} C_{max} \quad (5)$$

Il peut être utile dans le cas de mesures fines de mesurer la pression à couple nulle p_{CRO} du moteur.

3. Mode opératoire d'essai

Un certain nombre de conditions à respecter sont listées dans le paragraphe ci-dessous. Pour valider leur choix, il est conseillé de prendre en compte dans l'organisation de chantier la réalisation d'une planche de convenance ou de forages

de calage. Les conditions à respecter pour disposer de paramètres de forage interprétables sont de maintenir les plus constantes possibles :

- la poussée sur outil ;
- le débit d'injection ;
- la vitesse de rotation ou au moins le rapport de vitesses du moteur.

Une valeur trop élevée de ces consignes nuira à la qualité des enregistrements. Il est en effet important de ne pas faire fonctionner la machine et la ligne d'outils à la limite de leurs capacités. Ceci est un facteur déterminant du succès de la reconnaissance. L'entreprise et le client doivent avoir conscience qu'une reconnaissance fine utilisant les diagraphies instantanées n'est pas synonyme de rendement.

3.1. Sélection des appareillages

La machine de forage doit être choisie en fonction des objectifs du projet et résulte d'un compromis optimal entre la puissance de la machine, la ligne d'outils et la résistance des horizons traversés. Pour permettre une bonne interprétation, le type et les caractéristiques de la sondeuse et de l'outil perforateur ne doivent pas changer pendant un même chantier. Les changements ou réparations d'outils, imposés par l'usure ou les conditions de terrains, devront être signalés pour être pris en compte dans l'interprétation des enregistrements (influence sur le diamètre et l'attaque). De même, il est conseillé de ne pas changer d'opérateur, car celui-ci peut avoir une forte influence sur les résultats.

La pompe d'injection doit permettre un débit constant sous une pression maintenue constante et sans à-coups, et d'atteindre un minimum de 3 MPa (sauf indication contraire). Le train de tiges ne doit pas présenter de fuites aux raccords et son diamètre ne doit pas changer pendant un même chantier.

3.2. Correction à prendre en compte

Un certain nombre de facteurs sont à prendre en compte pour limiter les sources d'erreurs sur les paramètres mesurés : corrections dues à l'avance du forage comme l'usure des outils, la variation de la nature du fluide d'injection ; des corrections dues aux conditions de forage comme l'atteinte des capacités maximales ou des limites des appareillages ; le mauvais positionnement des capteurs conduisant à mesurer des pertes de charges.

3.3. Planche de convenance et forage de calage

Afin d'optimiser le choix du matériel de forage et des paramètres machine, il est conseillé de réaliser une planche de convenance comportant au moins trois forages de calage espacés au minimum de 2 m. Celle-ci doit permettre au foreur de comparer différents jeux de paramètres, au géotechnicien de s'assurer de l'aptitude des paramètres de forage à alimenter le modèle géotechnique du site ou au maître d'ouvrage de valider plusieurs options.

4. Combinaison de paramètres

Chaque paramètre enregistré peut donc se voir attribuer une signification qualitative en terme de caractéristiques du sol foré ou en terme de fonctionnement

du forage. Durant le forage, chaque changement de couche se traduit généralement par la variation d'un ou plusieurs paramètres (Girard, 1986). À la plupart des formations correspond un paramètre prépondérant, mais ce paramètre peut être le même pour deux formations différentes. De ce fait, l'utilisation de la variation de certains paramètres de forage pour l'établissement de coupes géologiques en complément d'un nombre restreint de sondages carottés ou la recherche de vides est importante. Toutefois, afin de limiter l'influence de la modification de l'un des paramètres de fonctionnement sur les autres paramètres, il est nécessaire de recourir à des combinaisons de paramètres appelés : paramètres composés, quasiment indépendants des conditions de réalisation.

Tableau I. Combinaison de paramètres

Nom	Equation	Unités	Références
Résistance à la pénétration	$R_P=(t)_{dz=0,2\text{ m}}$	kN	Möller et al. (2004)
Relation de Somerton	$V_A = 1,5.V_R.D\left(\frac{P_E}{S_d.D^2}\right)^2$	-	Somerton (1959)
Entropie	$L(z) = \sum_{z_0}^z S(z+dz) - S(z) $	-	Duchamps (1988)
Énergie normalisée	$E = \frac{\alpha.P_E.V_A + \beta.C_R.2.\pi.V_R + \gamma.P_M.F}{V_A}$	N.m/m	Nishi et al. (1998)

Avec S le signal considéré, P_M la puissance du marteau et F la Fréquence, α, β, γ des coefficients

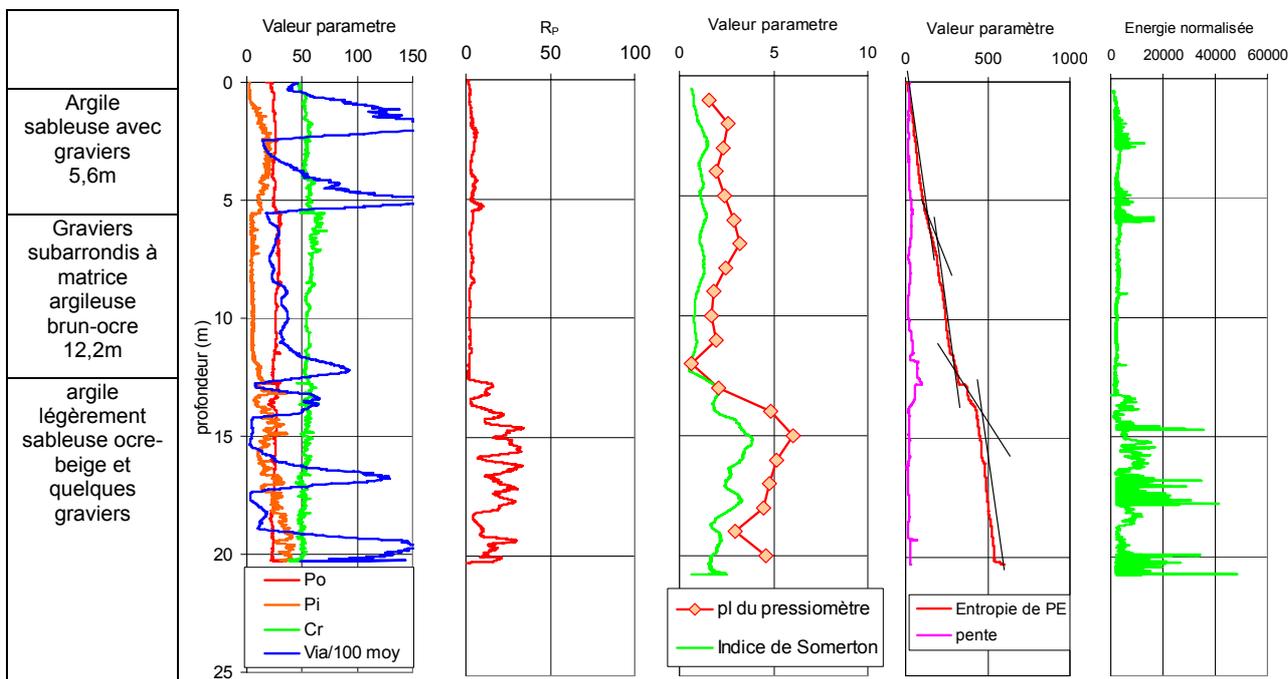


Figure 3. Exemple d'évolution des différentes combinaisons avec la lithologie

Le tableau I liste quatre combinaisons de paramètres issues de différentes pratiques européennes, japonaises, anglo-saxonnes ou scandinaves. Elles sont le résultat d'années de pratique et de recherches sur leur territoire national. Les figures

3 et 4 permettent de comparer l'application de ces différentes combinaisons à un cas particulier.

On observe la capacité de celles-ci à faire ressortir les transitions de lithologie proposées par les coupes sondeurs données sur la gauche des figures. Les transitions entre les matériaux à prédominance granulaire ou argileuse ou cimentés sont correctement localisées.

Lors de l'élaboration de ces combinaisons, leurs auteurs ont choisi deux voies principales :

- empirique pour se rapprocher de paramètres mécaniques d'autres essais comme le pénétromètre ou le pressiomètre. C'est le cas des deux premières combinaisons ;
- théorique en construisant des combinaisons basés sur l'énergie dépensée pour désagréger le sol avec l'outil (énergie normalisée) ou sur l'agitation du signal (entropie).

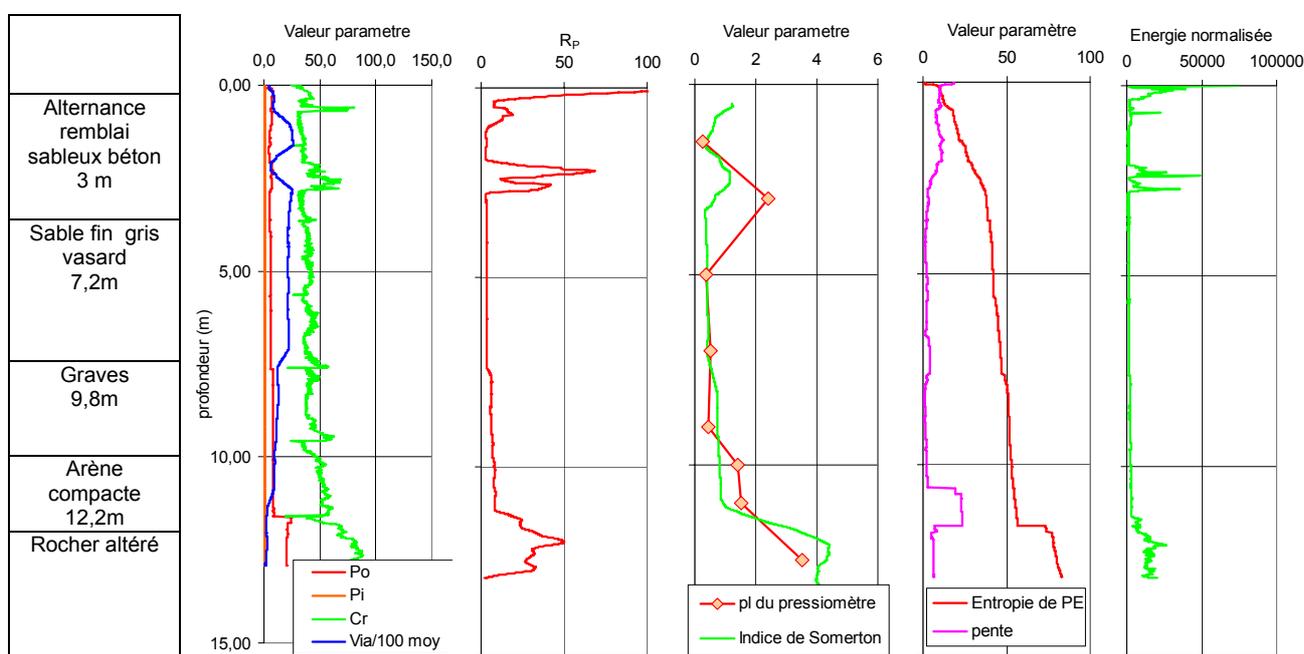


Figure 4. Exemple d'évolution des différentes combinaisons avec la lithologie

L'étude statistique appliquée aux paramètres de forage a pour objectif de déterminer des critères caractérisant l'homogénéité d'une zone à des fins d'exploitation automatique des profils. La difficulté de cette approche réside dans le fait que le forage est un système dépendant de variables de contrôle qui ne sont pas toujours mesurées (usure, vitesse de rotation...). Il est donc intéressant de déterminer des critères d'homogénéité autant que possibles invariants vis-à-vis de ces variables de contrôle. Les techniques mises en œuvre vont de critères s'appuyant sur des variables simples (moyenne, médiane, écart-type, asymétrie, aplatissement...) ou des variables développées spécifiquement : indice d'homogénéité ou sur l'analyse de variogramme ou de l'autocorrélation.

Ces techniques nécessitant une longue expérience pour juger de leur pertinence dans l'application pratique, elles ne sont pas couvertes par les documents en cours de rédaction au niveau national ou international (Duchamp, 1988 ; Bourget et Rat, 1995 ; LCPC, 2010 ; CEN, 2010).

4. Conclusions

Cette communication s'est attachée à présenter la méthode des paramètres de forages, sa mise en œuvre pratique et son potentiel d'application dans une étude géotechnique. Les enregistrements de paramètres de forages ou diagraphies instantanées offrent la possibilité de localiser et caractériser les couches de caractéristiques homogènes en cours d'exécution d'un sondage à très petite échelle, mais en raison de l'interdépendance des différents paramètres et des facteurs influençant la réponse diagraphique leur interprétation reste délicate.

Finalement, il est important d'exploiter de façon combinée les informations issues de cette technique avec une technique complémentaire, afin d'améliorer l'image du sous-sol et mieux maîtriser le risque global en générant une image du site plus riche qualitativement et quantitativement.

Il est encore nécessaire de se limiter, dans l'état actuel des connaissances, à n'utiliser que des corrélations limitées à un chantier défini pour une machine et une méthode de forage définie et un outil précis.

Les réflexions présentées ici font l'objet de discussions au sein d'un groupe de travail de la commission de normalisation européenne Reconnaissance et essais géotechniques (TC341WG1) (CEN, 2010).

5. Remerciements

L'auteur désire remercier le Ministère de l'Environnement de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer pour le financement de cette action de recherche ainsi que ses collègues et confrères : Y. Deniaud, C. Kreziak, P., Azemard, O. Malassingne, M. Pioline, J.-M. Terpereau, V. Talfumière, P. Leroux, J.-P. Hamelin, D. Lossy, J. Benoît, M. Rispal, H. Lofrod, P. Welter, P ; Buchacher.

6. Références bibliographiques

- Bourget M., Rat M. (1995) Interprétation semi-automatique des enregistrements Des paramètres de forage (sondeuses hydrauliques en rotation), Revue Française de Géotechnique n°73 pp 3 - 14.
- Cailleux J.-B. (1986) Étude des diagraphie instantanées en forage, Rapport des laboratoires, GT12, 97 pages
- CEN (2006) ISO 22475-1 Reconnaissance et essais géotechniques - Méthodes de prélèvement et mesurages piézométriques - Partie 1: Principes techniques des travaux, 125 pages
- CEN (2010) ISO 22476-X Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Enregistrement des paramètres de forage, 30 pages (document de travail)
- Duchamp J.M. (1988) Apport des techniques statistiques pour l'exploitation des diagraphies instantanées en génie civil. Doctorat Université Bordeaux I - n° d'ordre : 273. 131 pages.
- Girard H. (1985) Contribution à l'exploitation des paramètres de forage en génie civil. Thèse d'Etat - Université Bordeaux I, 1985. 161 pages.
- Gui M.W., Bolton M.D., Soga K., Hamelin J.P., Hass G, Burgess N. and Butler A.P. (1999). Instrumented borehole drilling using ENPASOL system. 5th Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Singapore.
- Gui M.W., Soga K., Bolton M.D. Hamelin J.P. (2002) Instrumented Borehole Drilling for Subsurface Investigation, Jour. of Geo and Env. Eng. ASCE, Vol. 128:4, pp.283-291
- LCPC (2010) Paramètres de Forage en Géotechnique, Méthode d'essai LPC, 61 pages (à paraître)
- Möller B., Bergdahl U., Elmgren K. (2004) Soil-Rock Sounding with MWD – a Modern Technique to Investigate hard Soils and Rocks Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization (ISC-2), Porto, Vol. 1, 773-740.
- Nishi, K., Suzuki, Y. & Sasao, H. (1998). Estimation of soil resistance using rotary percussion drill. International conference on site characterization, Proceedings ICS98, Atlanta, vol.1, pp393-398.
- Somerton W.H. (1959) A laboratory study of rock breakage by rotary drilling, Petroleum transaction, AIME, Vol. 216, pp.92-97