LE GRIZZLY 2® - AUTOMATISATION DES PENETROMETRES DYNAMIQUES ET MESURES D'ENERGIE LORS DU BATTAGE

THE GRIZZLY 2® - DYNAMIC PENETROMETER DPSH AUTOMATION AND DYNAMIC MESUREMENT ENERGY RATIO

Miguel Angel BENZ-NAVARRETE[1], Roland GOURVES[1], Esteban ESCOBAR[1,2], Pierre BREUL[2], Younes HADDANI[1], Antoine BELIEN[1] et David CHABANAT[1].

1 Sol Solution Géotechnique Réseaux, 63204 Riom Cedex, France
2 Institut Pascal, 63170 Aubière Cedex, France

RÉSUMÉ —Dans cet article nous présentons le pénétromètre dynamique Grizzly®, équipé de différents capteurs permettant d'automatiser la prise de mesures. Nous présentons aussi les résultats obtenus pour l'étalonnage de l'énergie transmise aux tiges lors du battage et de sa variation en fonction de la longueur de tiges, tel que recommandé par les spécifications respectives (EN ISO 22476-2, ASTM-D-4633-10).

ABSTRACT — In this paper we present the dynamic penetrometer Grizzly®, equipped with different sensors to automate the in-situ measurements. Also, we present the results of the calibration of the driving energy transferred to the rods and the influence of the rod length on the transfer of energy, as recommended by the respective specifications (EN ISO 22476-2, ASTM-D-4633-10).

1. Introduction

Ausculter le sol en y enfonçant un pieu est probablement l'une des plus anciennes techniques permettant d'estimer sa résistance. Utilisée massivement depuis le début du XXème siècle, cette méthode porte le nom d'essai pénétromètrique et son utilisation tient une place très importante parmi la grande palette d'essais in-situ disponibles. Il existe deux grands types de pénétromètres : les statiques ou CPT et les dynamiques y compris le carottier SPT ; ces derniers sont les plus couramment utilisés dans le monde. On estime en effet que 85-90% des fondations conventionnelles du continent américain ont été dimensionnées sur la base des résultats des pénétromètres dynamiques SPT. Le principe du pénétromètre dynamique consiste à faire pénétrer dans le sol, par battage, un train de tiges muni d'une pointe conique (ou d'un carottier pour le SPT). Lors du sondage on enregistre le nombre de coups N nécessaires pour enfoncer le cône dans le sol. Il est possible, par le biais des formules de battage, d'établir une relation entre la résistance à la pénétration du sol et l'énergie de battage.

Bien que pour la plupart des ingénieurs, le caractère dynamique de ces pénétromètres soit considéré comme un désavantage, il s'agit d'un outil très intéressant pour l'étude du comportement dynamique des sols comme par exemple l'évaluation du risque de liquéfaction.

Figure 1 . Exemple de pénétromètres dynamiques. Pénétromètre dynamique lourd chilien (à gauche), pénétromètre DCP (au centre) et pénétromètre Panda® (à droite)

Cependant, l'inexistence de normes précises concernant leur dimensionnement a laissé place au développement d'une multitude d'appareils (Figure 1) et à diverses formules de battage employées pour leur exploitation qui font que l'interprétation des résultats obtenus n'est pas aisée. En outre, à la différence des pénétromètres statiques qui sont devenus des outils très sophistiqués grâce à l'incorporation de différents capteurs dans la pointe, les pénétromètres dynamiques sont restés éloignés de ces avancées en demeurant d'une technicité ancienne et en se limitant à l'enregistrement sur le terrain du nombre de coups N. Néanmoins, des efforts de recherche importants ont été réalisés sur les pénétromètres dynamiques (Gourvès, 1991 ; Benz, 2009) rendant possible l'instrumentation et l'automatisation de l'enregistrement des données pour certains pénétromètres dynamiques lourds.

Dans cet article, nous présentons le pénétromètre lourd DPSH Grizzly®, complètement automatique et équipé de différents capteurs permettant d'apporter des réponses à deux verrous essentiels : l'automatisation des mesures pénétromètriques lors du sondage et la mesure de l'énergie réellement transmise au train de tiges pour chaque impact. L'objectif est de renouveler l'intérêt porté sur l'utilisation des pénétromètres dynamiques en simplifiant leur utilisation et d'autre part de proposer à l'ingénieur de terrain, un outil lui permettant d'obtenir des mesures fiables et entachées d'un minimum de biais expérimental.

2. Le pénétromètre Grizzly®

Le Grizzly® est un pénétromètre dynamique DPSH monté sur chenilles destiné à la reconnaissance des sols et au contrôle de compactage. Le principe de mesure est identique à celui des pénétromètres dynamiques. Cependant, pour chaque impact du marteau, une procédure numérique automatisée permet de mesurer, de calculer et d'enregistrer l'enfoncement *e* et la résistance de pointe *qd* calculée avec la formule des Hollandais. Les données sont affichées en temps réel sur l'écran tactile et à la fin du sondage sont stockées et positionnées grâce au GPS intégré. A l'aide d'une clé 3G l'opérateur peut transmettre le(s) sondage(s) où que ce soit.

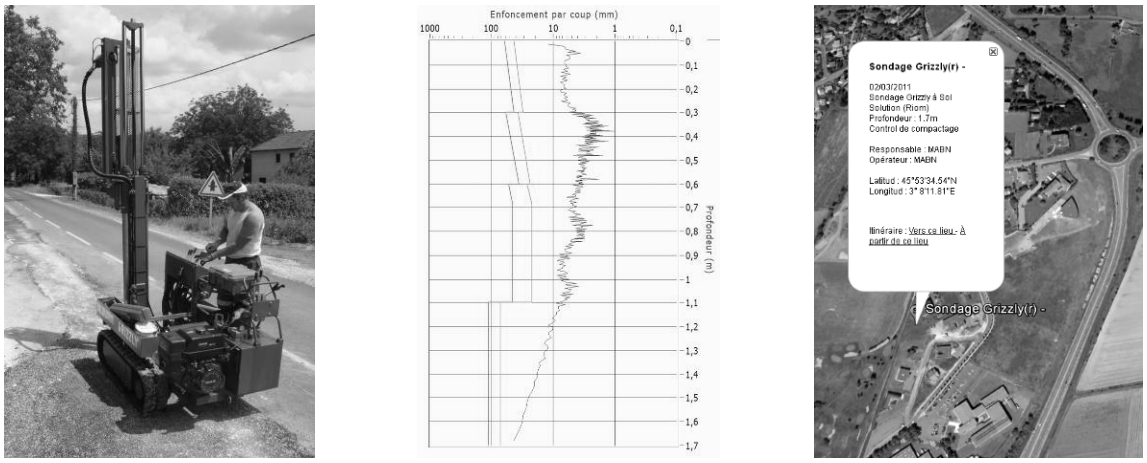

Figure 2. Le pénétromètre Grizzly® (à gauche), pénétrogramme et courbes de référence (au centre) et positionnement GPS du sondage (à droite)

Pour le contrôle de compactage, la mesure de l'enfoncement par coup est comparée en temps réel à des courbes de référence, fonction du type de sol, de l'état hydrique et des qualités de compactage (Q2, Q3, Q4, Q5) requises. Le Grizzly® peut être aussi équipé d'une tête de forage le permettant ainsi d'ausculter la plupart des sols meubles présents en surface (Figure 3).

2.1. Automatisation de l'appareil

L'instrumentation du Grizzly® permet d'assurer la mesure de l'impact et de l'enfoncement à chaque coup. Pour cela, l'appareil est équipé d'un compteur d'impacts qui déclenche la mesure de l'enfoncement réalisée avec un codeur à bande robuste, étanche et monté sur silentbloc permettant d'isoler les vibrations parasites. La résolution du capteur est de 50µm et assure une erreur inférieure à 1% sur 10m de profondeur. Un autre capteur, placé au niveau de l'enclume, assure la détection automatique de la position du mât de battage lors du sondage. Il permet de bloquer le mouvement des vérins et le battage en s'assurant qu'aucune charge parasite n'est appliquée sur les tiges pendant le levage et la chute du mouton. Les mesures sont transmises au système d'acquisition, qui assure le filtrage des signaux. Le logiciel Grizzly® permet, hormis de piloter le battage, de programmer l'arrêt de celui-ci lorsque l'opérateur doit rajouter une tige, en cas de refus ou en cas de dépassement de la profondeur visée. L'extraction du train de tiges est intégrée au mât de battage ayant une capacité d'extraction de 11Tm. Cela facilite la tâche de repli du matériel. Les caractéristiques de l'appareil sont présentées dans le tableau 1.

3. Mesure de l'énergie lors du battage pénétromètrique : le Grizzly 2®

Pour les pénétromètres dynamiques, la source d'énergie utilisée pour enfoncer la pointe dans le sol résulte de l'impact du marteau. Le transfert de celle-ci au train de tiges et ensuite au sol a été pendant très longtemps expliqué par la théorie des chocs de Newton, alors qu'on sait aujourd'hui qu'il est mieux représenté par l'équation de l'onde, où l'énergie est transmise sous forme d'une onde.

Figure 3 . Le pénétromètre Grizzly® transport, ordinateur de bord et foreuse

Tableau 1 . Caractéristiques du pénétromètre Grizzly®

Poids de la masse, M (Kg)	:	63,5
Hauteur de chute, h (m)	:	0,76
Energie de battage, E_b (Nm)	:	473,4
Diamètre des tiges, d_t (mm)	:	32
Section de la pointe, A_p (cm^2)	:	20
Dimensions, L/l/H (m)		1,90/0,89/1,25
Poids de la machine, P_{total} (Kg)		770 (vide) – 890 (plein)

En effet, quand la masse *M* animée d'une vitesse v_m heurte la tête du pénétromètre, une onde de compression *u(x,t)* est engendrée dans celui-ci et se propage vers la pointe. L'amplitude et la longueur de l'onde *u(x,t)* dépendent principalement de la géométrie et de l'impédance du marteau et la quantité d'énergie transmise dépend du temps pendant lequel le marteau et l'enclume restent en contact. Lorsque l'onde *u(x,t)* arrive à l'interface pointe/sol, une partie de celle-ci est utilisée pour déformer le sol et une autre partie est réfléchie vers le haut. De manière générale, lorsque l'onde réfléchie, souvent une onde de traction, arrive à l'interface marteau/enclume, le contact entre les deux est stoppé et le transfert d'énergie est achevé.

(Schmertmann et Palacios, 1979) ont été les premiers à mesurer la propagation des ondes lors du battage pénétromètrique pour étudier l'énergie transmise aux tiges et l'efficience du battage. Plus tard, de nombreux auteurs se sont intéressés au sujet (Sy et Campanella, 1991, Odebrecht et al. 2005). En France, (Aussedat, 1971) a été le premier à introduire ce type de mesures. Gourvès (1991) et Benz (2009) à l'aide des pénétromètres Panda® et Panda 2®, ont été les premiers à appliquer ces approches permettant ainsi de mesurer l'énergie vraiment transmise aux tiges pour chaque impact du marteau. Cependant, personne en France n'a étudié le transfert d'énergie et l'effet de la longueur des tiges.

Aujourd'hui, en Europe comme dans le monde, les spécifications (ASTM D 4633-10, EN ISO 22476-2) exigent un étalonnage fréquent de l'énergie de battage des pénétromètres dynamiques. Néanmoins, dans la pratique on continue à compter le nombre de coups (ou l'enfoncement par coup) et à s'en servir pour des calculs sans aucune correction de la valeur enregistrée sur le terrain.

3.1. Mesure de l'énergie et calcul de l'efficience du système de battage.

Pour mesurer l'énergie transmise aux tiges, il existe principalement deux méthodes : *EF2* (Schmertmann et Palacios, 1979) et *EFV* (Sy et Campanella, 1991). Celles-ci diffèrent par le type et la quantité de capteurs employés ainsi que sur l'imposition de certaines conditions aux limites.

$$EF2(t) = \frac{c}{EA} \int_{to}^{to+2L/c} F(t)^2 dt \qquad (1)$$

$$EFV(t) = \int_0^t F(t)v(t)dt \qquad (2)$$

Avec c la célérité des ondes (m/s), E le module d'Young (MPa) et A la section des tiges (m2). Bien que des efforts aient été réalisés pour améliorer la méthode EF2 la méthode EFV s'avère la mieux adaptée au battage pénétromètrique. L'efficience du système de battage est exprimée par le biais du coefficient d'efficience CE défini comme le rapport entre l'énergie transmise aux tiges par l'impact et l'énergie de battage théorique (souvent Mgh). Il a été montré que CE n'est pas constant, mais qu'il dépend, hormis du système de battage, de la longueur de tiges employées (Schmertmann et Palacios, 1979).

3.2. Tête de mesure Grizzly 2®

Pour mesurer l'énergie transmise aux tiges du Grizzly®, nous avons conçu une tête de mesure équipée de différents capteurs (Figure 4) selon les recommandations des normes (ASTM D 4633-10, EN ISO 22476-2). La géométrie de la tête a été étudiée pour réduire les hautes fréquences introduites par les chocs acier/acier mais aussi pour s'adapter facilement au train de tiges de n'importe quel pénétromètre. Les capteurs sont reliés à la chaîne d'acquisition à l'aide d'un connecteur unique, ce qui facilite énormément la mise en place. Chaque impact mesuré est traité, enregistré et affiché en temps réel sur le PC. L'énergie transmise au train de tiges est calculée en temps réel pour chaque impact. A la fin d'un sondage, les mesures peuvent être mises en correspondance avec la mesure de profondeur réalisée durant le sondage.

4. Validation expérimentale

Deux terrains ont été auscultés dans le but d'une part de valider les résultats obtenus avec le Grizzly® (en termes de résistance de pointe) et d'autre part de déterminer à l'aide de la tête de mesure Grizzly 2® l'énergie réellement transmise aux tiges en fonction de la profondeur du sondage.

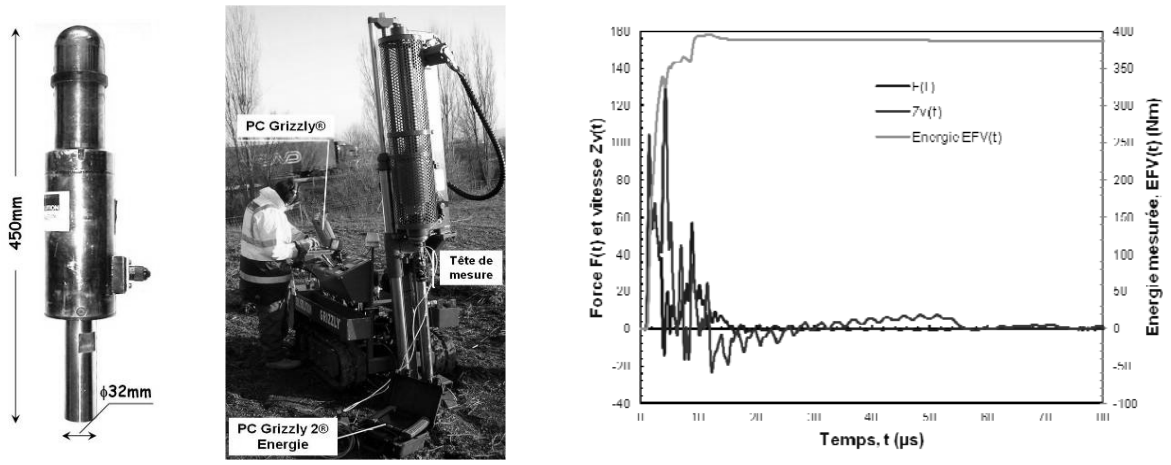

Figure 4 . Tête de mesure Grizzly 2®, Mesures in-situ et exemple de mesures réalisées à l'aide de la tête Grizzly 2®

4.1. Présentation des sites : Vernouillet et Gerzat

Le premier site testé se trouve à la gare ferroviaire de la commune de Vernouillet (Yvelines). En ce qui concerne la géologie du site, il s'agit d'alluvions anciennes, constitué d'un remblai (0-0,5m), de limon sableux (0,5m-2m) et de sables limoneux (2m-3m). Le refus est atteint vers 3,5m. Sur ce site, compte-tenu de la profondeur de la formation nous avons réalisé principalement des essais comparatifs à l'aide du pénétromètre Panda 2®. Le deuxième site se trouve sur la commune de Gerzat (Puy-de-Dôme). Il s'agit principalement d'une formation argilo-marneuse dont le refus est trouvé environ à 9m de profondeur. Sur ce site nous avons réalisé principalement des essais en vue d'étudier le transfert d'énergie en fonction de la profondeur.

4.2. Répétabilité et fiabilité des mesures

Sur le site à Vernouillet, deux sondages Grizzly® ont été réalisés. L'objectif étant de comparer les pénétrogrammes obtenus et de valider leur reproductibilité. De plus, trois sondages Panda® ont été réalisés nous permettant d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus par le biais d'un comparatif de résultats. Les résultats obtenus (Figure 5) montrent d'une part la bonne répétabilité des mesures sur site avec le pénétromètre Grizzly® et d'autre part qu'il existe une très bonne corrélation avec les résultats obtenus à l'aide du pénétromètre Panda®. Les expériences réalisées en parallèle à cette recherche sur différents sites montrent qu'il existe une corrélation presque parfaite entre les pénétromètres Panda® et Grizzly®.

4.3. Energie de battage et coefficient d'efficience

Comme nous l'avons signalé, la détermination de l'efficience de battage C_E est très importante lorsqu'on ausculte le sol à l'aide d'un pénétromètre dynamique. En effet, la résistance de pointe *qd* est proportionnelle au nombre de coups *N* et celui-ci est inversement proportionnel à l'efficience du système de battage. De plus, la valeur de C_E n'est pas constante mais elle dépend de la longueur des tiges.

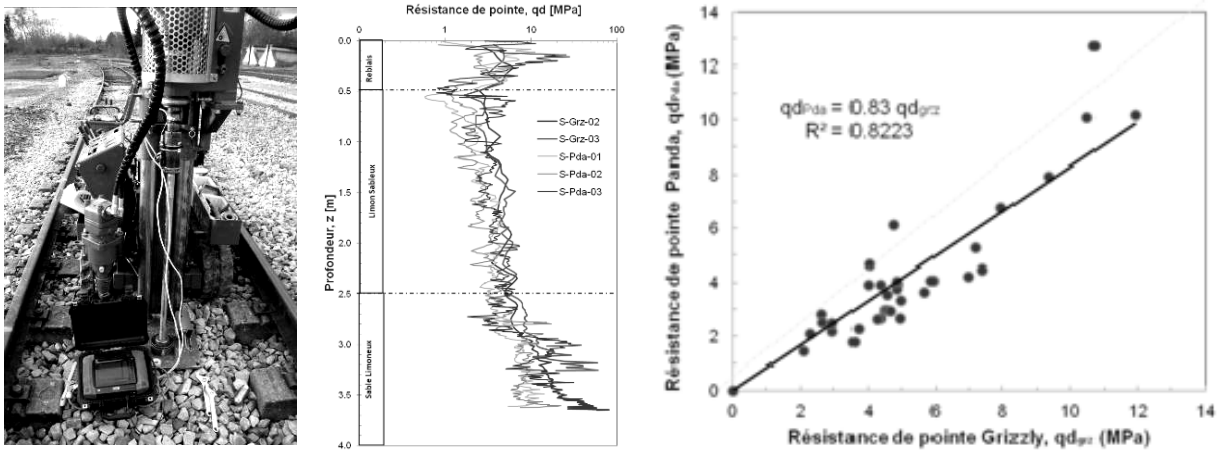

Figure 5 . Essais à Vernouillet (à gauche), comparaison des pénétrogrammes Panda 2® et Grizzly® (au centre) et corrélation de données obtenues (à droite)

Pour déterminer la valeur de C_E du Grizzly® et sa variation en fonction de la longueur L_t de tiges nous avons utilisé la tête de mesure et nous avons enregistré chaque impact fourni lors du battage sur le site à Gerzat. Deux sondages ont été réalisés à 9m de profondeur. Pour déterminer l'énergie transférée nous avons utilisé la méthode EFV. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 6.

On peut remarquer que l'énergie transmise lors du battage n'est pas constante, mais fonction de la profondeur du train de tiges. Ainsi, pour le cas du Grizzly®, il est nécessaire de considérer une valeur C_E=0,75 pour Lt < 4m, C_E=0,8 pour 4 < Lt < 6, C_E=0,85 pour 6 < Lt < 10 et de 0,88 pour Lt > 10m. Ces valeurs pourraient être intégrées au logiciel Grizzly® pour permettre de corriger in situ et en temps réel la valeur de N ou de l'enfoncement par coup mesuré lors du contrôle de compactage.

5. Conclusion

Le pénétromètre dynamique est très certainement l'outil de reconnaissance le plus utilisé dans le monde. Bien que dans la plupart de cas ce sont des appareils d'une technicité ancienne, nous avons montré à l'aide du pénétromètre Grizzly® qu'il est possible d'équiper ces appareils des capteurs et de l'instrumentation associée dans le but d'automatiser la prise de mesures in-situ.

La répétabilité et la fiabilité des résultats obtenus à l'aide du Grizzly® ont été montrées par le biais des essais in-situ et des comparatifs avec d'autres appareils. Nous avons également déterminé la quantité d'énergie transmise aux tiges lors du battage Grizzly® et nous avons vu que celle-ci est fonction de la longueur de tiges, tel qu'indiqué dans la littérature. Il est donc nécessaire et aujourd'hui possible au moyen du Grizzly d'adapter la valeur du coefficient d'efficience en fonction de la profondeur afin d'obtenir des valeurs de résistance non biaisées. Enfin, l'instrumentation du pénétromètre dynamique Grizzly® ouvre les portes pour une correction automatique de la valeur enregistrée mais aussi pour des analyses des signaux lors du battage telles que celles proposées par (Benz et al. 2011).

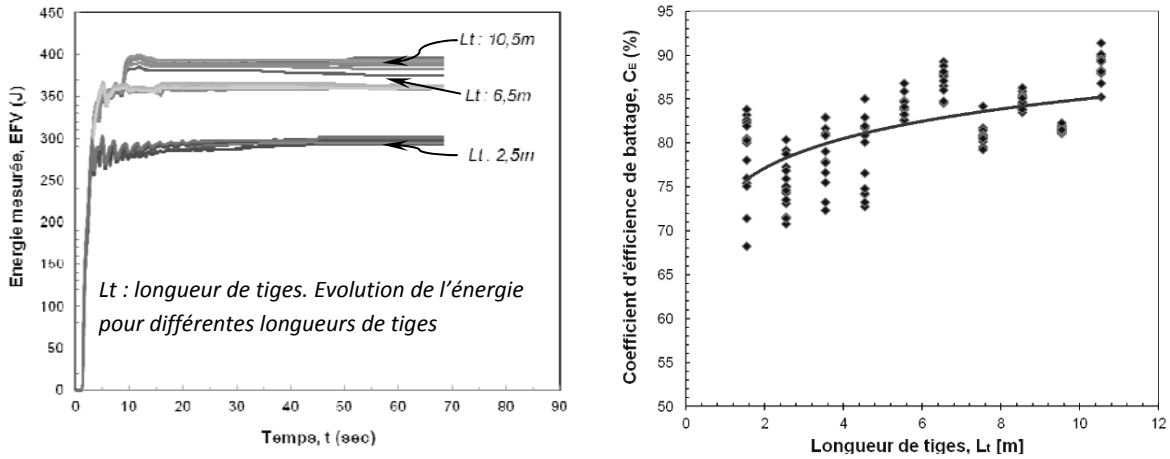

Figure 6 . Courbes de transfert d'énergie aux tiges pour différentes longueurs de tiges et variation du coefficient d'efficience C_E en fonction de la profondeur

Remerciements

Les auteurs remercient Sol-Solution Géotechnique Réseaux pour le soutien économique et scientifique ainsi que l'équipe de géotechnique de l'Institut Pascal. Le présent travail a fait l'objet du dépôt de brevet FR 1251660 du 23 Février 2012.

Références bibliographiques

ASTM-D-4633-10. ASTM D4633 - 10 Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers. Norme ASTM, Geotechnical Engineering Standards.

Aussedat G. (1970). Sollicitations rapides des sols. Thèse doctorale, Université de Grenoble.

Benz M.A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2. Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand.

Benz M.A., Gourvès R., Haddani Y. (2011). Détermination de paramètres dynamiques du sol lors du battage pénétromètrique par découplage d'ondes. 8ème Colloque National AFPS 2011, Paris, 10.

Gourvès R. (1991). Le PANDA - Pénétromètre dynamique léger à énergie variable LERMES CUST, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand.

Odebrecht, Schnaid, Rocha, Bernardes (2005). Energy Efficiency for Standard Penetration Tests, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE , Vol. 131 (10), 1252-1263.

Schmertmann J.H., Palacios A. (1979). Energy Dynamics of SPT. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, n° GT8. 909-926.

Sy A., Campanella R.G. (1991). An alternative Method of Measurement SPT Energy. Proceeding of the 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, pp 499-505.

EN ISO 22476-2 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais en place -- Partie 2: Essais de pénétration dynamique. Norme européenne.