

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Reconnaissance géotechnique in situ par couplage de l'endoscopie et de l'essai de pénétration dynamique

Endoscopy and dynamic penetration test coupling to realise in situ soil investigation

P.Breul – *Sol Solution, ZAC des portes de Riom 63200 Riom*
R.Gourvès – *LERMES, C/U/S/T 24 Av. des Landais BP 206 63174 Aubière cédex*

RESUME : L'évolution des techniques endoscopiques permet aujourd'hui d'obtenir des images de très grandes qualités au sein des sondages géotechniques. Par traitement de ces images, il est aussi possible d'extraire un certain nombre de caractéristiques des matériaux (granulométrie, textures, forme des particules ou couleur...). Ces images sont recueillies au même point que celui où préalablement une caractéristique mécanique a été mesurée (dans notre cas la résistance de pointe pénétrométrique). Le couplage des informations mécaniques et des informations morphologiques enrichit considérablement la connaissance du sol, d'autant plus que les forages mécaniques sont très souvent des essais « aveugles ». Plusieurs exemples sont présentés concernant des cas concrets (remblais routiers, archéologie, analyse d'interfaces sol-structures, canalisations...).

ABSTRACT : Today, collecting images of good quality within geotechnical tests is possible thanks to the endoscopy techniques evolution. By using automatic treatment, several material characteristics are extracted from images, like particles size distribution, textural changes, particles shape, or colour. Images are collected at the same place where beforehand a mechanical parameter has been measured (in our case, the penetrometric cone resistance). The coupling of mechanic and morphological information coupling enhances considerably the soil knowledge all the more mechanic drills are often "blind" tests. Several examples concerning concrete cases are presented (road embankments, archeology, soil-structures interfaces analysis, pipes,...).

1 INTRODUCTION

Parmi les essais les plus courants utilisés en géotechnique pour la reconnaissance des milieux granulaires, on peut citer les différents pénétromètres statiques ou dynamiques. Ces essais ont fait leur preuve, mais restent des essais aveugles au sens où il ne donnent que quelques indications sur le comportement mécanique du sol : q_c ou q_d , frottement latéral, pression interstitielle.

Récemment les techniques endoscopiques souvent issues de la recherche médicale et le traitement et l'analyse automatique des images ont fait des progrès considérables. Le présent article décrit l'application de ces techniques au sein du forage préalable et le couplage de ces données morphologiques avec les données mécaniques issues d'essais de pénétration dynamique.

2 TECHNIQUE UTILISEE

La technique mise en place s'appuie sur l'utilisation d'un endoscope souple de diamètre 8,6 mm inséré dans une cavité réalisée soit par forage (perforateur à main, tarière, ...), soit par un essai géotechnique (pénétromètre léger de type Panda par exemple (Gourves 1991)). La réalisation du pénétrogramme jusqu'à 5 à 6 m en profondeur, précédemment à l'acquisition d'images permet de récolter rapidement une information mécanique fiable et précise (une à deux prises de mesure par centimètre).

L'essai endoscopique permet l'enregistrement en continu d'images de 5 mm par 5 mm avec une résolution de 10 $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

La qualité de l'éclairage et de la prise d'images (netteté, profondeur de champ, grossissement) est très importante et est désormais bien maîtrisée.

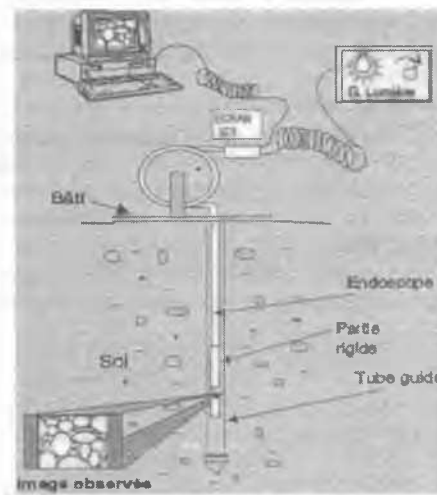


Figure 1. Le procédé de prise d'images

Avant toute analyse préalable, il est nécessaire d'éliminer tout ou partie des reflets parasites éventuels ainsi que les problèmes d'hétérogénéité d'éclairage. Cette étape est réalisée par l'utilisation d'outil de traitement d'images (filtrage, table de conversion,...) (Breul 1999).

La technique décrite ci-dessus ainsi que les différentes analyses est actuellement opérationnelle pour des milieux non saturés.

Une fois les images acquises et traitées, le travail consiste à extraire des informations pertinentes d'un point de vue géotechnique et à mettre en point des analyses automatiques permettant de donner des valeurs fiables des caractéristiques étudiées.

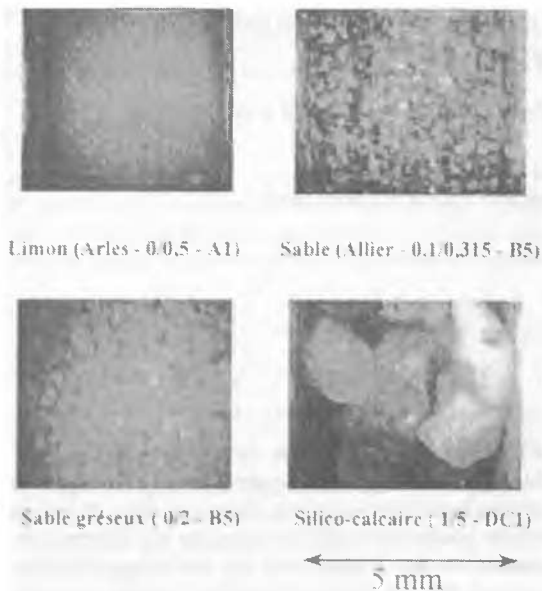


Figure 2. Exemples d'images obtenues.

Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à l'analyse de texture des images (paramètres M3, coefficient de variation et écart type), afin de reconnaître les matériaux fins ou très fins sur lesquels aucune analyse granulométrique n'est envisageable. Les autres caractéristiques étudiées sont premièrement la granulométrie pour les matériaux possédant moins de 12 % de particules inférieures à 80 µm et aucune particule de diamètre supérieur à 5 mm. Nous avons aussi effectué une analyse colorimétrique afin de différencier plusieurs matériaux en s'appuyant sur des critères de teinte, saturation ou intensité. Enfin nous nous sommes intéressés à l'analyse de la forme des particules.

A partir de l'analyse des images, des graphiques donnant l'évolution des différentes caractéristiques d'images pré-citées en fonction de la profondeur du sondage sont réalisés afin d'effectuer une analyse couplée des résultats mécaniques et morphologiques.

Nous allons maintenant présenter l'intérêt d'un tel couplage sur plusieurs cas concrets décrit dans la suite de cet article.

3 RECONNAISSANCE DES SOLS APPLIQUEES A L'ARCHEOLOGIE

La reconnaissance des sols appliquées à l'archéologie diffère sensiblement d'une reconnaissance géotechnique classique par la nature des problèmes posés. En plus de rechercher les différentes couches de terrain et les caractéristiques de celles-ci, les objectifs d'une reconnaissance archéologique sont les suivants: recherche du socle géologique, recherche de l'épaisseur du milieu anthropique.

L'intérêt de ce type de technique pour l'archéologie est d'avoir une méthode d'investigation rapide donc multipliable et surtout peu traumatisante.

Dans ce type d'étude, l'essai pénétrométrique permet une identification des différentes couches de terrain d'un point de vue mécanique (couche de remblais, couche de blocs, socle géologique,...) (cf. figure 3) en s'appuyant sur les valeurs de résistance de pointe q_d obtenues ainsi que sur la forme du signal.

L'essai endoscopique permet quant à lui l'identification des matériaux de chaque couche (matériau grenu/rocheux ou fin) selon la classification du Guide technique pour la réalisation des

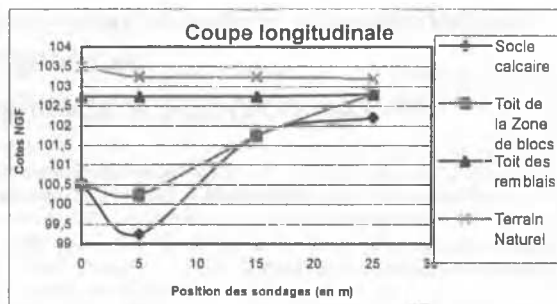


Figure 3. Délimitation des différentes couches de terrain à partir des essais pénétrométriques

remblais et des couches de formes (Guide pour les Terrassements Routiers) (SETRA 1992) et l'identification de zones intéressantes d'un point de vue archéologique (zone d'ossements, zone anthropique marquée par la présence de morceaux de briques, de mortier, de faïence, ...). Le couplage des deux essais permet donc une vérification des couches mise en évidence par chaque essai et une complémentarité permettant d'améliorer l'analyse du site

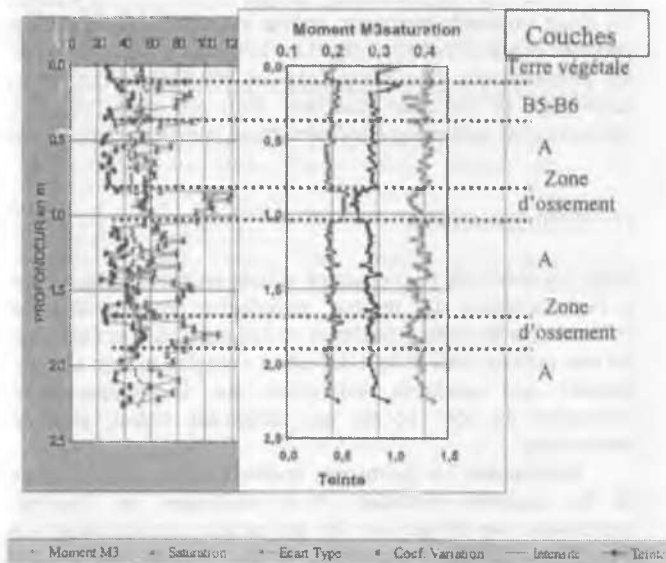


Figure 4. Résultat des analyses endoscopiques (caractérisation des matériaux selon la classification GTR et mise en évidence des zones particulières).

4 CONTROLE DE COMPACTAGE

A l'heure actuelle, en France les travaux de remblaiement de tranchée de réseau sec ou d'assainissement font l'objet d'un contrôle quasi-systématique de la qualité du compactage réalisé.

Si d'autres techniques existent (gammadensimètre notamment), l'utilisation des essais de pénétration dynamique est devenue majoritaire pour effectuer ce type de contrôle. Ils permettent à partir de la connaissance de la résistance de pointe du matériau de vérifier si le compactage du matériau correspond bien à la qualité requise (q_2 , q_3 ou q_4). En effet, une base de donnée regroupant pour chaque classe de matériau de la classification GTR, les résistances nécessaires à obtenir pour chaque qualité de compactage envisageable, a été mise en place. Ceci permet à condition de connaître la nature et la

classification du matériau de contrôler facilement la qualité du compactage (cf. figure 5).

C'est pourquoi dans ce genre d'application le couplage des essais de pénétration et de l'analyse endoscopique peut permettre d'effectuer un contrôle complet de l'ouvrage. L'analyse endoscopique permettant de retrouver la classification GTR du matériau ou de contrôler qu'il s'agit bien de tel ou tel matériau et l'essai de pénétration permettant de contrôler si ledit matériau a bien été mis en œuvre dans de bonnes conditions.

Une fois l'essai réalisé, et après avoir fourni les caractéristiques du remblai (épaisseur des couches, classification des matériaux et qualité de compactage demandée), deux droites (droite de référence et droite de refus) sont tracées sur le pénétrogramme permettant de vérifier immédiatement la qualité du compactage (figure 5) (Zhou 1997).

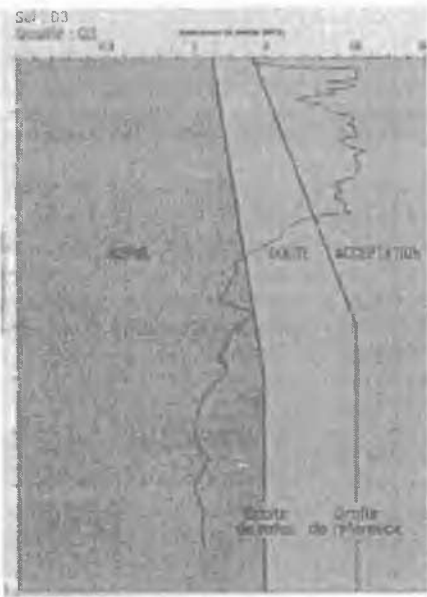


Figure 5. Exemple de résultat de contrôle de compactage au pénétromètre dynamique

L'intérêt du couplage de ces deux techniques est ici de pouvoir contrôler complètement un ouvrage en réception de manière non traumatisante.

5 ETUDE ET DIAGNOSTIC D'INTERFACE SOL/STRUCTURE

Dans de nombreux ouvrages, le problème de l'analyse de l'interface entre le sol et la structure et du diagnostic de cette structure au bout d'un certain nombre d'années d'utilisation est souvent rendu difficile par le fait qu'il n'existe pas ou peu de techniques permettant de sonder l'ouvrage en service et sans traumatisme important. A titre d'exemple on peut citer l'expertise sous dallage de sols industriels ou le diagnostic de collecteur visitables.

Sur ce type de problème les objectifs de l'étude sont de quantifier l'état de la structure (saine, fissuration,...), d'évaluer s'il y a contact entre la structure et le sol ou le matériau encaissant, enfin de caractériser les propriétés du milieu granulaire, du point de vue mécanique (résistance, portance,...) et physique (granulométrie, injectabilité,...).

L'intérêt de l'utilisation couplée dans ce cas là est multiple. Premièrement du fait du faible encombrement de ce type de matériel, il permet de réaliser des études dans des sites d'accès

difficile (canalisation visitables de largeur 900 mm par exemple cf. figure 5). Il permet ensuite un sondage sur les ouvrages en service sans entraver le fonctionnement de l'ouvrage pendant et après l'essai. Enfin, les sondages étant peu traumatisants et rapides (diamètre des forages de l'ordre de 2 cm sur des profondeurs allant jusqu'à 6 m), ceci permet de multiplier le nombre d'essais afin de mieux appréhender les problèmes de variabilité spatiale du milieu.



Figure 6. Exemple d'utilisation du matériel en situation réelle (en canalisation visitable et sur un sol industriel)

A partir des résultats des analyses des deux essais, il est possible de caractériser les propriétés morphologiques des matériaux de retrouver leur densité en place, d'identifier la présence éventuelle de vides ou de cavités.

A titre d'exemple, à partir des essais endoscopiques réalisés dans des éprouvettes de sable de Fontainebleau, on a retrouvé la distribution granulométrique du matériau par analyse d'image avec une bonne précision (cf. figure 7). Compte tenu de cette analyse, le matériau a pu être classé en D1 selon la classification GTR. De plus, la résistance moyenne obtenue par l'essai pénétrométrique sur cette éprouvette est de 1,3 MPa (cf. figure 8). Connaissant la classification du matériau, et la résistance moyenne de celui-ci, on est capable de retrouver la densité in situ du matériau grâce à la banque de donnée établie pour chaque classe de matériau.

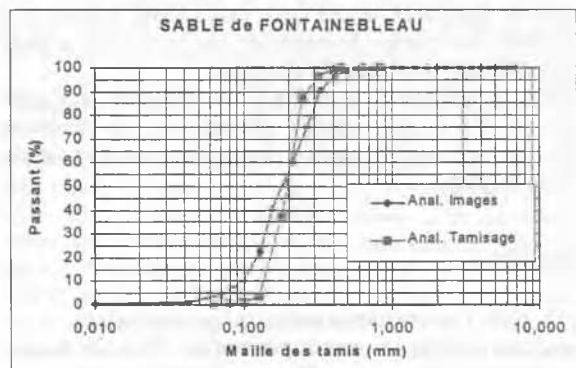


Figure 7. Comparaison des résultats d'analyse granulométrique obtenus par analyse d'images et par tamisage manuel.

La densité mesurée dans ce cas-là est de 1,462. Après analyse de l'éprouvette en laboratoire, la densité réelle mesurée est de 1,461. L'erreur commise est donc de 0,06%.

Mis à part la mesure de la densité in situ, à partir de l'analyse des essais, la présence de cavités au sein des matériaux sondés peut être analysée.

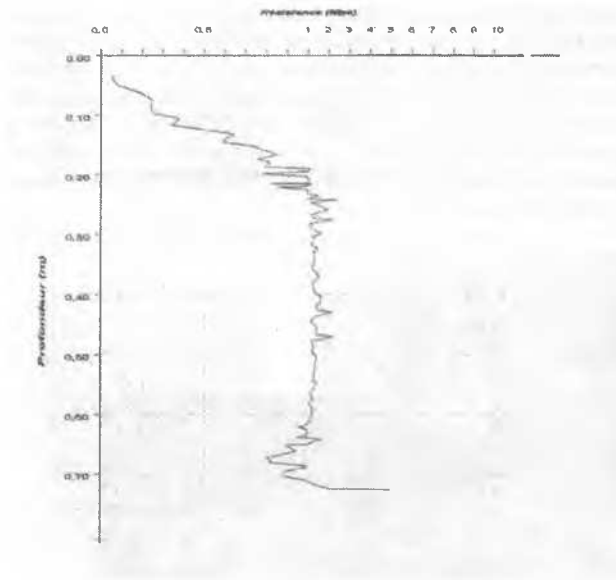


Figure 8. Résultat de l'essai pénétrométrique dans l'éprouvette de sable de Fontainebleau.

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a permis de montrer l'intérêt de la géoendoscopie dans la caractérisation des matériaux in situ. De plus, sur différents exemples concrets, l'apport du couplage des analyses issues des essais endoscopiques avec des données issues d'un essai mécanique (essai pénétrométrique par exemple) permet d'obtenir une information plus complète et précise du milieu in situ.

Afin d'élargir le domaine d'application de cette technique, il faudra adapter le procédé aux milieux saturés. De plus, d'autres paramètres tels que l'indice des vides, ou l'obtention de la granulométrie de matériaux plus grossiers seront étudiés pour extraire une information encore plus riche de cet essai. L'utilisation simultanée de ces deux essais devra à terme être couplée avec une mesure de teneur en eau in situ afin d'avoir une caractérisation complète des matériaux.

Enfin, en profitant de la possibilité de multiplier le nombre d'essais du fait de leur rapidité d'exécution, des méthodes d'analyse de la variabilité spatiale des milieux sondés pourront être mises en place.

REFERENCES

- Breul, P. 1999. Caractérisation endoscopique des milieux granulaires couplée à l'essai de pénétration. *Thèse de docteur-ingénieur de l'Université de Clermont-Ferrand*, pp280.
- Gourves R. 1991 Le PANDA: Pénétromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols. *Laboratoire LERMES, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand*.
- SETRA - LCPC GTR. 1992. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme (fascicules 1 et 2).
- Zhou S. 1997. Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type « PANDA », *Thèse de docteur de l'Université de Clermont-Ferrand*.