

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE PENETROMETRE TOUT STATIQUE A ASSISTANCE DYNAMIQUE® D'HYDROGEOTECHNIQUE.

EXPERIENCE FEEDBACK WITH THE HYDROGEOTECHNIQUE STATIC-DYNAMIC PENETROMETER

Jean-Baptiste GRESS¹, Laurent VENARD²

1 HYDROGEOTECHNIQUE, Fontaines, France

2 HYDROGEOTECHNIQUE, Fontaines, France

RÉSUMÉ — L'essai de pénétration statique est un des outils privilégiés d'une bonne reconnaissance des sols de fondation, par la mesure continue de la résistance de pointe et du frottement latéral sur manchon. La mesure idéale par la pointe électrique se heurte en France à la présence de niveaux rapidement compacts. Les pénétromètres statiques dynamiques actuels ne sont pas satisfaisants. Le pénétromètre présenté ici répond à cette attente, d'une investigation continue, profonde et de qualité, de paramètres statiques fiables.

ABSTRACT — The CPT test is a favoured tool of a good geotechnical investigation for foundation soils. It measures continuously the cone resistance and the side friction resistance along a friction sleeve. The ideal measurement with the electrical device is confronted in France to the presence, near from the soil surface, of compact levels. At present, dynamic static penetrometers are not satisfactory. The penetrometer presented here, give an answer to this waiting for continuous deep and of quality investigations.

1. Le point sur les pénétromètres statiques et statiques dynamiques existants

Le pénétromètre statique le plus pertinent actuel est celui qui utilise la pointe électrique (Sanglerat *et al.*, 2002) d'un train de tiges et tubes de 35,7 mm de diamètre, ce qui permet non seulement la mesure continue du terme de pointe q_c et du frottement latéral f_s sur manchon, mais également la mesure de la pression interstitielle u_2 . Ce pénétromètre présente en France l'inconvénient majeur d'être arrêté sur la première couche pour laquelle l'effort total d'enfoncement se révèle supérieur à 10 tonnes utile pour un porteur de 20 tonnes, soit des valeurs de q_c en général de 15 à 25 MPa, compte tenu de la fragilité et du coût de la pointe électrique.

Il est alors possible d'utiliser le train de tiges et tubes GOUDA avec une pointe mécanique simple ou une pointe combinée (Sanglerat, 1999) en utilisant la réaction utile de 10 tonnes du camion porteur ou par ancrage au sol.

La mesure des efforts n'est plus alors une mesure simultanée des efforts mais une mesure différée, avec suivant le schéma figure 1, pour une pointe combinée :

- un enfoncement en statique à 2 cm/s de la pointe seule, par le train de tiges central,
- puis, encore sur 4 cm de la pointe plus le manchon, toujours par le train de tiges,
- enfin, rattrapage de l'ensemble à la profondeur en général +10 ou +20 cm de la profondeur de départ en utilisant ici le train de tubes extérieurs. Ce train de mesures étant moins fragile, on peut traverser des sols présentant des q_c allant jusqu'à 35 MPa.

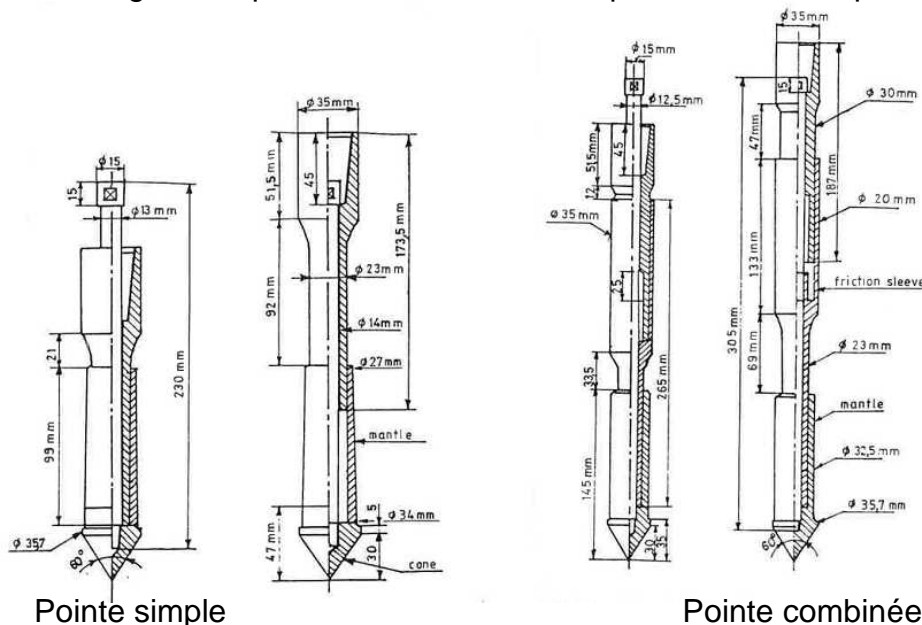


Figure n° 1 .

Un autre pénétromètre a été mis au point par ANDINA comportant, avec un principe d'enregistrement simultané des efforts, trois tubes et un train de tiges concentriques (Figure 2).

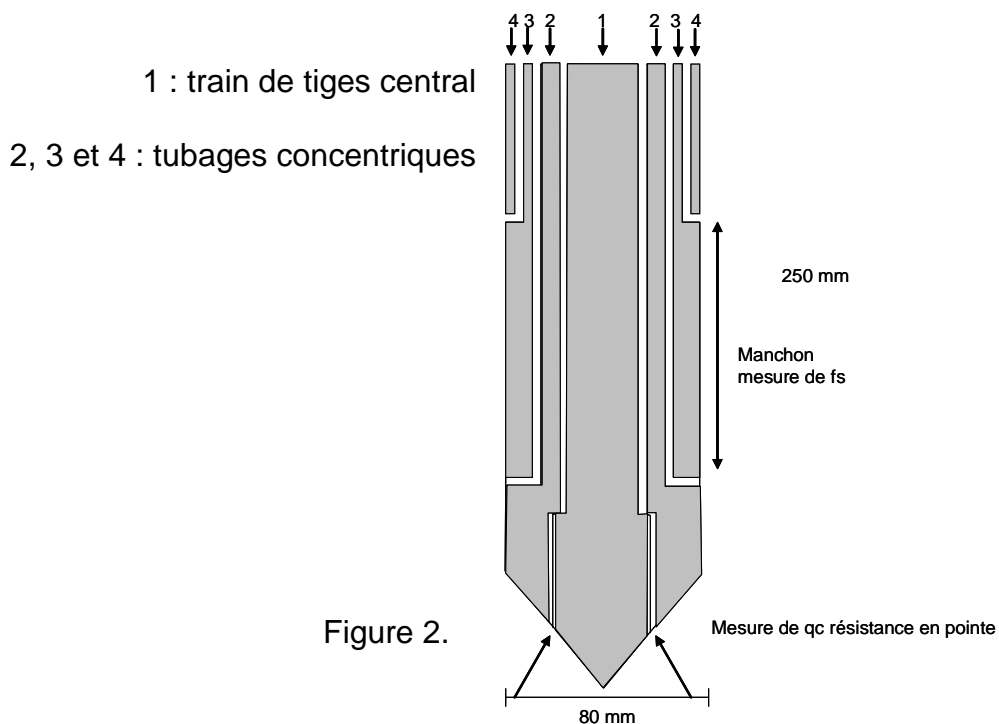


Figure 2.

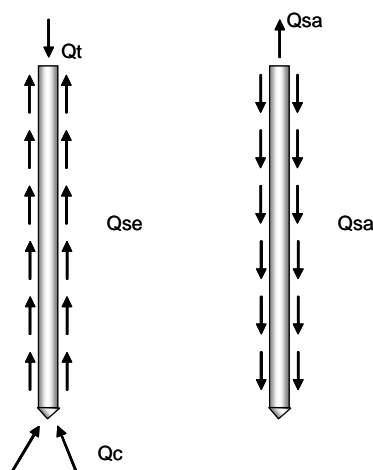
Les principes de travail sont :

- travail en statique sur les trois tubages et la tige centrale,
- au refus statique sur la grosse pointe, travail uniquement avec le train de tiges central. Il est alors mesuré sur un train de tiges, continu, sans débord :
 - l'effort total d'enfoncement Q_t ,
 - l'effort de frottement à l'arrachement par exemple tous les mètres Q_{sa} .

Il est fait l'hypothèse que ce frottement latéral à l'arrachement est égal au frottement latéral à l'enfoncement Q_{se} et la résistance de pointe est estimée par la relation :

$$q_c = \frac{Q_t - Q_{sa}}{s} \quad (1)$$

où s section de la pointe du train de tiges.



(1) enfouissement (2) arrachement

Figure 3 .

L'hypothèse $Q_{sa} = Q_{se}$ peut conduire à des erreurs importantes.

Il suffit d'écrire :

$$q_{c_{app}} = \frac{Q_t - Q_{sa}}{s} = q_{c_{eff}} + (q_{se} - q_{sa}) \frac{A}{s} \quad (2)$$

où :

$q_{c_{app}}$: résistance de pointe estimée,

q_{se} : frottement latéral à l'enfoncement,

$q_{c_{eff}}$: résistance de pointe effective,

q_{sa} : frottement latéral à l'arrachement,

A : section latérale du train de tiges.

pour montrer que l'erreur qui est faite en assimilant q_{sa} à q_{se} est amplifiée par le rapport A/s .

A 10 mètres de profondeur, ce rapport atteint $\frac{4000}{3.57} = 1\ 120$.

Une erreur de 5 kPa sur le frottement se traduit par une erreur sur la résistance en pointe de 5,6 MPa, ce qui est inadmissible.

Cette erreur est d'autant plus à craindre que le train de tiges est flexible et que sa trajectoire peut être courbe, ce qui amplifie l'écart entre Q_{se} et Q_{sa} .

Enfin, il peut être envisagé de passer en dynamique sur le train de tiges pour passer des zones très compactes, pour ensuite repasser en statique, mais avec l'inconvénient déjà développé, d'une évaluation peu fiable de q_c .

Le pénétromètre statique dynamique AMAPSOL (Sanglerat, 1999) a été conçu sur le même principe que l'ANDINA, l'effort dynamique n'étant pas donné par un mouton à chute libre mais par un marteau hydraulique.

Le passage en dynamique ne se fait que sur le train de tiges central et dans les passages alternant phases statiques et phases dynamiques, c'est bien toujours le train de tiges central qui est utilisé avec les difficultés déjà développées de l'estimation peu fiable de la résistance en pointe.

Après le développement du pénétromètre ANDINA, est apparu un pénétromètre développé par FONDASOL, lequel n'envisage plus que deux trains de tubes et un train de tiges, concentriques. Une goupille permet, par sa rupture en traction, de poursuivre avec le train de tiges central uniquement, quand on a le refus sur la grosse pointe. Evidemment avec le train de tiges central, nous sommes confrontés aux mêmes inconvénients qu'avec le pénétromètre ANDINA, quand on amalgame terme de pointe et frottement latéral, en faisant l'hypothèse que le frottement latéral à l'arrachement est le même que le frottement latéral à l'enfoncement.

Bien sûr tous les pénétromètres précités peuvent utiliser le train de mesure pointe électrique type GOUDA en utilisant le massif de réaction de leurs porteurs avec les difficultés de limite rapide de pénétration dans les sols français. Le pénétromètre tout statique à assistance dynamique, développé par HYDROGEOTECHNIQUE, cherche à augmenter cette puissance de pénétration, tout en mesurant toujours en statique la résistance de pointe et le frottement latéral sur manchon, dans les sols pouvant atteindre 90 MPa en résistance de pointe.

2. Principes du pénétromètre statique dynamique mis au point par HYDROGEOTECHNIQUE

Les principes de ce nouveau pénétromètre sont simples :

- utiliser un train de tiges et tubes type GOUDA, Figure 1, pointe combinée, en augmentant le diamètre du train de tubes qui passe à 45 mm et le train de tiges intérieur à 18 mm,
- enfoncer toujours en statique le train de tiges central,
- enfoncer en statique ou en dynamique le train de tubes extérieurs.

Les séquences de mesures comportent (Gress, 2011) :

- enfoncement tout statique comme le pénétromètre statique GOUDA,
- au refus statique sur le train de tubes extérieurs, alternance de séquences de mesures statiques du terme de pointe et du frottement sur manchon, la frappe dynamique permettant de mettre l'ensemble à la cote de la séquence de mesures suivantes :

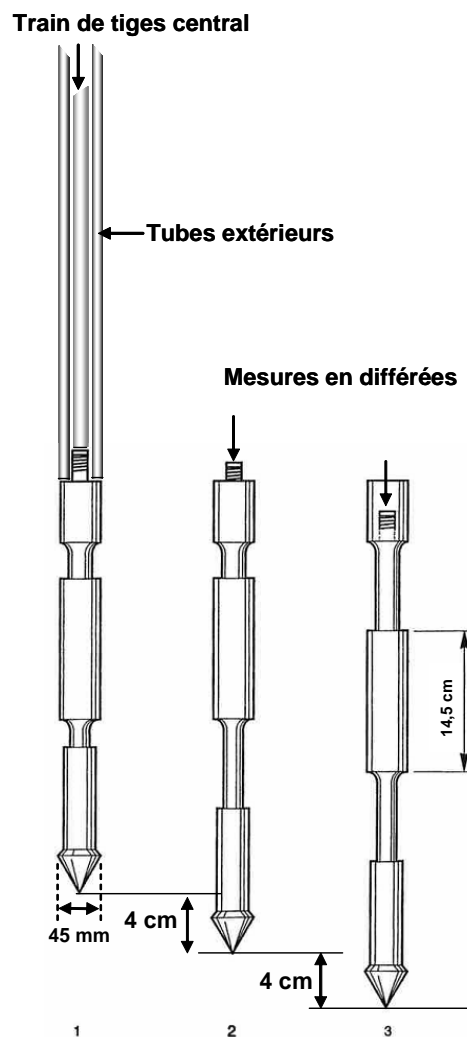


Figure 4 . Pénétromètre tout statique à assistance dynamique HYDROGÉOTECHNIQUE
pointe de 45 mm

3.1. Présentation de la première campagne d'investigations (Mission G11), la campagne est composée de :

- deux sondages pénétrométriques de type B suivant la norme NFP 94-115 descendus entre 9 et 10 m de profondeur,
- complétés par sept sondages de reconnaissances géologiques.

Tableau 1 . Les sondages permettent de retenir les caractéristiques suivantes :

Nature	Lithologie	Résistance dynamique de pointe qd (MPa)
Remblais : argile limoneuse à débris divers et mâchefer	Remblais (X)	Compacité hétérogène modeste à bonne $1,5 < qd < 12$ MPa
Argile limoneuse à sableuse marron verdâtre avec traces de matière organique	Alluvions (Fz)	Modeste compacité $1,5 < qd < 4,8$ MPa
Sables fins +/- limoneux	Alluvions (Fz)	Bonne compacité $3 < qd < 12$ MPa
Limons	Alluvions (Fz)	Modeste compacité $1,2 < qd < 6$ MPa

La comparaison des résultats des deux essais de pénétration avec la lithologie est représentée en Figure 6.

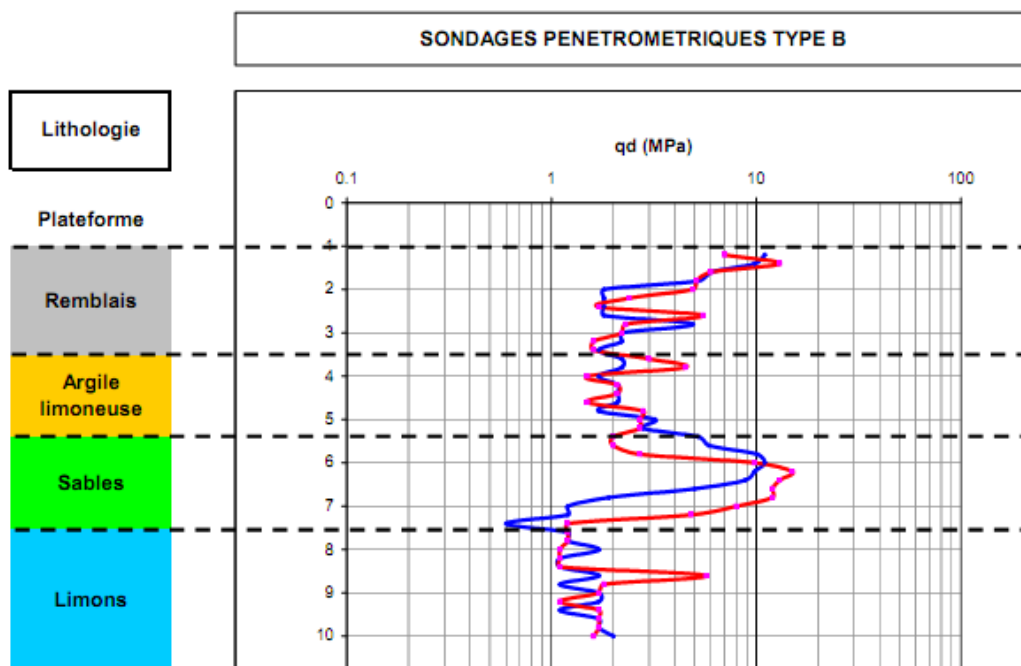


Figure 6 . Résultats des essais de pénétration dynamique PDB

3.2. Présentation de la deuxième campagne d'investigation (Mission G12) :

La campagne est composée de :

- deux sondages de reconnaissance géologique de type destructif en diamètre $\varnothing=64\text{mm}$ descendus à 17 m de profondeur, avec réalisation d'essais pressiométriques conformément à la norme NFP 94-110-1 suivant une maille de principe de 1,50 m,
- un sondage au pénétromètre statique pointe électrique réalisé suivant la norme NFP 94-113, descendu jusqu'à 12 m de profondeur, doublé d'un sondage réalisé en mode statique-dynamique et descendu à 23 m de profondeur.

La comparaison entre les résultats des deux essais de pénétration statique est figurée ci-après (Figure 7.). Le pénétromètre statique pointe électrique a obtenu le refus en tête des sables et graviers.

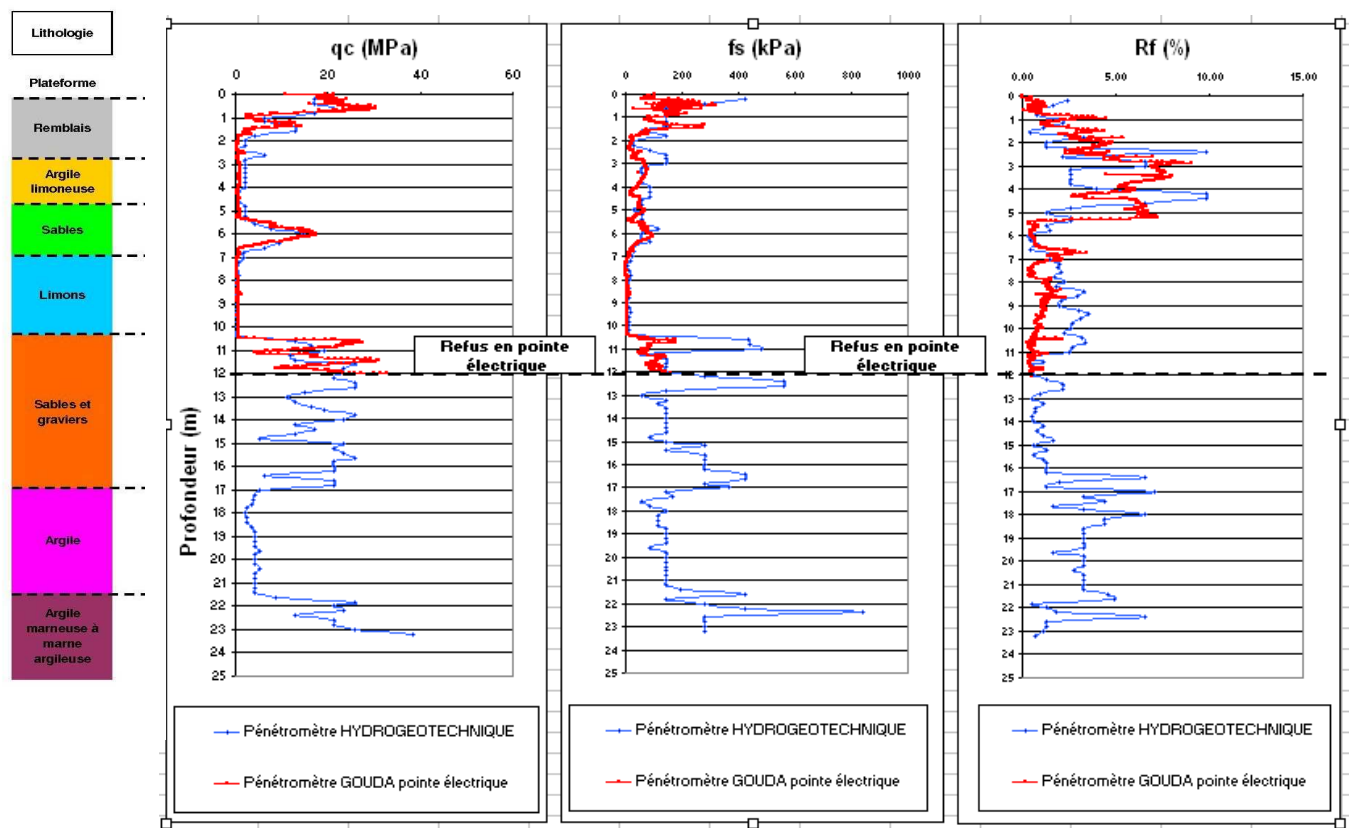


Figure 7 . Résultats des essais au pénétromètre statique pointe électrique et essais au pénétromètre stato-dynamique

Les résistances de pointe sont cohérentes. Les valeurs de q_c au pénétromètre pointe électrique apparaissent plus faibles :

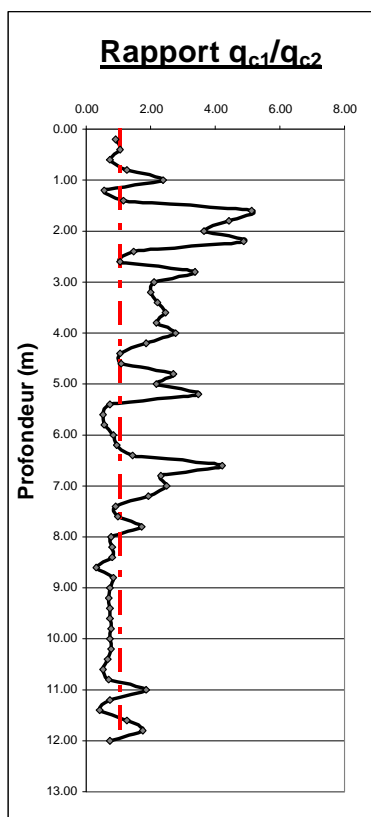


Figure 8 . Courbe présentant le ratio q_{c1} / q_{c2}

Les essais au pénétromètre dynamique marquent moins les caractéristiques faibles des limons qui apparaissent modestes en pénétration statique. Dans les argiles limoneuses et la base des remblais, on observe une meilleure concordance avec le pénétromètre pointe mécanique d'HYDROGÉOTECHNIQUE.

	q_d (MPa) pénétromètre dynamique PDB	q_c pointe électrique (MPa)	q_c GOUDA pénétromètre HYDROGÉOTECHNIQUE (MPa)
Remblai de tête de 1 à 2 m	6 à 12	2 à 13	3 à 15
Remblai de 2 à 3,50 m	1,6 à 5	0,4 à 2	0,8 à 7
Argile limoneuse	1,5 à 4,8	0,45 à 1,2	0,85 à 2,2
Sables	3 à 12	0,7 à 18	1,6 à 15
Limons	1,2 à 6	0,4 à 1,6	0,42 à 0,9

Tableau 2 . Comparaison avec les essais de pénétration dynamique

A noter que dans les premiers mètres les résultats de qc au pénétromètre HYDROGÉOTECHNIQUE, pointe GOUDA, collent mieux avec les valeurs de pl^* que la pointe électrique, des valeurs de pl^* de 0,31 à 0,51 MPa ayant été relevées.

	E (MPa)	Pl^* (MPa)	qc pointe électrique (MPa)	qc pointe Gouda HYDROGÉOTECHNIQUE (MPa)
Remblai de tête de 1 à 2 m	/	/	2 à 13	3 à 15
Remblai de 2 à 3,50 m	/	/	0,4 à 12	0,8 à 7
Argile limoneuse	5,7 – 9,5	0,31 – 0,51	0,45 à 1,2	0,85 à 2,2
Sables	34,8	0,81	0,7 à 18	1,6 à 15
Limons	4,8 – 7,6 – 10,7	0,51 – 0,40 – 0,39	1,6	0,42 à 0,9
Sables et graviers	21,5 – 17,4 – 33 – 26,1 – 41,9	1,99 – 1,68 – >3 - >3 - >3	4 à 35 puis refus	5 à 25
Argiles	20,7	1,55	/	2 à 5
Marnes	48,3 – 70,3	>3 - >3	/	12 à 40

Tableau 3 . Comparaison avec les résultats du forage pressiométrique le plus proche et les essais de pénétration statique

Les résultats du pressiomètre :

- sont cohérents avec les résultats du pénétromètre HYDROGÉOTECHNIQUE, les valeurs à la pointe électrique semblent sous-estimées,
- donnent des caractéristiques supérieures à ceux des deux pénétromètres dans les limons sous les sables,
- donnent des valeurs plutôt élevées par rapport aux valeurs de qc de 5 MPa du pénétromètre HYDROGÉOTECHNIQUE (qui seraient plutôt cohérents avec un pl^* de 0,9 MPa). Le pénétromètre révèle bien un niveau encore plus faible de 17 à 18,80m que le pressiomètre ne permet pas de caractériser,
- les résultats sont cohérents dans les marnes avec des pl^* de 1,8 à 4,8 MPa, avec des qc de 12 à 40 MPa.

3. Conclusions

L'essai au pénétromètre stato-dynamique HYDROGEOTECHNIQUE présente l'avantage de permettre la traversée de couches de compacité élevée par rapport au pénétromètre statique à pointe électrique limité à des sols fins et des sols grenus dont la dimension des éléments ne dépasse pas 20 mm. Les valeurs de résistance de pénétration du cône (q_c) obtenues par les deux méthodes sont relativement similaires.

Les essais effectués sur un site à CHALON-SUR-SAÔNE permettent également de comparer les mesures de la résistance de pénétration de pointe (q_c) avec les autres méthodes d'investigations couramment utilisées sur des projets de construction de bâtiments et d'ouvrages d'art et montrent aussi une bonne cohérence.

L'avantage du pénétromètre stato-dynamique est de mettre en évidence des successions lithologiques hétérogènes alternant des niveaux de modeste et de très bonne compacité. Cet outil étant intéressant en complément de l'investigation pressiométrique.

Références bibliographiques

Sanglerat G., Petitmaire M., Bardot F., Savasta P. (1989). Pénétration statique AMAP'Sols dans les graviers sableux denses, la molasse et les marnes compactes. Ed. Lunne T., Robertson P.K, Powell J.J.M. Cone penetration testing in geotechnical practice, SPON PRESS. Volume n° 87. P. 43-54.

Sanglerat G. (1999). The penetrometer and soil exploration. Revue Française de Géotechnique, n° 87, 2^{ème} Trimestre Second enlarged edition, Amsterdam, New York, Elsevier 1979. Elsevier 1979. P. 1-352.

Gress J.B. (2011). INPI, dépôt brevet n° 11/55252 du 16 juin 2011.