Essais en place dans l'argile des Flandres

J. NUYENS

Laboratoire Jacques
Verdeyen, Université
Libre de Bruxelles
50, av. F.D Roosevelt,
CPI 194/2,
B-1050 Bruxelles

Résumé

Les régressions et corrélations d'essais en place dans une argile ne peuvent être établies que moyennant une bonne connaissance des appareils, des techniques d'exécution et des hypothèses d'interprétation adoptés. Le type de cône et le mode de chargement dans le CPT, le mode de forage et le mode de calcul dans le MPM jouent un rôle non négligeable. La surconsolidation, le remaniement et la structuration sont également importants. On montre que si l'on tient compte de l'influence de tous ces facteurs, il est possible d'établir des lois de régression et des corrélations entre les paramètres, principalement q_c , p_i et E_m .

*résistance au cône, pression limite,
et module pressiométrique*

In situ tests in the Ypresian Clay

Abstract

Regression and correlations of in situ tests can only be established with a fair knowledge of the adopted equipments, techniques and interpretation hypotheses. The type of cone and the loading technique in the CPT, the boring method and the calculation method in the MPM have a considerable influence. Overconsolidation, disturbance and structuration are also important. It is shown that, if all these factors are taken into account, it is possible to establish regression laws and correlations between the parameters, mainly q_c , p_i and E_m .

Influence de la technique utilisée

L'établissement d'expressions analytiques des paramètres *in situ* d'un matériau naturel avec ses dispersions et hétérogénéités ainsi que des corrélations entre ces paramètres est une tâche ambitieuse qui doit être tempérée par la prudence et la modestie de l'ingénieur responsable. Il convient, en particulier, de ne pas oublier que les valeurs mesurées sont elles-mêmes entachées de tendances systématiques dues aux techniques utilisées ou aux méthodes d'interprétation.

1.1

CPT

1.1.1

Cône simple

Certains appareils CPT anciens étaient munis d'une pointe simple actionnée par une tige couissant dans un tube. De rares laboratoires continuent à utiliser la pointe M4 de la figure 1, qui présente l'avantage de ne pas introduire de résistance parasite. Par contre, l'enfoncement d'une telle pointe dans un sol granulaire dilatant est facilité par la zone de détente qui suit le cône. De plus, des problèmes d'introduction de grains entre la tige et l'écrou peuvent apparaître. Pour cette raison, l'usure de l'écrou est volontairement facilitée.

FIG. 1 Cône simple M4.
M4 simple cone.

1.1.2

Cône à manchon

La pointe mécanique la plus répandue à l'heure actuelle est la pointe hollandaise à manchon de type M1, plus connue sous le nom de pointe GOUDA (Fig. 2). Elle protège beaucoup mieux le mécanisme de coulissage mais, dans les sols cohérents, la résistance par adhésion du sol autour du manchon vient s'ajouter à la résistance au cône dont la valeur apparente est alors trop favorable.

FIG. 3 Pointe mécanique simple Andina.
Mechanical Andina tip.

1.1.3

Comparaison des résultats

La figure 4a montre un essai de pénétration effectué à l'aide d'une pointe de type M1 sur le site de l'hôpital universitaire Erasme, situé dans la commune d'Anderlecht. La figure 4b montre un essai de pénétration effectué avec une pointe Andina de 6 cm de diamètre, mais sans manchon, au voisinage de l'essai précédent.

FIG. 2 Cône à manchon M1.
M1 sleeve cone.

FIG. 4a, b, c, d Résistances q_c obtenues à Anderlecht avec trois types de pointes.
Results obtained in Anderlecht with three types of cones.

La figure 4c montre un essai de pénétration effectué dans la même commune avec une pointe M4. La superposition des trois diagrammes (Fig. 4d) montre que dans la partie argileuse du complexe de l'Yprésien, entre 20 et 26 m, la pointe M1 donne des résistances nettement plus élevées que celles obtenues à la pointe M4 et à la pointe Andina. Le rapport q_{cM1}/q_{cM4} s'élève jusqu'à 1,5. Théoriquement on a pour un manchon de 100 cm^2 :

$$\frac{q_{cM1}}{q_{cM4}} = \frac{9.c_u + (0 \text{ à } 10).c_u}{9.c_u} = 1 \text{ à } 1,9$$

Dans cette zone des diagrammes, les valeurs de q_c des pointes M1 et M4 sont respectivement de l'ordre de 4 et de 3 MPa.

1.1.3

Essais continus et discontinus

Un facteur intervenant aussi dans la comparaison entre essais est le mode d'enfoncement de la pointe. Heijnen (1972) a montré que les différences entre des essais effectués par les techniques respectives du chargement continu et du chargement discontinu, sont loin d'être négligeables. Les essais mécaniques sont de préférence discontinus, pour éviter le changement de signe du frottement entre les tiges actionnant la pointe et les tubes extérieurs. Au moment de la mesure de q_c , ces derniers sont immobiles, et la contrainte verticale q_0 à côté du cône peut raisonnablement être supposée égale à l'effet du poids de la colonne de terre. Au

contraire, l'essai mécanique est continu c'est-à-dire que les tubes extérieurs s'enfoncent en même temps que le cône et à la même vitesse que celui-ci. Il en résulte que, au moment de la mesure de q_c , q_0 est augmenté de l'effet de l'adhésion du sol sur les tubes agissant au-dessus du cône. Cet effet peut être important dans les argiles plastiques et, selon Heijnen, l'augmentation de q_c de l'essai continu, par rapport à la valeur « discontinue », peut atteindre 20 %.

1.2

MPM

1.2.1

Influence du mode de forage

Lors de nombreuses interventions publiques, Gambin rappelle que, dans sa définition d'origine, le MPM est un essai effectué dans un forage préalablement réalisé à la tarière à main avec ou sans boue de forage. En 1968 déjà, Jezequel *et al.* (1968) rappelaient les problèmes de mise en œuvre et leur influence sur les valeurs pressiométriques. Citons:

« Les qualités des parois du forage ont une influence prépondérante sur la valeur du module pressiométrique.

« Pour que ce module soit représentatif il faut, pour les sols mous:

– que les parois soient aussi intactes que possible;

- que le forage soit aussi bien calibré que possible ;
- que les fluides d'injections ne polluent pas le sol à éprouver.

« Dans les sols les plus mous (argiles molles, sables lâches) seule la tarière à main permet de remplir ces conditions en respectant certaines règles.

« Dans les sols meubles plus compacts, les forages par rotation mécanique conduisent à des résultats acceptables.

« Par contre le battage semble souvent donner des résultats défectueux. »

Compte tenu du caractère argileux du sol considéré, nous ne considérons pas ici la technique du tube fendu. Celui-ci ne satisfait pas au principe de détente préalable du sol.

La norme AFNOR P94-110 donne les techniques de forage recommandées et autorisées mais ne peut bien entendu donner d'appréciation sur la précision des résultats. L'observateur extérieur note cependant que les auteurs de ce document ont verrouillé le système d'interprétation en limitant le rapport p_f/p_i à la valeur 1,7 proposée en 1968 par Cassan (1968-1969). Remarquons en passant que cette décision prive l'auteur de projet d'un paramètre important qui est le rapport E_m/p_i selon la définition originale de p_i . Les autres corrélations faisant intervenir p_i sont également influencées.

Des recherches diverses, destinées à maîtriser l'influence de la technique de forage, ont été faites. Citons à titre d'exemple l'étude de Bru *et al.* (1972) réalisée dans des marnes et argiles raides à partir d'essais effectués dans les forages réalisés par les techniques suivantes :

- Forage en rotation avec fluide d'injection à l'eau claire ou à la bentonite ;
Outils utilisés : bicoûne ϕ 60 mm avec aléreur, carottier simple.
- Forage en percussion-rotation avec fluide d'injection à l'eau claire ;
Outil utilisé : taillant ϕ 64 mm.

Les pourcentages d'écart déterminés sur les moyennes des résultats de E_m , p_f , p_i et E_m/p_i , rapportées aux valeurs obtenues à partir de forages au bicoûne et à la boue sont représentés à la figure 5.

FIG. 5 Variation des caractéristiques pressiométriques d'une argile raide et d'une craie avec les techniques.

Variation of pressuremeter parameters of a stiff clay and a chalk with the boring techniques.

Les auteurs concluent que :

- pour ces types de sols, quel que soit l'outil de forage utilisé, les caractéristiques pressiométriques sont les mêmes à :
- 20 % près pour les modules pressiométriques,
- 10 % près pour les pressions limites,
- 10 % près pour les pressions de fluage,
- 15 % près pour les rapports E_m/p_i ,
- en général les forages réalisés au bicoûne-eau, carottier-eau et taillant-eau donnent des caractéristiques supérieures à celles données par les forages bicoûne-boue.

122

Surconsolidation

FIG. 6 Coupe de Bruxelles au Nord du Boulevard de Petite Ceinture.
Cross-section of Brussels North of the Small Belt.

FIG. 7 Coupe de Bruxelles au droit de la Gare du Midi.
Cross-section of Brussels at the South station.

Deux indices propres aux paramètres *in situ* permettent de déceler une surconsolidation éventuelle. Le premier résulte d'un raisonnement et s'applique aux paramètres dont on suppose qu'ils évoluent proportionnellement à la contrainte effective verticale. L'abscisse à l'origine d'une droite de régression serait l'indice d'une surconsolidation. Dans le cas de l'Yprésien, nous pensons plutôt à un phénomène de structuration (Mitchell, J.K., 1976; Kavvas et al., 1993).

Le second résulte de l'expérience et de l'observation. C'est la valeur du rapport E_m/p_r .

Les figures 6 et 7 représentent deux coupes géologiques établies à l'époque de la Seconde Guerre mondiale dans le service du professeur de Magnée et basées sur les sondages de référence de l'époque. La coupe de la figure 6 se situe au nord du boulevard de Petite Ceinture. La coupe de la figure 7 se situe au niveau de la gare du Midi.

Le site de l'hôpital universitaire Erasme situé à Anderlecht, se trouve un peu au sud de la coupe de la figure 7, dans laquelle on situe la vallée de la Senne. On constate que les couches qui n'existent plus dans la partie est ont été érodées. Le niveau des sables avant érosion se serait situé à une altitude de 150 à 200 m. Le complexe sablo-argileux de l'Yprésien a donc toutes les raisons d'être surconsolidé. La figure 8 montre les résultats d'un essai pressiométrique effectué au sud du site de l'hôpital. Alors que les essais de pénétration de la figure 4, effectués sur le même site, donnaient lieu à des diagrammes réguliers faisant tout au plus soupçonner la présence d'horizons plus ou moins sableux, le diagramme de la figure 7 fait apparaître sans équivoque une modification brutale du rapport E_m/p_r qui passe de 10 à 13, puis 16 et 19, montrant ainsi que la partie inférieure de l'Yprésien est surconsolidée. Selon les géologues, la consolidation normale de la couche supérieure serait due à un remaniement de cette formation provoqué par l'érosion.

1.3

PAF ou SBP

La recommandation du Comité technique régional européen n° 4, *Pressiomètres* prescrit :

« Les pressiomètres autoforateurs sont mis en place directement dans leur propre cavité et ce avec le minimum de remaniement du sol ou de la roche environnante. En théorie, la stabilité de la paroi de la cavité est assurée sous le champ des contraintes en place. La procédure correcte d'autoforage dépend de la nature du sol ou du rocher ; pour s'assurer d'une bonne réalisation, il est important d'avoir recours à des opérateurs expérimentés. L'obtention d'un remaniement minimum lors du forage dépend de la position de l'outil de coupe, de la pression de circulation du fluide et de la vitesse de pénétration, assurée par des vérins hydrauliques. La pression de boue doit être suffisamment faible pour éviter le claquage du sol, mais cependant élevée pour permettre l'évacuation des déblais au fur et à mesure que l'appareil est enfoncé dans le sol. [...] Le PAF peut être utilisé dans les sols ne contenant pas de particules de la taille d'une grave. On doit particulièrement prendre soin, lors d'essais dans du sable, d'éviter un éboulement du forage conduisant à la perte de la sonde. Le PAF est souvent utilisé conjointement avec une sondeuse traditionnelle qui assure la stabilité du forage et permet de s'affranchir des obstacles. »

2

Résultats

Afin de permettre de comparer aisément les résultats d'essais différents, ceux-ci ont été classés par région ou site. Les unités sont les m et les MPa.

FIG. 8 Essai pressiométrique à Anderlecht.
Pressurometer test at Anderlecht.

2.1

Région d'Ypres

L'argile yprésienne affleure dans cette région à laquelle elle doit la dénomination qu'on lui donne en Belgique. Elle est surconsolidée et fissurée. Les essais effectués ont été synthétisés par De Beer (1979) et comprennent l'étude de De Beer *et al.* (1971).

Dans l'étude de 1971, basée sur 8 CPT et 8 MPM, Van Wambeke avait montré que les diagrammes de q_c , p_f et p_l satisfaisaient aux équations de régression linéaire suivantes :

avec :

$$q_c(\text{MPa}) = 0,1475.z(m) + 0,578$$

$$p_f(\text{MPa}) = 0,0486.z(m) + 0,05$$

$$p_l(\text{MPa}) = 0,0486.z(m) + 0,3$$

et :

$$q_{c, \text{max. min}} = q_c \pm 0,25$$

$$p_{f, \text{max. min}} = p_f \pm 0,2$$

$$p_{l, \text{max. min}} = p_l \pm 0,2$$

$$p_{l, \text{moy}} = p_{f, \text{moy}} + 0,25$$

$$\frac{q_{c, \text{moy}} - 0,15}{p_{l, \text{moy}} - 0,15} = 3$$

$$\frac{q_{c, \text{moy}} - 0,225}{p_{f, \text{moy}} - 0,225} = 3$$

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.	Unit U & H
66	725	Résistance au cône C	0.0 21.0	0.00 4.00	1.0 2.0
66	612	Press limite de flua	0.0 21.0	0.00 1.53	1.0 2.0
66	730	Press limite (pressi	0.0 21.0	0.00 1.56	1.0 2.0

FIG. 9 Synthèse des essais d'Ypres (1971).
Synthesis of the tests at Ieper (1971).

FIG. 10 21 CPT du tracé Lys-Ypres.
21 CPT at the Ieper-Leie project.

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.		Unit U & H	
44	725	Résistance au cône C	-53.7-35.6	0.00	20.00	1.0	2.0
45	725	Résistance au cône C	-14.83.3	0.00	20.00	1.0	2.0
46	725	Résistance au cône C	-18.6-0.5	0.00	20.00	1.0	2.0
47	725	Résistance au cône C	-21.3-3.2	0.00	20.00	1.0	2.0
48	725	Résistance au cône C	-23.1-5.0	0.00	20.00	1.0	2.0
56	725	Résistance au cône C	-25.2-7.1	0.00	20.00	1.0	2.0
57	725	Résistance au cône C	-23.7-5.6	0.00	20.00	1.0	2.0
62	725	Résistance au cône C	-27.9-9.0	0.00	20.00	1.0	2.0

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.		Unit U & H	
49	725	Résistance au cône C	-30.9-8.3	0.00	25.00	1.0	2.0
50	725	Résistance au cône C	-31.8-9.1	0.00	25.00	1.0	2.0
51	725	Résistance au cône C	-23.8-1.2	0.00	25.00	1.0	2.0
52	725	Résistance au cône C	-28.6-6.0	0.00	25.00	1.0	2.0
53	725	Résistance au cône C	-35.2-12.6	0.00	25.00	1.0	2.0
54	725	Résistance au cône C	-44.1-21.4	0.00	25.00	1.0	2.0
55	725	Résistance au cône C	-52.3-29.6	0.00	25.00	1.0	2.0
65	725	Résistance au cône C	-21.52.1	0.00	25.00	1.0	2.0

FIG. 11

Valeurs de q_c du tracé Ypres-Lys, 1^{re} partie.
Values of q_c along the Ieper-Leie project, 1st part.

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.		Unit U & H	
58	725	Résistance au cône C	-54.3-33.2	0.00	20.48	1.0	2.0
59	725	Résistance au cône C	-48.1-27.0	0.00	20.48	1.0	2.0
60	725	Résistance au cône C	-39.5-18.4	0.00	20.48	1.0	2.0
61	725	Résistance au cône C	-31.6-10.5	0.00	20.48	1.0	2.0
63	725	Résistance au cône C	-24.2-3.1	0.00	20.48	1.0	2.0
64	725	Résistance au cône C	-24.6-2.5	0.00	20.48	1.0	2.0

FIG. 13

Valeurs de q_c du tracé Ypres-Lys, 3^e partie.
Values of q_c along the Ieper-Leie project, 3rd part.

FIG. 12

Valeurs de q_c du tracé Ypres-Lys, 2^e partie.
Values of q_c along the Ypres-Lys project, 2nd part.

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.	Unit U & H
73	725	Résistance au cône C	0.0 42.0	0.00 100.00	1.0 1.0
73	730	Press limite (pressi	0.0 42.0	0.00 10.00	1.0 1.0
73	802	Module Pressionétrie	0.0 42.0	0.00 100.00	1.0 1.0
73	1104	Em/pl	0.0 42.0	0.00 30.00	1.0 1.0
73	1105	qc/pl	0.0 42.0	0.00 10.00	1.0 1.0
73	1106	Em/qc	0.0 42.0	0.00 10.00	1.0 1.0

FIG. 14 Valeurs et corrélations relatives à Anderlecht.
Values and correlations in Anderlecht.

Il est à noter que les règles et corrélations trouvées ne tiennent pas compte du niveau du début des essais, tous effectués sur un terrain de 200 x 150 m, vraisemblablement au cône M4.

La moyenne de q_c calculée sur 20 CPT, effectués au cône M4 sur un tracé allant du canal Ypres-Yser, jusqu'à la Lys à Comines est donnée par :

$$q_c(\text{MPa}) = 0,1152.z(\text{m}) + 0,948$$

et donne donc une surconsolidation plus élevée et un gradient plus faible avec la profondeur.

$$q_c(\text{MPa}) = 0,0558.z(\text{m}) + 3,038$$

$$p_l(\text{MPa}) = 0,0175.z(\text{m}) + 1,028$$

$$\frac{Em}{p_l} = 12,4 \text{ à } 18$$

$$\frac{q_c}{p_l} = 2,8 \text{ à } 3,2$$

$$\frac{Em}{p_c} = 4,6 \text{ à } 5,7$$

2.2

Région de Bruxelles

Les essais pressiométriques à grande profondeur sont relativement rares dans la région bruxelloise. Ceux permettant l'établissement de corrélations avec le CPT le sont encore plus.

2.2.1

Anderlecht

Les mesures effectuées dans le site décrit en 1.1.3 et 1.2.2, permet de tirer les règles et corrélations suivantes (Fig. 14) calculées pour la couche située à une profondeur de 18 à 31 m.

2.3

TGV-Aa

Les essais de la vallée de l'Aa permettent la comparaison des résultats d'essais CPT et MPM dont nous disposons grâce à l'obligeance de la SNCF. La sensibilité de la pointe électrique met en évidence certaines particularités des diagrammes de q_c .

La figure 15 montre la coupe géotechnique du site. Reçue par l'auteur après les données numériques, elle explique la perplexité de celui-ci devant les comparaisons entre diagrammes CPT ou MPM, ces derniers étant vraisemblablement interprétés selon la norme AFNOR.

La figure 16, par exemple, donne des diagrammes de q_c relatifs à l'Yprésien, pour les cinq emplacements qui ont été communiqués.

La figure 17 donne les diagrammes de p_i pour les six emplacements qui ont été communiqués.

Ces deux figures posent le problème du degré de surconsolidation de l'argile dans ce site tourmenté. Elles semblent en effet indiquer que la surconsolidation des emplacements où l'argile remonte près de la surface, est plus élevée que celle des couches situées sous les alluvions. L'explication pourrait être semblable à celle relative à la vallée de la Senne, à savoir que, sous

Diag.	Code	Description	Niveaux		Valeurs min. & max.		Unit U & H	
8	725	Résistance au cône C	0.0	48.4	0.00	25.00	1.0	1.0
9	725	Résistance au cône C	0.0	48.4	0.00	25.00	1.0	1.0
10	725	Résistance au cône C	0.0	48.4	0.00	25.00	1.0	1.0
11	725	Résistance au cône C	0.0	48.4	0.00	25.00	1.0	1.0
12	725	Résistance au cône C	0.0	48.4	0.00	25.00	1.0	1.0

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.	Unit U & H
3	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0
4	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0
1	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0
2	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0
5	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0
6	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0
7	730	Press limite (pressi	0.0 49.0	0.00 4.50	1.0 1.0

FIG. 17 Six diagrammes MPM de la vallée de l'Aa.
MPM diagrams of the Aa valley.

FIG. 18 Droites moyennes de q_c des emplacements 9 et 10.
Regression lines of q_c of the 9 and 10 locations.

Les figures 19 et 20 donnent les comparaisons entre CPT et MPM de deux couples d'essais relativement proches.

A titre indicatif, on donne ci-dessous les paramètres m et b des équations des droites de la forme $x = m.z(m) + b$. On constate que les abscisses à l'origine des droites de régression sont proportionnellement plus élevées pour les essais 7 et 12 effectués là où l'argile

affleure sous les dépôts récents et n'a vraisemblablement pas été remaniée par l'érosion de la vallée.

Dans la comparaison finale des corrélations, il ne faudra pas oublier que les valeurs de p_i sont marquées par la limitation à $1,7p_i$ et donnent vraisemblablement des rapports de corrélations plus faibles ou plus élevés que les anciennes valeurs, selon qu'elles interviennent en numérateur ou en dénominateur.

FIG. 19 Comparaison entre CPT (10) et MPM (1).
Comparison between CPT (10) and MPM (1).

TABEAU I Paramètres m et b des droites de régression des essais CPT et MPM de l'Aa.

Essai	Paramètre	Couche	m	b
1	730_pl	ypr	0,04	0,28
1	802_Em	ypr	1	-9,43
10	725_qc	ypr1	0,22	-3,14
10	725_qc	ypr2	0,09	0
9	725_qc	ypr1	0,1	0
9	725_qc	ypr2	0,09	0
7	730_pl	ypr	0,06	0,63
7	802_Em	ypr	0,9	12,9
12	725_qc	ypr	0,01	3,1
12	101_FR	ypr	0,03	2,79
12	727_fs	ypr	0	0,08

Diag.	Code	Description	Niveaux	Valeurs min. & max.	Unit U & H
7	730	Press limite (pressi	0.0 32.0	0.00 7.00	1.0 1.0
7	802	Module Pressiométrique	0.0 32.0	0.00 70.00	1.0 1.0
12	725	Résistance au cône C	0.0 32.0	0.00 70.00	1.0 1.0
7	1104	Em/pl	0.0 32.0	0.00 50.00	1.0 1.0
12	101	Friction ratio	0.0 32.0	0.00 15.00	1.0 1.0
12	727	Frottement local	0.0 32.0	0.00 0.46	1.0 1.0

FIG. 20 Comparaison entre CPT (12) et MPM (7).
Comparison between CPT (12) et MPM (7).

2.4

Winnezele

La figure 21 représente les résultats ainsi que les corrélations d'un CPT et d'un MPM.

Les paramètres des droites de corrélation sont données au tableau ci-après.

D'autres corrélations établies par le LCPC sont représentées dans les figures suivantes.

TABEAU II Paramètres m et b des droites de régression des essais CPT et MPM de Winnezele.

Essai	Paramètre	Couche	m	b
34	725_qc	ypr	0,12	0,62
34	730_pl	ypr	0,06	0,27
34	802_Em	ypr	0,601	2,632
34	1104_Em/pl	ypr	0	10,2
34	1105_qc/pl	ypr	0	2,2
34	1106_Em/qc	ypr	0	4,7

Diag.	Code	Description	Niveaux		Valeurs min. & max.		Unit U & H	
34	725	Résistance au cône C	0.0	11.0	0.00	12.00	1.0	1.0
34	730	Press limite (pressi	0.0	11.0	0.00	1.20	1.0	1.0
34	802	Module Pressiométric	0.0	11.0	0.00	12.00	1.0	1.0
34	1104	Em/pl	0.0	11.0	0.00	20.00	1.0	1.0
34	1105	qc/pl	0.0	11.0	0.00	3.00	1.0	1.0
34	1106	Em/qc	0.0	11.0	0.00	10.00	1.0	1.0

FIG. 21 CPT et MPM à Winnezele.
CPT and MPM at Winnezele.

FIG. 22 Corrélation $G_{p2}-G_{p5}$.
 $G_{p2}-G_{p5}$ correlation.

FIG. 23 Corrélation $\beta_{2\%}-\beta_{5\%}$.
 $\beta_{2\%}-\beta_{5\%}$ correlation.

FIG. 94 Corrélation G_{p2} - G_2 - G_f .
 G_{p2} - G_2 - G_f correlation.

FIG. 25 Corrélation G_{p2} - G_{p0} .
 G_{p2} - G_{p0} correlation.

FIG. 96 Corrélation q_c - p_{20} .
 q_c - p_{20} correlation.

FIG. 27 Corrélation G_{p2} - G_m .
 G_{p2} - G_m correlation.

FIG. 98 Corrélation p_f - p_{20} .
 p_f - p_{20} correlation.

Synthèse

Le tableau suivant rassemble les régressions présentées ci-dessus.

Essai	Site	Param.	m	b
12	Aa	101_FR	0,0286	2,7857
34	Winnezele	1104_Em/pl	0	10,2
34	Winnezele	1105_qc/pl	0	2,201
34	Winnezele	1106_Em/qc	0	4,7
66	Ypres	612_pf	0,0486	0,05
9	Aa	725_qc	0,1034	-0,002
9	Aa	725_qc	0,0895	0,0009
10	Aa	725_qc	0,216	-3,1448
10	Aa	725_qc	0,0906	-0,0016
12	Aa	725_qc	0,0128	3,1019
34	Winnezele	725_qc	0,12	0,619
66	Ypres	725_qc	0,1475	0,578
73	Anderlecht	725_qc	0,0558	3,038
45_65	Ypres (20ess.)	725_qc	0,1152	0,948
12	Aa	727_fs	0,0018	0,0819
1	Aa	730_pl	0,0367	0,2781
7	Aa	730_pl	0,0583	0,626
34	Winnezele	730_pl	0,0564	0,271
66	Ypres	730_pl	0,0486	0,3
73	Anderlecht	730_pl	0,0175	1,028
1	Aa	802_Em	0,9978	-9,4275
7	Aa	802_Em	0,9	12,9
34	Winnezele	802_Em	0,6009	2,632

Si l'on regroupe les résultats d'essais respectivement sur couches superficielles et profondes, on obtient les moyennes pondérées suivantes, basées sur un nombre réduit de résultats, il ne faut pas l'oublier.

m_qc_prof	b_qc_prof
0,0786	1,0125
m_qc_sup	b_qc_sup
0,1124	1,0113

m_pl_prof	b_pl_prof
0,0271	0,653
m_pl_sup	b_pl_sup
0,0544	0,399

Avec les mêmes réserves, les corrélations entre paramètres peuvent donc être résumées comme suit :

• Ypres :

$$\frac{q_{c, moy} - 0,15}{p_{l, moy} - 0,15} = 3$$

$$\frac{q_{c, moy} - 0,225}{p_{f, moy} - 0,225} = 3$$

• Anderlecht :

$$\frac{Em}{p_l} = 12,4 \text{ à } 18$$

$$\frac{q_c}{p_l} = 2,8 \text{ à } 3,2$$

$$\frac{Em}{q_c} = 4,6 \text{ à } 5,7$$

• Winnezele :

$$\frac{Em}{p_l} = 10,2$$

$$\frac{q_c}{p_l} = 2,2$$

$$\frac{Em}{q_c} = 4,7$$

Les essais pressiométriques de l'Aa, très récents, donnent vraisemblablement des valeurs relativement plus faibles de p_l et on a donc pour l'Aa, en profondeur :

$$\frac{Em}{p_l} = 14 \text{ à } 25$$

$$\frac{q_c}{p_l} = 2,08$$

$$\frac{Em}{q_c} = 6,6 \text{ à } 8,5$$

et pour l'Aa, en surface :

$$\frac{Em}{p_l} = 17$$

$$\frac{q_c}{p_l} = 3,6$$

$$\frac{Em}{q_c} = 5,2$$

Il est difficile d'extraire des régressions qui précèdent, des lois suffisamment générales pour exprimer les paramètres en fonction de z , en particulier en ce qui concerne E_m . Par contre, les corrélations entre paramètres obtenus au CPT et /ou au MPM, aux mêmes emplacements, sont cohérentes.

La présente étude a été menée avec l'objectif de présenter rapidement des résultats à la journée franco-belge d'étude de l'argile des Flandres. Elle n'est donc qu'une ébauche qui pourrait être étendue ultérieurement à des centaines de résultats non encore exploités. Lors d'une telle étude, il conviendrait cependant, lors de chaque présentation de résultats, de préciser les instruments, les techniques d'exécution et les hypothèses de calcul adoptés.

- Bru J.-P., Espagnet J.-C. (1972) – Étude de la mise en œuvre du pressiomètre dans les argiles et marnes raides. Méthodes de forage, GEESEP Mécanique des sols, Fiche programme 05/11/1, Ministère de l'Équipement, CETE de Bordeaux.
- Cassan M. (1968-1969) – Les essais *in situ* en mécanique des sols, construction t. XXIII n° 10, oct. 1968, t. XXIV n° 5, mai 1969 et n° 7-8, juil.-août 1969.
- CTRE N° 4 (1989) – Utilisation des résultats des essais pressiométriques pour le dimensionnement des fondations en Europe, Balkema, Rotterdam.
- De Beer E. (1979) – Historiek van het kanaal Leie-Ieper. Eigenschappen en gedragingen van de Ieperiaanse klei, Tijdschrift der Openbare Werken van Belgie, n° 4, 5, 6, Brussel.
- De Beer E., Van Wambeke A., Vandepitte D. (1971) – Détermination des propriétés mécaniques des sols *in situ*, Rapport au FNRS, Bruxelles.
- Heijnen W.J. (1972) – De vorm van de elektrische sondeerconus, Verhandelingen Fugro, Sondeersymposium, Leidschendam, 17-27.
- Jezequel J., Lemasson H., Touze J. (1968) – Le pressiomètre Louis Ménard. Quelques problèmes de mise en œuvre et leur influence sur les valeurs pressiométriques, *Bull. Liais. Labor. P. et Ch.* n° 32, juin-juil. 1968, réf. 537.
- Kavvas M., Anagnostopoulos A., Kalteziotis N. (1993) – A framework for the mechanical behaviour of the cemented Corinth Marl, *Geotechnical Engineering of Hard Soils, Soft Rocks*, Balkema, Rotterdam, pp. 577-583.
- Mitchell J.K. (1976) – *Fundamentals of Soil Behaviour*, J. Wiley, New York.