

Application et validation d'abaque pour la classification des sols à partir des résultats pressiométriques

Application and Validation of Soil Behavior Classification Chart Based on Pressuremeter Test Results

P. Reiffsteck, A. Martin & T. Perini
Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ : Les nouvelles normes françaises (NF 94-261 et NF 94-262) pour le dimensionnement des fondations superficielles et profondes dans le cadre de l'Eurocode 7, proposent d'utiliser un abaque de classification basé sur les résultats des essais pressiométriques : pression limite et module Ménard. A l'instar de la classification des sols développée à partir des résultats des essais de pénétration statique, cet outil définit des classes de sol dans un plan construit à partir de la pression limite normalisée et du rapport module sur pression limite. Cette communication présente l'application pratique de cet abaque à la classification des sols sur un projet d'infrastructure. Une base de données importante de résultats d'essais pressiométriques a été collectée lors des reconnaissances en phase de conception pour la quatorzième ligne de métropolitain de l'agglomération parisienne. Cette base de données contient, outre les résultats des essais pressiométriques, la caractérisation physique et mécanique obtenue à partir des prélèvements par carottage. La validation par ce croisement de données permet de conclure sur la fidélité de cet abaque et propose quelques conseils pour son utilisation pratique. Une version plus élaborée tenant compte de l'état initial du sol, dont on sait l'importance est également soumise à validation.

ABSTRACT : The new French Standards (NF 94-261 and NF 94-262) on the design of shallow and deep foundations in the framework of Eurocode 7, propose to use a soil profiling chart based on pressuremeter tests results: limit pressure and Ménard modulus. Like the soil behavior classes developed from the results of cone penetration tests, this tool defined soil classes, in a plane constructed with the normalized limit pressure versus the ratio between the Ménard modulus and the limit pressure. This paper presents the practical application of this soils classification chart on an infrastructure project. A large database of pressuremeter test results was collected during site investigation performed for the preliminary and detailed project stages for the fourteenth metropolitan line of Paris area. This database contains, in addition to the results of pressuremeter tests, physical and mechanical characterization obtained from sampling by core drilling. This paper concludes on the reliability of this chart and proposes some advices for its practical use. A newer version taking into account initial state of the ground is also tested.

KEYWORDS : pressuremeter, soil classification

MOTS CLES : pressiomètre, classification des sols

1 INTRODUCTION.

A l'heure actuelle, il existe peu de littérature décrivant des tentatives de classification des sols avec les résultats des essais au pressiomètre Ménard (PMT). On peut citer la classification proposée par le fascicule 62 titre V pour déterminer l'état de compacité des sols selon les valeurs de la pression limite et de la résistance de pointe (MELT, 1993).

Cette classification est issue des propositions faites par Ménard de définir par le rapport E_M/p_{LM} sans dimension, le type de comportement du sol, mis en relation avec le coefficient rhéologique α , tel que $\alpha^2 = E_M/E_a$. Des valeurs seuils aident à la décision sur la valeur de α en fonction du rapport E_M/p_{LM} et de la nature du sol (Ménard et Rousseau, 1962). On notera que d'autres formulations ont pu être proposées pour ce coefficient par la suite. La gamme des valeurs que peut prendre le rapport E_M/p_{LM} pour des essais pressiométriques courants est relativement limitée : les valeurs extrêmes du tableau original

de Ménard vont de 6 (sables et graviers normalement consolidés) à 16 (argile surconsolidée). Jusqu'à ce jour, aucune méthode de détermination plus précise de α n'a été proposée.

Le diagramme bi-logarithmique proposé par Baud semble prometteur. Il s'agit d'une première tentative qui présente un potentiel comparable à celui des analyses de Robertson sur les résultats du pénétromètre statique (CPT) (Robertson, 1990 ; Baud, 2005).

L'élaboration d'une telle classification représente un grand enjeu pour la méthode « française » de dimensionnement des fondations qui a donc repris, dans la dernière version de la norme de dimensionnement des fondations, cette proposition (AFNOR, 2012 et 2013).

Cette communication présente dans une première partie la validation de ce diagramme sur une base de données compilant les résultats issus de sites expérimentaux bien documentés puis l'application pratique à la classification des sols sur un projet d'infrastructure. Une base de données importante de résultats d'essais pressiométriques a été collectée lors des reconnaissances en phase d'avant projet détaillé et sommaire

pour la quatorzième ligne de métropolitain de l'agglomération parisienne.

1.1 Validation sur une base de données

Nous avons représentés sur les figures 1 et 2, les deux versions du diagramme dit Pressiorama, proposé par Baud (2005), complétées avec les jeux de données de sites expérimentaux dont les essais PMT, CPT, SPT, FVT sont de qualité mais ne présentant pas tous une unité de situation géographique, de profondeur et de formation géologique. Ces jeux de données sont indépendants de ceux utilisés par Baud pour construire ce diagramme. Ces données (423 valeurs) proviennent de vingt-quatre sites ayant servi pour des essais de fondations superficielles, profondes et de remblais sur sols compressibles et couvrent l'ensemble des sols des argiles aux graves (Reiffsteck, 2012). Leur classification a été réalisée à partir des descriptions des sols prélevés par carottage et par essais de laboratoire.

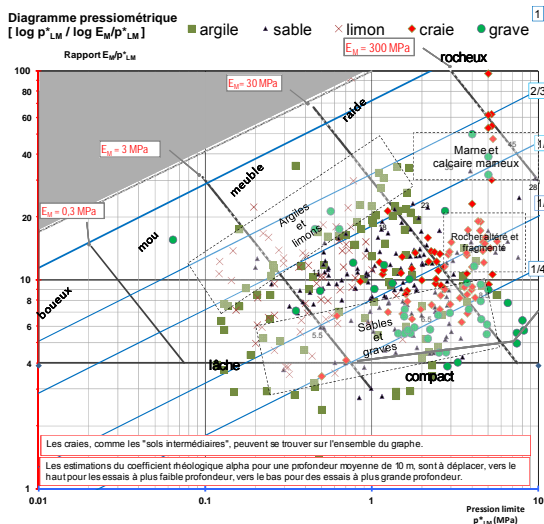


Figure 1. Jeu de données dans le Pressiorama d'après Baud (2005)

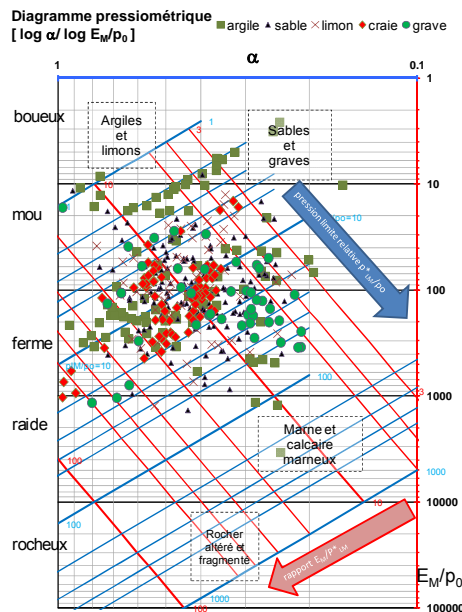


Figure 2. Jeu de données dans le Pressiorama v2 d'après Baud et Gambin (2013)

1.2 Discussion

Le premier constat est que les nuages ne semblent pas suffisamment disjoints pour que ces représentations puissent discriminer les classes de sol. En particulier, la série des argiles plus sensible à la réalisation du forage même soignée se positionne mal. On remarquera que, dans le premier abaque présenté, la pression limite est donnée en fonction de l'inverse de sa propre valeur et dans le second le module normalisé est mis en correspondance avec une fonction non linéaire de ce module. Relation proposée par Baud et Gambin (2013) pour exprimer α en fonction de E_M , p_{LM}^* et p_0 :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{E_M}{p_{LM}^*} \right)^{\frac{1}{n}}}{k \cdot \left(\frac{p_{LM}^*}{p_0} \right)^{\frac{m}{n}}} \quad (1)$$

avec $k = 4$, $m = 0,5$ et $n = 2$.

Cela génère une distorsion des données qui dans un plan à échelles arithmétiques donne une forme naturellement hyperbolique. Leur auteur résout cette difficulté d'écrasement par l'utilisation d'un plan à échelles logarithmiques. De plus, ces représentations enfreignent la règle selon laquelle les variables dépendantes et indépendantes doivent être rigoureusement séparées.

1.3 Comparaison avec les prédictions de l'abaque de Robertson

Afin de juger des mérites respectifs des méthodes de classification introduites dans les nouvelles normes pour les fondations, nous avons testé l'abaque de Robertson sur notre jeu de données.

Les figures 3 et 4 montrent que le jeu de données présente des relations claires entre les résultats issus des essais d'expansion avec le pressiomètre Ménard et les essais de pénétration au cône permettant de valider la cohérence des données. La relation est plus claire entre la résistance à la pénétration $q_c - q_0$ et la pression limite $p_{LM} - p_0$ qu'avec le module pressiométrique E_M du fait de l'analogie entre la pénétration du cône du pénétromètre et du refoulement du sol qui en découle et l'action de l'expansion de la sonde pressiométrique dans le forage.

Pour les graviers, on observe sur les figures 3 et 4, dans la relation avec la pression limite et le module pressiométrique, la présence d'un deuxième pic dû à l'influence de la compacité avec une influence prépondérante du mode de mise en œuvre de la sonde (modification de compacité due au forage) et la capacité à le mesurer.

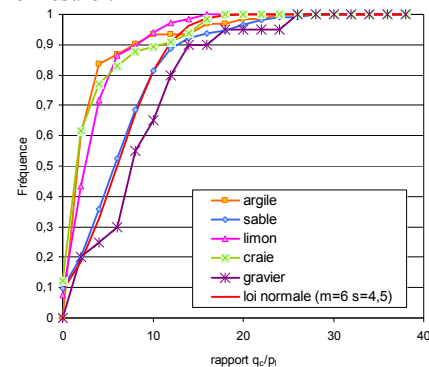


Figure 3. Courbes de répartition des rapports résistance de pointe sur pression limite

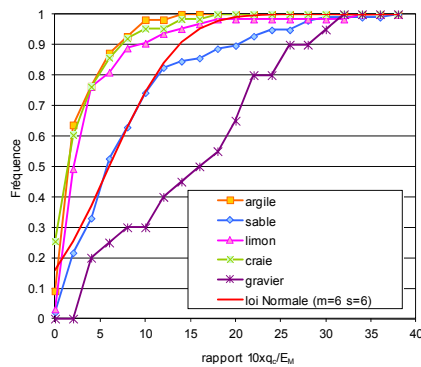


Figure 4. Courbe de répartition des rapports résistance de pointe sur module pressiométrique

L'abaque intégré à la norme NF P94-262 est celui proposé par Robertson (1990) traçant une "résistance au cône normalisée", Q_t , en fonction d'un "rapport de frottement normalisé", F_r (Figure 5).

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma'_v} \quad (2)$$

Où $q_t = q_c + (1-a) \cdot u_2$ et

$$F_r = \left[\frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \right] \cdot 100\% \quad (3)$$

Avec les zones :

1. sols granulaires fins sensibles ;
2. sol organique et tourbe ;
3. argile [argile limoneuse à argile] ;
4. limon hétérogène [argile limoneuse à limon argileux] ;
5. sable hétérogène [limon sableux et sable limoneux] ;
6. sable [sable limoneux à sable propre] ;
7. sable à sable graveleux ;
8. sable à sable argileux à sable « très raide » ;
9. sol granulaire fin très raide, sol cimenté ou surconsolidé.

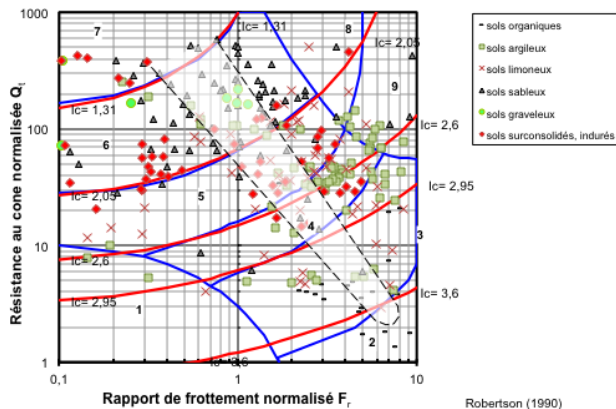


Figure 5. Abaque de Robertson avec les jeux de données des sites utilisés au §1.1 (Robertson, 1990)

Cet abaque intègre l'indice I_c proposé par Jefferies et Been (2006), permettant d'approcher les frontières des zones par des arcs de cercle d'équation (4).

$$I_c = \left[(3,47 - \log(Q_t))^2 + (1,22 + \log(F_r))^2 \right]^{0,5} \quad (4)$$

La frontière séparant le comportement argileux du comportement sableux est ainsi donnée pour $I_c = 2,6$.

La comparaison des valeurs obtenues sur les sites expérimentaux utilisés dans le paragraphe 1.1 avec l'abaque de Robertson de classification des sols montre toute la difficulté qu'il y a à classer précisément les sols avec ces outils. Toutefois,

les nuages de points se localisent assez fidèlement sur les grandes zones de ces classifications (Figure 5). On retrouve un bon placement des sols organiques et sableux. Cependant les sols intermédiaires sont plus dispersés. De même, la craie ou la marne distinguées dans les classifications usuelles pour les fondations et représentées ici comme sols indurés cimentés se positionnent assez difficilement. Leur comportement allant des sols granulaires aux sols cohérents. Ce constat est somme toute logique, ces matériaux représentant les limites de l'application de cet essai. Pour les sols argileux, subsiste la méconnaissance de la pression interstitielle limitant la précision (correction de la surface et surpression dans les sols fins).

On rappelle que les données des sites ont été acquises avec soin et les classements sont obtenus à partir de sondages carottés mais les pénétromètres utilisés ne disposaient pas toujours de la mesure de la pression interstitielle. Cette impossibilité de calculer q_t nuit à la qualité de la prédiction surtout pour les argiles molles qui génèrent des surpressions importantes.

2 TEST SUR UN GRAND PROJET

Une base de données importante de résultats d'essais pressiométriques a été collectée lors des reconnaissances en phase de conception pour la quatorzième ligne de métropolitain de l'agglomération parisienne. Cette base de données contient, outre les résultats des essais pressiométriques, la caractérisation physique et mécanique obtenue à partir des prélèvements par carottage. Les formations géologiques présentes sous les remblais au droit du projet sont les suivantes (de haut en bas dans la série) :

- Marnes Infra Gypseuses : au droit des sondages carottés, cette formation a été mise en évidence sous la forme de sable argilo-marneux, et de marne beige blanche, généralement sableuse, ponctuellement pourvue de blocs calcaires.
- Sables de Monceau : ils ont été mis en évidence sous la forme de sable vert et de marne sableuse verte.
- Calcaire de Saint Ouen ; cet horizon comporte une proportion de marnes blanches rosées assez importante, entre 35 et 60 % de la formation en fonction des sondages carottés, avec en moyenne 50% et une plasticité très importante (I_p jusqu'à 90% et pour w_L 180%) ; une transition vers une marne à rognons et blocs de calcaire lorsqu'on se rapproche de la base de la formation ; un passage calcaire (soit blocs de calcaire voire calcaire franc, soit blocs de calcaire à matrice marneuse), d'épaisseur comprise entre 1 et 1,5 m, qui correspond vraisemblablement aux horizons de Ducy et de Mortefontaine.
- Sables de Beauchamp ; ils sont constitués majoritairement de sables fins beige/vert peu à pas argileux, puis gris vert peu à moyennement argileux (en général $\% < 80\mu m$ de 10 à 30% pour la partie supérieur, 30 à 50 % en partie inférieur et pour le médian 50 et 70%), dans lesquels quelques niveaux de blocs / bancs de grès d'épaisseur localement importante ont été mis en évidence.
- Marnes et Caillasses ; alternance de niveaux marneux blanc / beige, régulièrement pourvus de graviers calcaires, et de niveaux de blocs et de bancs calcaires (supérieures décomprimées par dissolution de gypse et inférieures plus saines).
- Calcaire Grossier, d'une densité et une résistance à la compression assez variable, ce banc varie de coquillier, à un

calcaire de patine claire, compact à plus ou moins fossilifère et plus tendre.

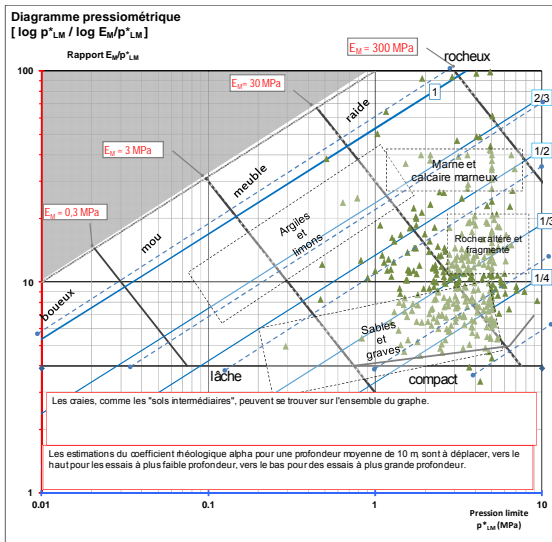


Figure 6. Données des calcaires de Saint-Ouen

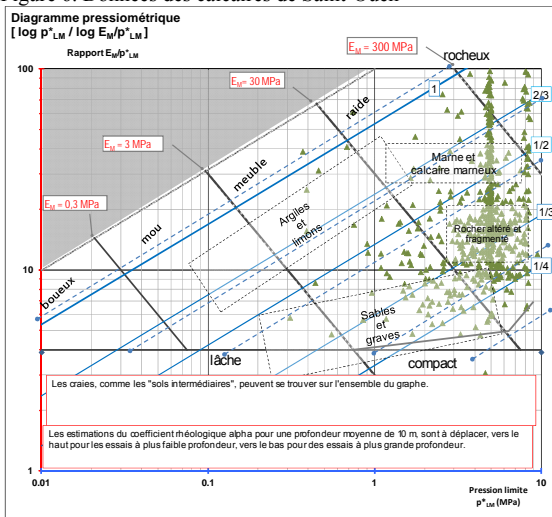


Figure 7. Données des sables de Beauchamp

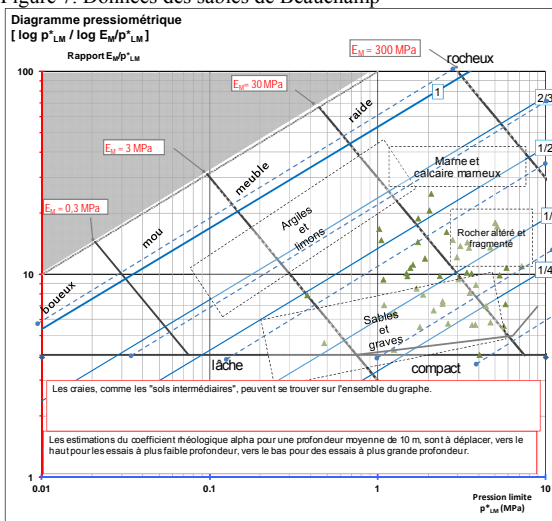


Figure 8. Données des sables de Beauchamp médian

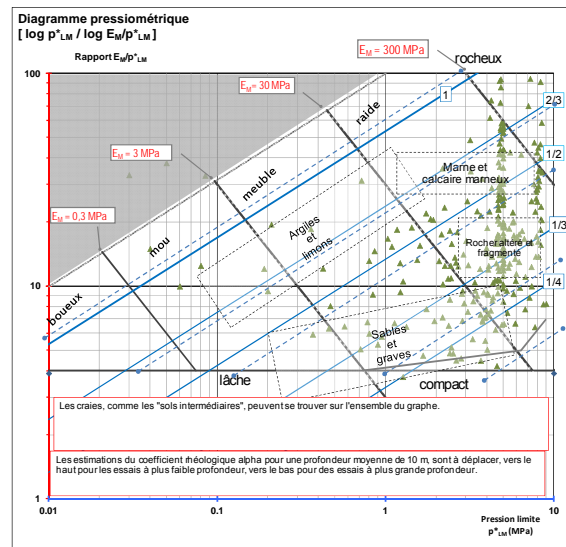


Figure 9. Données des marnes et caillasses supérieures

Les figures 6 à 10 représentent les 1305 résultats d'essais pressiométriques des couches de calcaires de Saint-Ouen (CSO) ; sable de Beauchamp (SB) ; sable de Beauchamp médian (SBM) ; marnes et caillasses supérieures (MCS) et inférieures (MCI) dans l'abaque dans sa première version.

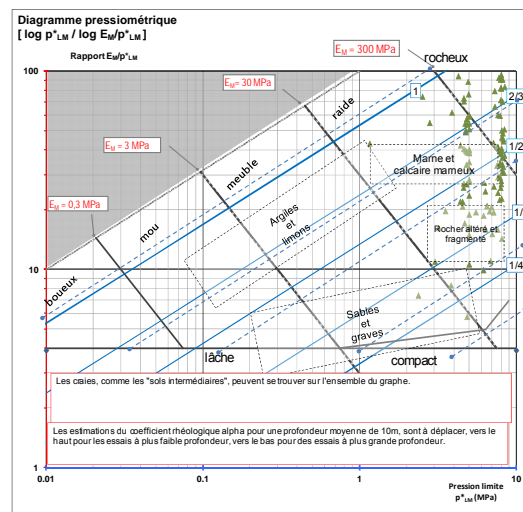


Figure 10. Données des marnes et caillasses inférieures

On observe que sur l'abaque première version, les différents horizons (profondeur moyenne 18,3 m et maximale 45 m) se positionnent tous dans une zone des rochers altérés et fragmentés. Il y a dans ces horizons une évolution continue entre le matériau "dur" (la roche) et le matériau "meuble" (le sol raide à moins raide). On peut rencontrer sur un même site un matériau à toutes les étapes de dégradation/altération ou toutes les étapes d'induration/cimentation. L'essai pressiométrique Ménard ne dépassant pas une pression de 5 MPa, la classification se limite aux roches les plus tendres ou altérées. Cet aspect rend difficile le classement même lorsque l'on normalise les paramètres p^*_{LM} et E_M , comme c'est le cas dans la deuxième version du Pressiorama (figure 11).

On peut toutefois observer que les nuages de points se localisent mieux sur cette deuxième version. De gauche vers la droite : les marnes et caillasses inférieures, puis les supérieures, les sables de Beauchamp et les calcaires de Saint Ouen marneux.

Les sables de Beauchamp médian plus argileux se positionnant au dessus.

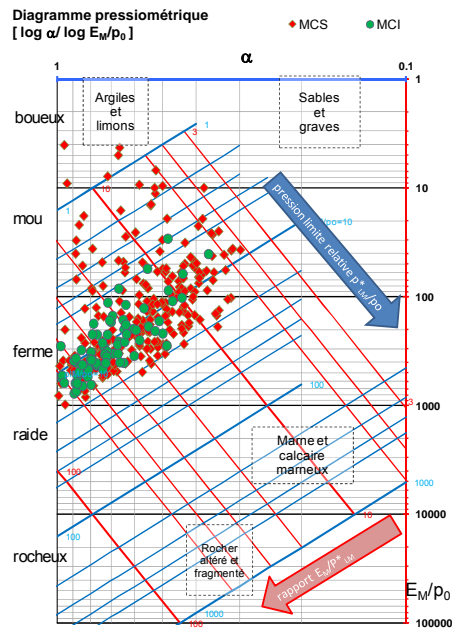
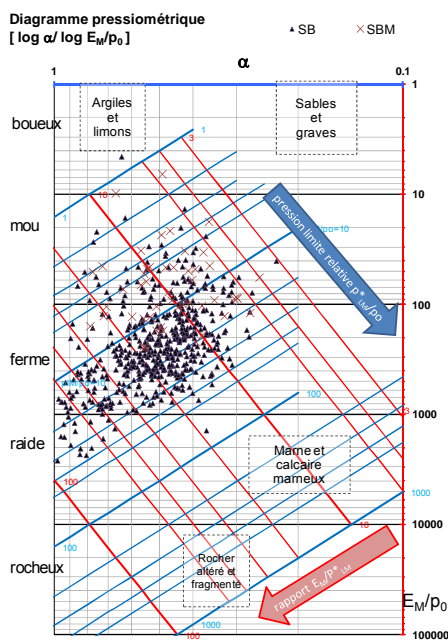
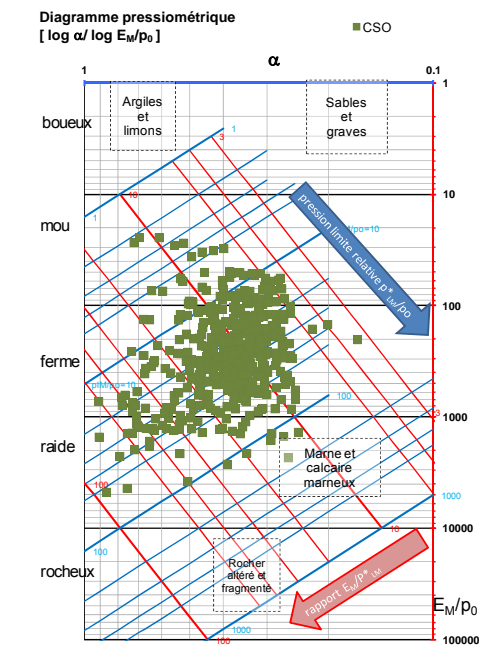


Figure 11. Données du projet dans le Pressiorama v2 (Baud et Gambin, 2013)

L'abaque dans sa deuxième version semble plus adapté à la classification des sols fermes du projet que les sols fermes à mous de la base de données des sites.

3 PROPOSITION DE MODIFICATION

Il peut sembler pertinent de positionner en axe des ordonnées un paramètre de rupture comme p^*_{LM} , que l'on normalise, plutôt que E_M qui est le terme principal de la fonction définissant le paramètre α (Figure 12). Ce qui revient dans les faits à l'intervention des axes du Pressiorama.

En effet, la pression limite variant généralement avec la pression de confinement, il paraît adapté de définir une grandeur de pression normalisée qui tient compte de l'état des contraintes du terrain en place. Le rapport p^*_{LM}/p_0 , avec p_0 étant défini comme la pression horizontale des terres au repos, permet de tenir compte de cette réalité. On pourrait sans doute aller plus loin en normalisant, non pas par p_0 mais par p_c , défini comme la pression de contact représentative de l'état de contrainte en place. Cela éviterait de devoir estimer le coefficient de poussée des terres au repos K_0 source d'incertitude et souvent pris en valeur par défaut à 0,5.

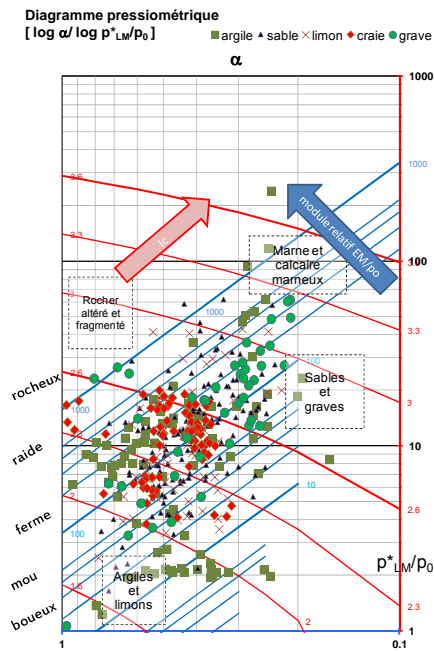


Figure 12. Abaque proposé avec les jeux de données des sites

La figure 12 illustre cette possibilité et montre un assez bon discernement des cinq classes de sol de la base de données des sites expérimentaux. Les sols fins se localisent en bas à gauche du graphique et les sols granulaires en haut à droite, avec les sols intermédiaires en position centrale. De ce fait, l'utilisation de courbes fonctions des coordonnées et définissant un indice de classification I_c semble adapté pour délimiter des zones.

$$I_c = \left[1 + \log \left(\frac{p^*_{LM}}{p_0} \right) \right]^2 + (1 - \log(\alpha))^2 \quad (5)$$

Cet indice pourrait avoir la même valeur seuil de 2,6, séparant les comportements frottant et cohérent, que celle proposée par Jefferies et Been (2006), avec toutefois une évolution en sens inverse (1,3 pour les argiles et 3,6 pour les graves).

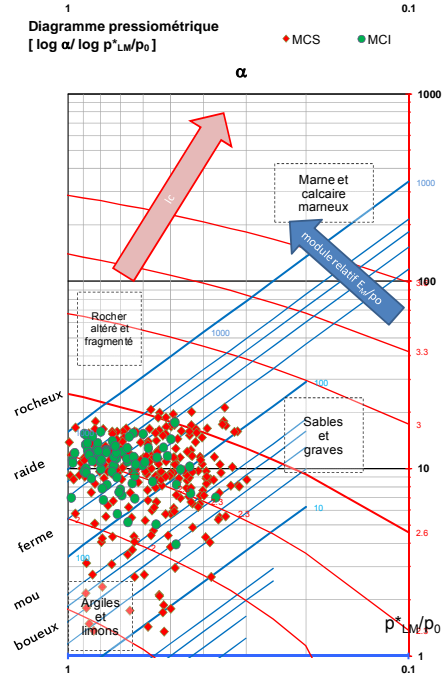
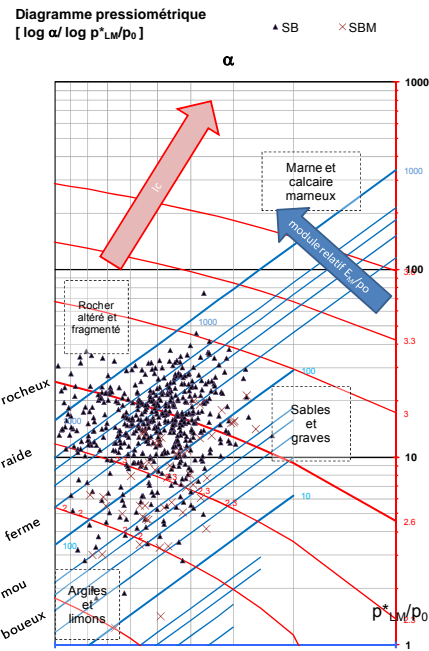
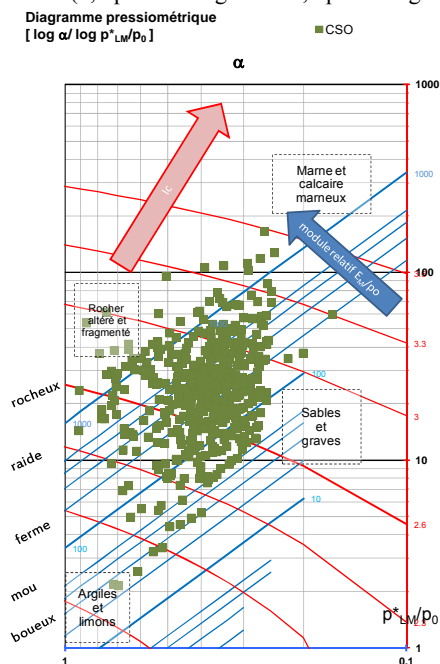


Figure 13. Données du projet

La comparaison avec les données du projet (figure 13) donne également un positionnement correct. Les sous-groupes de sols pour les sables et les marnes et caillasses se distinguent des groupes principaux. Constat qui était déjà possible avec le Pressiorama version deux. La variation concomitante des abscisses et des ordonnées pour les classes semble intéressante pour localiser des zones de comportement (au sens des comportements repères proposés par Biarez et Hicher (1994)).

4 CONCLUSION

Le diagramme bi-logarithmique proposé par Baud (2005) et Baud et Gambin (2011, 2012 et 2013) semble prometteur bien

que la comparaison des différentes classifications ne permette pas de délimiter des zones uniques disjointes évidentes.

La validation par ce croisement de données permet de conclure sur la fidélité de cet abaque dans sa nouvelle version et de proposer quelques conseils pour son utilisation pratique. Cet abaque s'avère apte à classer les sols dans les cas où les sols sont fermes (sols raides, roches tendres) et quand on dispose d'essais avec un module Ménard mesuré avec le moins de remaniement possible. L'auteur précise en effet qu'il a calé son abaque avec des données issues d'essais avec mise en place de la sonde dans un tube lanterné avec forage à l'avancement.

Une version modifiée de cet abaque est également soumise à validation et semble, même sur des essais réalisés en forage non maintenu, différencier les classes de sol.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'entreprise RATP pour leur aimable permission d'utiliser les résultats des campagnes d'essais.

6 REFERENCES

- AFNOR, 2012, *Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes*, norme NF P94-262,
- AFNOR, 2013, *Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles*, norme NF P94-261,
- Baud, J.-P. 2005. *Analyse des résultats pressiométriques Ménard dans un diagramme spectral [log(pLM), log(EM /pLM)] et utilisation des regroupements statistiques dans la modélisation d'un site*, ISP5 - 50 ans de pressiomètres. Vol. 1. Gambin, Magnan et Mestat (ed.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, 167-174
- Baud, J.-P., Gambin, M. 2011, *Classification des sols et des roches à partir d'essais d'expansion cylindrique en haute pression*, C. R. du 15^{ème} Congrès Européen de Mécanique des Sols et de Géotechnique, edited by A. Anagnostopoulos, M. Patchakis, C.Tsatsanifos, ISO Press, Amsterdam .
- Baud, J.-P., Gambin, M. 2012. *50 MPa Ménard PMTs help linking Soil and Rock Classifications*. in A. Anagnostopoulos, ed., *Geotechnical & Geological Engineering Journal*, Special Issue on Hard Soils and Weak Rocks, Springer Verlag, Berlin.
- Baud, J.-P., Gambin, M. 2013, *Détermination du coefficient rhéologique α de Ménard dans le diagramme Pressiorama®*. C. R. du 18^{ème} Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique, edited by Ponts Formation Conseils, Paris .
- Biarez J., Hicher P.Y. 1994. *Elementary Mechanics of Soil Behaviour, Saturated and Remoulded Soils*. A. Balkema
- Jefferies M.G., Been, K., 2006. *Soil liquefaction – A critical state approach*. Taylor & Francis Group, London and New York. ISBN 0-419-16170-8, 479 p.
- MELT, 1993. *Règles techniques de calcul et de conception des fondations des ouvrages de génie civil, CCTG Fascicule 62 Titre V*, Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Paris, Texte officiel N° 93-3, 182 p.
- Ménard L. Rousseau J. 1962. *L'évaluation des tassements, tendances nouvelles*. Sols-Soils, N°1, Paris.
- Reiffsteck P., Lossy, D. and Benoît, J., 2012. *Forages, Sondages et Essais In Situ Géotechniques – les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*, edited by Presses des Ponts, Paris, 796 pages
- Robertson, P. K., (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1): 151 - 158.