

Les capteurs de succion électrique et la mesure en continu de la succion lors des essais classiques dans les sols non saturés

Continuous acquisition with electric high capacity tensiometer during conventional geotechnical test in unsaturated soil.

Vincent SAVATIER^{1,2},

1 EGIS, Toulouse, France

2 SAVA GEOTECHNIQUE, Montgiscard, France

**vincent.savatier@egis-group.com*

RESUME : Cet article rappelle l'état de l'art en matière de capteurs de type tensiomètre à haute capacité (type Dunham University) pour la mesure de la succion dans les sols et sur leurs emplois déjà décrit. Il précise ensuite les utilisations possibles de ces capteurs pour enrichir fortement les résultats d'essais classiques comme les essais Proctor, les essais de gonflement à l'œdomètre, les essais au double œdomètre et les essais d'effondrement. Par rapport aux mesures actuellement pratiquées d'essai au papier filtre qui permettent une mesure ponctuelle de la succion lors de la confection de l'éprouvette et en fin d'essai le tensiomètre à haute capacité permet une mesure continue et donc un tracé des variations de la succion lors de la déformation pour la construction d'un modèle de comportement précis dans l'espace « teneur en eau ; densité sèche ; succion ». Les applications dans les domaines de la prévision du gonflement des sols (sinistre sécheresse et gonflement en déblai) et de l'optimisation du compactage seront présentés. Les pistes d'extension de ces méthodes au cas d'essai in situ comme le pénétromètre statique ou le pressiomètre dans les sols continentaux et pour le contrôle des remblais seront évoqués.

ABSTRACT: This article reviews the state of the art in high capacity tensiometer sensors (Dunham University type) for measuring suction in soils and their uses already described. It then specifies the possible uses of these sensors to greatly enrich the results of conventional tests such as Proctor tests, Oedometer swelling tests, double oedometer tests, and slump tests. Compared to the filter paper tests currently used, which allow only a measurement of suction when the test specimen is prepared and another at the end of the test, the high-capacity tensiometer allows for continuous measurement and therefore a plot of suction variations during deformation for the construction of a precise behavior model in the "water content; dry density; suction" space. Applications in the fields of soil swelling prediction (drought damage and swelling in excavations) and compaction optimization will be presented. Possibilities for extending these methods to in situ testing, such as static penetrometers or pressure meters in continental soils and for embankment control, will be discussed.

Mots-clés: Capteur de succion ; tensiomètres ; compactage des remblais ; sols sensibles au retrait gonflement.

1 INTRODUCTION

Ces dernières années, les recherches en géotechnique ont montré l'importance des mesures de succion sur les sols presque saturés et les sols non saturés. Ceci est notamment montré dans le projet Terredurable (2017) pour les terrassements et le rapport BRGM/RP-5462-FR (2006) et le projet Agirc (2009) pour l'effet de la dessiccation sur les constructions. En retenant la dénomination de (Boutonnier 2007), un sol non saturé peut se trouver selon 3 états : Un état D3 avec des

bulles incluses dans le fluide. Un état D2 où la fraction hydrique est continue avec une fraction gazeuse discontinue. La succion est alors une pression interstitielle négative. Un état D1 avec une fraction hydrique discontinue et une fraction gazeuse continue. Le passage de D1 à D2 pour une structure du sol donnée est commandé par la succion d'entrée d'air.

Par ailleurs, les variations de l'état des sols dans la nature, peuvent être également expliquées par la connaissance de la succion imposée par la saturation de l'air ou par la succion exercée par les racines des

arbres au-dessous de leur point de flétrissement permanent. Pour évaluer cette succion, diverses voies existent dont la plus simple et la plus répandue est la mesure au papier filtre tel que décrite par (Swarbrick 1995). Il s'agit d'une mesure ponctuelle inopérante lorsque l'on veut suivre l'évolution de la succion pendant un essai ou au cours du temps. Pour cette raison, divers auteurs ont, selon plusieurs voies développées des capteurs de succion. Nous présenterons l'apport des capteurs de succion à haute capacité que nous avons construit à partir de la conception de (Lorenço, Galippoli, Toll et Evans 2006) de l'Université de Dunham.

2 TENSIOMETRE ET SATURATEUR

2.1 Le capteur

Notre capteur est construit autour d'un raccord bi-mâle de tube de gaz de 2 pouces en inox (7) fileté BSP à l'extérieur dans lequel sont fixés avec de la résine : (1) une pierre poreuse à entrée d'air de 1500 kPa ; (2) un capteur de pression de type Metallux® ME501 ou équivalent ; Des rondelles en Belpa® CSA 50 ou en acier de dimensions 21.8x9.6 ép. 0.5 mm pour (3) et (10) et 13.x9.6 ép. 0.5mm pour (4). La rondelle (10), en acier, permet d'avoir un contact mouillant avec le sol autour de la pierre poreuse. Elle est légèrement meulée pour que la face du front soit lisse.

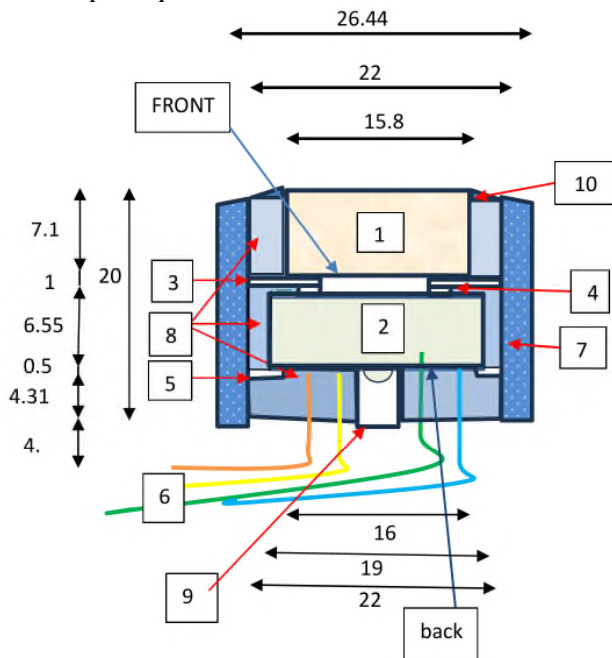


Figure 1: coupe du capteur de succion 2 pouces.

Les rondelles (3) et (4) ont pour but de ménager en arrière de la pierre poreuse (1) une cavité rigide d'épaisseur millimétrique qui une fois saturée d'eau désaérée, transmettra la succion au capteur (2). La rondelle en acier (5) est nécessaire pour éviter des

efforts parasites sur le capteur (2) ; (6) connectique du capteur ; (8) résine de scellement ; (9) est un petit tube pouvant être en cuivre ou en plastique dont la fonction est de raccorder le capteur (2) à la pression atmosphérique.

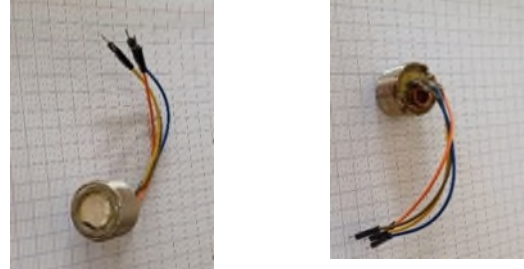


Figure 2: Vue avant et arrière d'un capteur.

Des variantes de ce modèle de base ont été développées. Il a ainsi été construit un modèle où le corps de capteur (7) est muni d'un pas de vis intérieur et la pièce (5) remplacée par une bague fileté. Ce dispositif permet de mettre en place le capteur (2) d'une manière réversible pour pouvoir le remplacer si nécessaire. Un modèle autour d'un corp fileté en un pouce et demi a également été développé dans la variante avec filetage intérieur et bague.

2.2 L'atelier de saturation

Un tel capteur de succion nécessite une saturation rigoureuse de la pierre (1) et de placer dans la cavité entre (1) et (2) une eau totalement désaérée. Pour cela sur la base du dispositif proposé par les auteurs de l'université de Dunham, nous avons construit un atelier de saturation adapté à la conduite d'essai en routine (figure 3). Il est constitué d'un support de saturation (1) pouvant recevoir 6 capteurs aussi bien en 2 pouces ; qu'en 1 pouce un demi fileté ou non fileté.

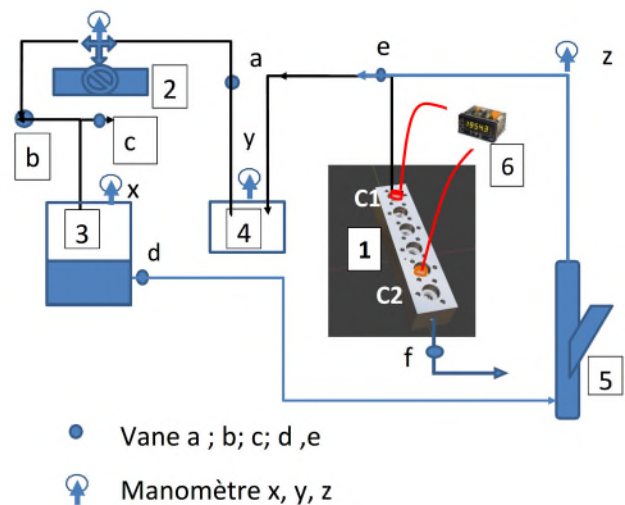


Figure 3: Schéma de principe de l'atelier de saturation.

2.3 Saturation initiale mode d'emploi

1. Le réservoir (3) est rempli de l'eau nécessaire au fonctionnement. On met la pompe à vide en marche, les vannes (a) ,(c) et (d) étant fermées ; la vanne (b) étant ouverte. Sous l'action de la pompe à vide (2), la pression dans le réservoir de désaération (3) va baisser et l'eau se mettra à bouillir. Poursuivre jusqu'à disparition des bulles.
2. Fermer (b) et ouvrir (a) et (e) la pompe à vide met le circuit des capteurs en dépression à l'obtention de la pression minimum maintenir jusqu'à stabilisation (env. 15min), laisser en l'état 60 min selon Mendes J., Gallipoli D., Boeck F., Tarentino A (2020). A la fin de la mise au vide des capteurs fermer (e) et ouvrir (d). L'eau désaérée pénètre dans le circuit (1).
3. Fermer (d). Mettre en action la pompe (5) et monter en pression à 3 ou 5 MPa pour comprimer les bulles restant dans les pierres poreuses des capteurs. Conserver en pression pendant 12 à 24 heures selon les auteurs cités ci-dessus.
4. Vidanger le circuit par la vanne (f).
5. Démontez les capteurs en les mettant immédiatement dans un milieu humide (par exemple bocal de confiture à couvercle percé). Ils sont prêts à l'emploi.

Pour les saturations ultérieures on peut se contenter de démarrer la saturation à (3)

3 LES UTILISATIONS

3.1 Utilisations du capteur dans la littérature

(Toll G. et al 2019) ont utilisé un capteur semblable (corp non fileté) pour tracer la courbe de rétention d'un till compacté

(Azizi A. et al. 2019) ont instrumenté avec le même capteur la structure d'une chaussée à faible trafic de la route ; Bago-Talawanda au Kenya pour comprendre l'évolution de la succion dans une arase sensible à l'eau.

(Toll G., Tsaparas I. et Rahadjo H. 2022) l'ont utilisé pour suivre, l'évolution de la succion dans un sol sur un talus instable selon la pluviométrie et en fonction des mouvements d'instabilité constatés.

3.2 Utilisations nouvelles proposées

3.2.1 Principe de conception

Les appareils de laboratoire existant pour l'étude des sols non saturés travaillent pour la plupart à succion contrôlée par des solutions tampon. Ils nécessitent un matériel complexe et ne suivent pas le chemin de contrainte- succion parcouru lors de l'installation d'un

ouvrage de génie civil. La réalisation d'essais rapides à teneur en eau constante est plus adaptée à ce type d'étude et est possible avec un matériel dont sont équipés la plupart des laboratoires d'entreprise. Il suffit d'y ajouter un capteur de succion. Cela rend possible l'entrée de la mécanique des sols non saturé dans la pratique de l'ingénierie.

3.2.2 Essai œdométrique à mesure de succion

Le principe est de charger rapidement une éprouvette non saturée dans un bâti œdométrique protégé contre l'évaporation où le piston supérieur a été modifié pour y insérer le capteur décrit ci-dessus tel que présenté figure (5).

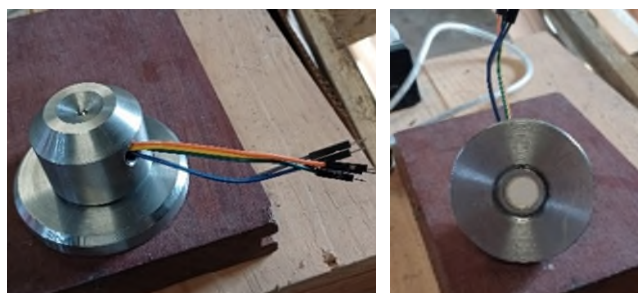


Figure 4 : tête de mesure de succion pour œdomètres

Les paliers sont courts (10-20 min). L'essai est alors à teneur en eau constante jusqu'à l'annulation de la succion. La figure 6 présente un exemple de présentation des résultats de cet essai.

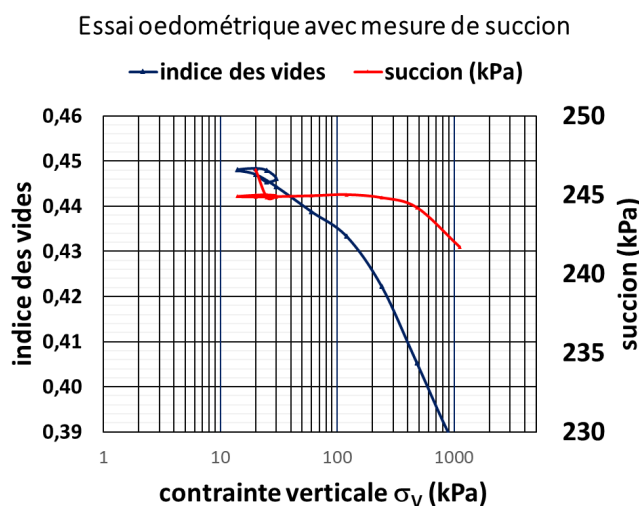


Figure 5: essai œdométrique avec mesure de succion.

Ce type d'essai fait une mesure directe, des variations de succion et permet d'en déduire plus précisément celles de la cohésion et du module lors de la montée d'un remblai. Notons qu'il est également possible faire des essais œdométriques à teneur en eau variable si la durée des paliers et l'étanchéité du confinement de l'éprouvette ne permet pas de la maintenir constante (voir figure 11 oedomètre2).

3.3 Essais de gonflement

Le dispositif de la figure 5 permet de réaliser des essais de gonflement à l'œdomètres sous charge fixe en mesurant la relation gonflement succion au sommet de l'éprouvette.

3.4 Essais double œdométrique

Ces essais sont utilisés pour l'étude des sols effondrable de type lœss éolien mais aussi dans la prévention du risque d'effondrement à la base de remblais de grande hauteur où de remblais en sol limoneux compacté secs mais exposés à une saturation inévitable (sol inondable présence de pluviaux en bord de voie.

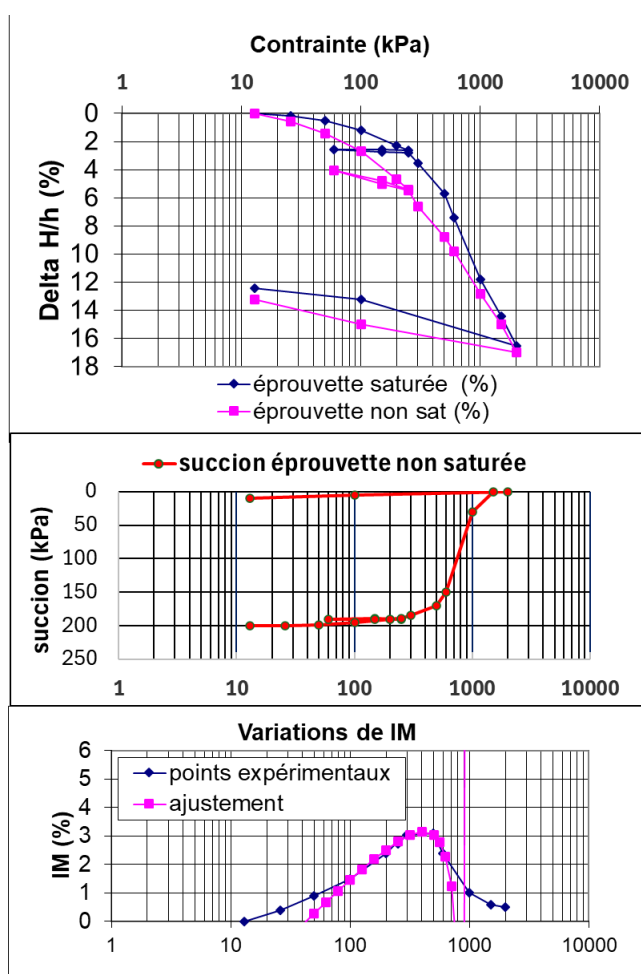


Figure 6: Simulation d'un essai double œdométriques avec mesure de la succion.

Ils consistent à réaliser un même programme d'essais sur deux éprouvettes taillées dans le même sol, l'une est chargée rapidement dans son état naturel, l'autre après saturation. Cet essai est décrit en détail dans (Savatier et al. 2014) et par (Delage, Cui et Antoine 2005). On définit l'IM(s) comme la différence entre de déformation entre l'éprouvette saturée et non saturée.

IM passe par un maximum IM_{Max} caractéristique de la structure du sol.

La succion ne varie que très peu jusqu'à IM_{Max} au-delà on arrive en limite des domaines D1/D2 au sens de Boutonnier (2007) et le sol non saturé va converger vers l'état saturé à la poursuite du chargement avec une chute rapide de succion.

La mesure des variations de la succion au-delà de IM_{max} permet de mieux évaluer le risque d'effondrement par remontée capillaire car ces phénomènes se produisent en limite de la zone D2 où la fraction hydrique est continue.

3.5 Construction de remblais

Le projet Terredurable (2017) a montré l'intérêt de faire des études de compactage comportant des essais de type Proctor normal et Proctor modifiés avec des mesures de succion pour chaque teneur en eau et chaque énergie de compactage.

(Savatier et al, 2024) ont proposé une méthode de conception d'un remblai en prenant en compte la succion pour justifier la stabilité. Celle-ci est possible car dans la plus-part des pays, la saturation moyenne de l'air est suffisamment faible pour que la succion moyenne à la surface du remblai soit plus forte que la succion de compactage. Il suffit donc de limiter les infiltrations de surface et les remontées capillaires par la base pour que la succion augmente au cours de la vie de l'ouvrage. La mise en œuvre de cette méthode nécessite la réalisation d'études de compactage par essais Proctor et essais œdométrique avec mesure de succion. Dans les études actuelles, la mesure de succion se fait au papier filtre en intégrant au sein des sols dans le moule Proctor ou dans l'éprouvette œdométrique un papier de mesure enveloppé dans des feuilles de protection. Lors de l'essai œdométrique, on ne dispose alors que d'une mesure de succion en début d'essai à partir d'un échantillons jumeaux prélevés lors de la taille et d'une mesure en fin d'essai.

L'utilisation du capteur de succion lors du chargement de l'éprouvette permet (voir figure 8) une mesure de la succion en continu lors du changement œdométrique. La précision de la prévision du comportement lors de la montée du remblai en est grandement améliorée.

La limite de la réalisation des essais est que la fraction hydrique doit être suffisante pour que le contact avec la pierre poreuse se fasse et que la succion initiale soit inférieure à 1500 kPa ce qui limite au cas des limons ou à celui des argiles peu ou moyennement dense employés en remblai.

Sur la figure 8, les mesures de succion à l'œdomètre sont données en rouge, les mesures au

papier filtre sur les éprouvettes Proctor sont en bleu pour les essais Proctor Normaux et en marron pour les Proctor Modifiés. Les mesures de succion aux optima sont entourées en bleu pour le Proctor Normal et en orange pour le Modifié. La représentation des essais est faite dans le champ « Compacité » en fonction de la « teneur en eau volumique » au lieu du champ plus habituel pour les études de compactage « poids volumique » en fonction de la « teneur en eau massique ». Ce choix est fait car dans ce plan les degrés de saturation 50% 83% et 100% qui jouent un

rôle important dans le comportement non saturé des sols peuvent être représentés par des droites.

On remarquera sur la figure 8, une légère incohérence entre la mesure de succion à l'œdomètre en fin de chargement (212 kPa pour une compacité de 0.75 et $\Theta=25$) et la mesure au papier filtre obtenue lors de l'essai Proctor modifié (275 kPa pour une compacité de 0.77 et $\Theta=25$). Cela montre l'intérêt de procéder à des mesures de succion avec la même technique pour tous les types d'essai.

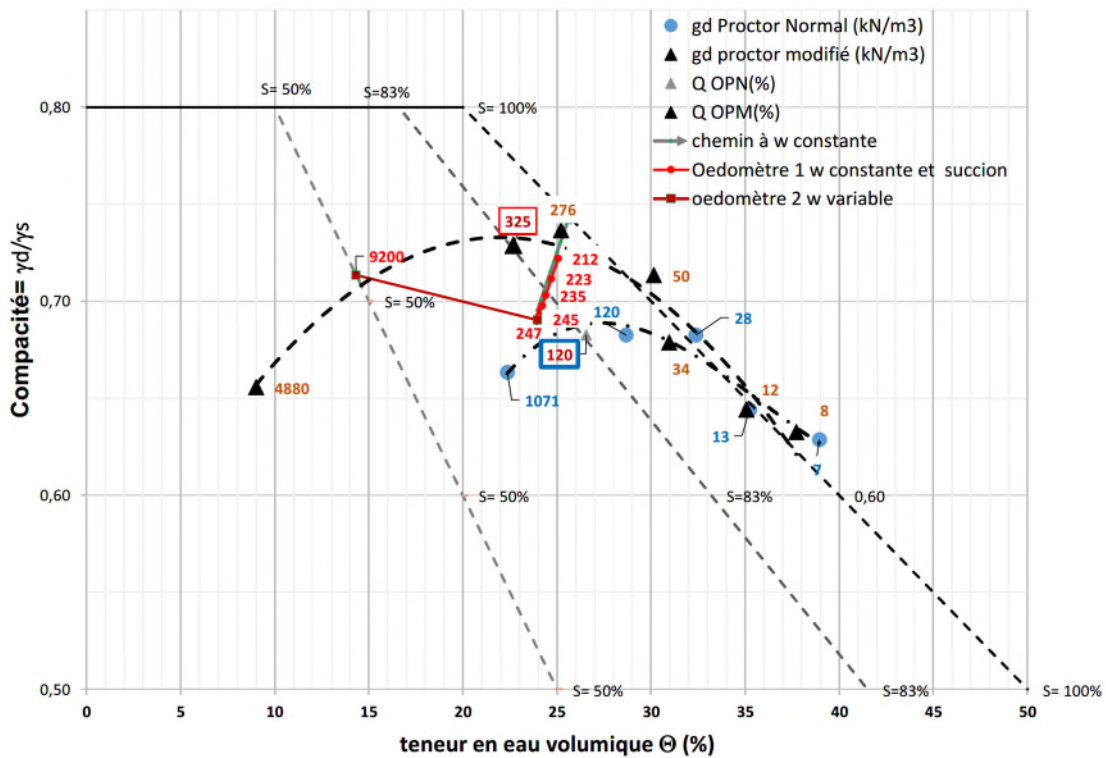


Figure 7: exemple d'étude de compactage avec mesure de la succion à l'œdomètre.

3.6 Essais Proctor

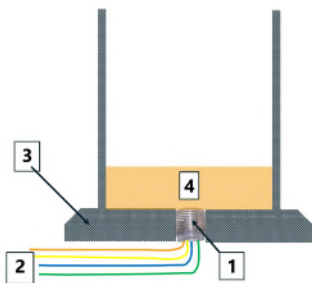


Figure 8: Moule Proctor équipé d'un capteur de succion (1) est le capteur de succion, (2) est la connectique allant vers la centrale d'acquisition, (3) est le moule Proctor, (4) est la première couche de sol.

essais d'une étude de compactage. Par ailleurs, la réalisation de la mesure au papier filtre est assez contraignante dans le cas d'un Proctor. Il faut extraire le papier filtre du moule et le peser avant qu'il ait commencé à se sécher ce qui induit un risque d'erreur.

On peut donc proposer d'équiper un jeu de moules Proctor d'un trou fileté en 2 pouces BSP placé à la base ou à l'axe d'une face latérale. Ce filetage permettra d'y placer le capteur de succion décrit ici.

La figure 9 précise la disposition dans le cas d'un capteur placé dans la base. Pour éviter la désaturation du capteur, on le protégera d'une pastille étanche pendant le montage. Celui-ci terminé, on retirera la pastille et pour éviter le risque de désaturation, on arrosera la pierre avec un vaporisateur avant de mettre en place la première couche de terre.

La figure 8 montre l'intérêt de procéder aux mesures de succion avec la même technique lors de tous les

4 MESURE DE SUCCION LORS DES ESSAIS IN SITU

4.1 Principe

Les essais in situ sont pour la plus-part des essais rapides. En sol saturé cela permet de les interpréter comme des essais non drainés. Dans le cas des sols non saturés, ce caractère permet de considérer l'essai à teneur en eau constante. Cet élément ajoute au comportement du sol une équation qui va permettre de prévoir au moins qualitativement le comportement du sol en contrainte effective lors des essais classiques (pénétromètre, pressiomètre, scissomètre).

L'adjonction d'un capteur de succion va permettre de préciser ce comportement et la signification en contrainte effective de la mesure en contrainte totale

4.2 Succio-pénétromètre statique

4.2.1 Description de l'appareil

La figure 10 précise la constitution de l'appareil. Il s'agit d'un tube phi 60 mm à l'intérieur duquel sont placés 3 capteurs de succion 2 pouces placés à 120° de façon d'une part à avoir une prise de succion symétrique en cas de flambement du train de tige ; d'autre part de façon à pouvoir ménager sur la face opposée au capteur un orifice pour passer la clef à cliquet de montage.

Les capteurs sont saturés avec la centrale de saturation puis d'une manière identique au cas du capteur dans le moule Proctor il sont protégés contre la dessiccation pendant le montage de l'appareil.

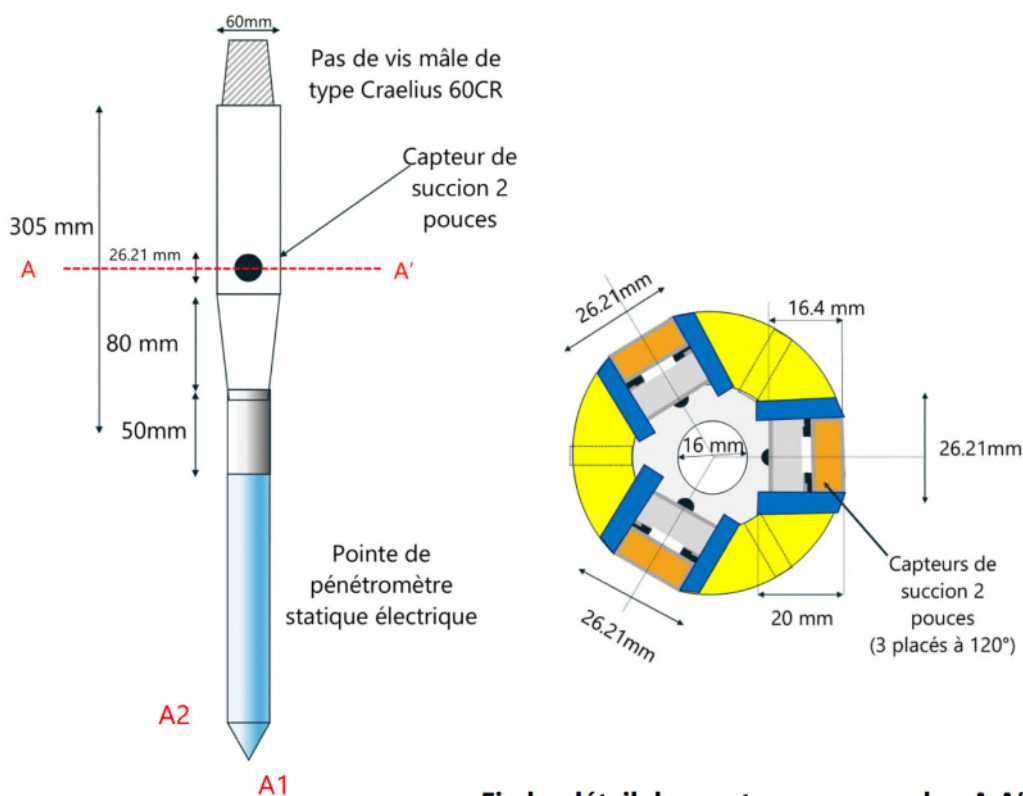


Fig a : vue générale de l'appareil

Fig b : détail des capteurs coupe selon A A'

Figure 9: vue générale et coupe de principe du succio-pénétromètre

4.2.2 Eléments théoriques

(Savatier et al. 2020) ont décrit qualitativement le comportement en contrainte effective du sol autour d'un pénétromètre statique dans un sol non saturé. Ils ont montré que la pénétration entraînait autour de la pointe une variation de succion et qu'apparaissait une zone de succion différente que la succion encaissante.

Ils ont montré également que l'on avait deux types de comportement avec :

Pour les sols déformables dilatant avec une faible succion initiale, un comportement sous la pointe avec une faible augmentation de la succion puis au droit de la pointe une extension de cavité sous un module proche de l'initial avec une avec forte augmentation de succion.

Pour les sols peu déformables contractant avec une forte succion un comportement sous la pointe

diminuant la succion initiale ce qui va se poursuivre au droit de la pointe avec une extension de cavité pour un module plus faible que l'initial et une forte diminution de la succion. Dans les deux cas la rupture se fait à l'état quasi saturé

Les mêmes auteurs ont souligné le fait qu'au droit de la pointe, la déformation était comme lors d'un essai pressiométrique une expansion de cavité dont le comportement pour un sol non saturé a été décrit par (Savatier 2016).

Ils ont également indiqué que le frottement latéral mesuré en A2 de la figure 10 sera fonction de la pression radiale p au niveau de ce point. Or la pression p est proportionnelle au \log de G le module le cisaillement qui est proportionnel à σ'_m la contrainte effective moyenne dans la zone d'expansion fixée par la succion. La valeur du frottement latéral τ_f va donc en dépendre alors que le terme de pointe $q_c - \sigma_{v0}$ ne dépend que de l'état final. En conséquence la méconnaissance de la succion peut conduire à des erreurs de détermination du ratio positionnement du sol dans le diagramme de Robertson et donc dans l'estimation de la nature du sol.

4.2.3 Applications

La plus évidente est l'établissement d'un abaque de Robertson recallé prenant en compte la succion.

La mesure de la perméabilité et de la dilatance des sols non saturé : L'existence d'une différence de succion entre la zone autour de la pointe et le terrain encaissant va permettre comme en terrain saturé de faire des essais de dissipation en arrêtant la pénétration. Sera mesuré la perméabilité du sol non saturé. On pourra aussi classer les terrains avec les sols déformables dilatant donnant succion à l'arrêt de la pénétration s_0 plus faible que la succion s_{inf} en fin de dissipation et les sols peu déformables contractant donnant une valeur de s_0 plus faible que s_{inf} .

Dans le cas d'un suivi de montée d'un remblai on peut également utiliser les variations de succion avec la profondeur et les mesures de dissipation de succion pour positionner l'état des matériaux dans le diagramme d'étude de compactage et vérifier ainsi que les hypothèses de valeur succion prises pour le dimensionnement du remblai seront bien atteintes et que l'on n'a pas de risque d'effondrement en cas d'annulation de la succion en base de remblai.

Une autre utilisation possible des mesures de la perméabilité du sol non saturé et de la succion initiale est la prévision de la durée de dissipation de la succion à l'intérieur d'un massif argileux ou limoneux hors nappe pendant la réalisation d'un soutènement provisoire en appréciant l'évolution de la succion pendant la durée de vie de ce soutènement.

Des utilisations en matière de portance de voirie sont également possibles. D'une part car la connaissance de la succion lors de la pénétration va permettre de savoir la part de la résistance mesurée susceptible de varier avec les éléments climatiques. On pourra alors anticiper l'amélioration de la portance par des dispositions de drainage. D'autre part, sur la base d'essai de dissipation il est possible prévoir quel sera l'importance de l'évolution d'une arase sous sollicitation. Ainsi un sol dilatant verra une augmentation de sa succion sous sollicitation si la portance initiale est bonne, elle devait le rester. Au contraire un sol contractant s'il est sollicité proche de la rupture va voir sa succion baisser et un écroulement et une chute de portance est possible.

Des utilisations de protection des ouvrages vis-à-vis de la végétation sont possibles. Les racines se déplacent vers les zones de faible succion. La connaissance du profil de succion autour d'un arbre pourra donc permettre d'évaluer s'il peut perturber un bâtiment où une voie. De même le profil de succion autour d'un massif végétal de stabilisation des talus permettra de juger de son efficacité future.

4.3 Le succio-pénétromètre dynamique

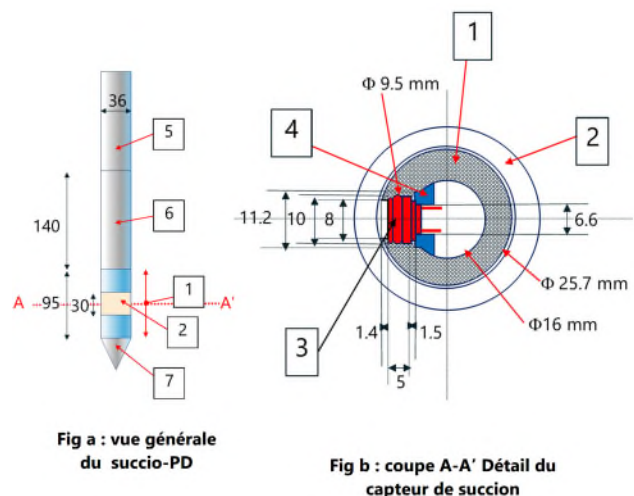


Figure 10: capteur de succion pour pénétromètre phi 36mm

- (1) Corp du capteur ;
- (2) Pierre poreuse à pression d'entrée d'air 1500 kPa en forme de cylindre creux ;
- (3) Jauge Keller 3L montage affleurant ;
- (4) baguette de calage de la jauge ;
- (5) train de tige 32 ou 36 mm ;
- (6) logement de la carte de communication.

Les utilisations décrites pour le pénétromètre statique peuvent être étendues au pénétromètre dynamique. Cela pourrait changer fortement le statut de cet appareil notamment pour le contrôle de remblai et l'étude de portance sous voirie et sous voie ferrée. Pour cette dernière application, le pénétromètre dynamique est actuellement très utilisé en raison sa

facilité d'emploi en contexte ferroviaire mais il laisse planer une certaine incertitude malgré l'ajout d'un endoscope en raison de l'absence d'élément sur l'état du sol. Il peut donc paraître particulièrement intéressant d'adapter la mesure de succion à cet appareil.

Dans l'état actuel de la technique cette adaptation est réservée aux pointes de 32 ou 36 mm en raison de l'absence de capteur de succion de dimensions suffisamment réduites. Une vue d'un capteur avec ce type de pointe est donnée figure 11. Il utilise des pierres poreuses en forme de tube et les plus petits capteurs disponibles. Sa saturation se fait par équipement spécial placé sur le saturateur décrit paragraphe 2.2.

4.4 Le succio-pressiomètre

Le comportement est pour l'essentiel identique à celui au droit de la pointe d'un pénétromètre (CPT) et l'on pourrait donc utiliser le pressiomètre pour les mêmes applications que décrit ci-dessus pour le CPT avec l'avantage de pouvoir passer des terrains très compacts.

Or (Karagiannopoulos et al. 2019) ont proposé une solution de chaîne de mesure pour sonde pressiométrique avec mesure de pression interstitielle en milieu saturé. (Savatier et al., 2022) l'ont utilisé lors d'une reconnaissance pressiométrique à 35m de profondeur avec des d'essais cycliques selon la NFP94-110-2 et conduire des essais de dissipation qui se sont avérés semblable aux essais de dissipation au CPTu. On pourrait donc espérer en adaptant le capteur de pression interstitielle à la mesure de la succion, disposer d'un succio-pressiomètre. Malheureusement, le capteur de pression requis pour cet essai, sont de tailles demi centimétrique et des capteurs de succion de cette taille n'ont pas encore été mis au point.

5 CONCLUSION

L'état de la technique en matière de capteur de mesure de succion permet de les adapter aux moules Proctor et aux bâtis oedométriques courants. On peut ainsi réaliser des mesures du point d'entrée d'air, des essais oedométrique à teneur en eau constante et des essais de gonflement, et d'effondrement, des essais de variation de la succion lors d'un chargement et des études de compactage avec mesure de la succion. Ces essais mettent à la portée des entreprises d'investigation géotechnique les outils de la mécanique des sols non saturé. Concernant les essais in situ, les capteurs de succion disponibles permettent de procéder à des essais de pénétration statique ou dynamique pour des diamètres d'outil de 32mm à 60

mm qui rendraient de grands services dans le domaine du contrôle de compactage et de l'étude des sols sensibles au retrait gonflement.

L'utilisation sur des pénétromètres de plus petite section ou sur une sonde pressiométrique paraît également très prometteuse. Malheureusement elle impose l'utilisation de capteur de succion infra-centimétrique voire inférieurs à un demi centimètre qui ne sont actuellement pas disponibles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boutonnier L. (2007). *Comportement des sols proches de la saturation* Thèse de doctorat, INP Grenoble.
- Collectif : BRGM-54862-FR Etude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux avec le bâti rapport final octobre (2006).
- Lorenço S.D.N., Gallipoli D., Toll G., Evans F.D. (2006). Développement of a commercial tensiometer for triaxial testing of unsaturated soil; Développement d'un tensiomètre pour un triaxial non saturé, dans *proc 4th I.C. on unsaturated soil*, Phenix USA, *Geotechnical Special publication* n°147, ASCE, vol 2 PP1785-1886. DOI :10.1061/40802(189)158.
- Panagiotis G. Karagianopoulos PG, Peronne M., Reiffseck P. (2019) Mesure de la pression interstitielle lors d'essai d'expansion approche physique et numérique dans *actes des ECSMGE-2019*, Reidjavick, Islande DOI:10.032075/17ECSMGE-2019-0435
- Savatier V., Karangionopoulos P.G. Peronne M., Szymkiewicz (2022). Essais d'expansion pressiométrique avec mesure de pression interstitielle application sur le site du Larivot, dans *actes de JNGG 2022*, Lyon, France.
- Swarbrick G.E. (1995) dans *Unsaturated soil/sols non saturé* (eds 1995) Alonzo Delage (eds)©1995/ISBN9054105836/2859782419 pages 653-658.
- Toll D.G., Bertolini I., Asquith J.D. (2019). Effet des conditions de compactage sur le comportement de rétention d'eau d'un till compacté dans *actes des XVII ESMGE-2019* DOI:10.32075/17 ECSMGE-2019-0752.
- Tsparas I.; Harianto, Rahardjo; Toll DG. (2022) The influence of rainfall sequences on negative pore-water pressures within slopes; L'influence des cycles de précipitations sur la succion en relation avec les glissement de sol. dans *actes de la 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 5*. Istanbul, Turquie ICNDSMGE—ZM 2022.