

Les méthodes traditionnelles de dimensionnement des pentes, qu'il s'agisse de fouilles, de tranchées ou d'excavations soutenues, négligent l'effet de succion qui se manifeste dans les sols non saturés (au-dessus de la nappe phréatique et à l'abri des précipitations) et leur confère une cohésion apparente et une résistance au cisaillement complémentaires. Cette lacune explique en partie la tenue apparemment injustifiable de certains ouvrages, mais aussi l'effondrement d'autres, tout aussi inattendu.



✍ V. Whenham, ir., chef de projet, laboratoire 'Géotechnique et monitoring', CSTC
 P. Ganne, dr. ir., chef de projet, laboratoire 'Géotechnique et monitoring', CSTC
 M. De Vos, ir., chef adjoint de la division 'Géotechnique', CSTC

Ce constat est à l'origine d'une recherche menée par le CSTC entre 2003 et 2009 [2 et 3] avec pour objectif d'établir des recommandations sur la conception des talus temporaires intégrant l'effet de la non-saturation du sol. Certaines conclusions des recherches relatives à la prise en compte de la succion dans le sol peuvent être étendues à la conception des parois de soutènement.

Plusieurs paramètres sont à considérer lors de la conception d'une fouille : la profondeur à atteindre, la nature du sol, la présence d'eau, la durée pendant laquelle la fouille sera ouverte et les facteurs externes tels que les surcharges et les vibrations. En fonction de ces paramètres et des risques associés à la réalisation de la fouille, la géométrie de cette dernière sera déterminée par un calcul de stabilité ou par une appréciation plus arbitraire basée sur l'expérience.



Un article du CSTC publié en 2006 [8] expose les principes fondamentaux relatifs à l'exécution des fouilles ainsi que diverses méthodes empiriques servant à définir la géométrie à utiliser. Cet article illustre également l'effet de la succion de manière qualitative sur la base d'une expérience de fouille-test menée sur le site de la station expérimentale à Limelette [9].

En complément à cette publication, le présent article décrit comment prendre en compte l'effet positif de la succion dans le dimensionnement des fouilles et des soutènements au travers d'un paramètre de résistance au cisaillement complémentaire, appelé cohésion matricielle ou cohésion apparente. Contrairement à la cohésion 'intrinsèque' rencontrée dans les sols argileux et liée à la nature du sol, la cohésion 'apparente' est liée à l'état (de contrainte ou hydrique) du sol et peut dès lors varier dans le temps.

Cette résistance au cisaillement complémentaire, qui intervient du fait de la succion dans les sols non saturés, permet de justifier des pentes de talus plus raides ou des structures de soutènement plus légères, à condition que des systèmes de mesure de succion soient mis en place sur le chantier et que des précautions soient prises pour limiter les venues et/ou accumulations d'eau dans le talus ou derrière la paroi de soutènement (système de drainage, bêche éventuelle).

Les mesures de succion peuvent être effectuées au moyen de capteurs très peu coûteux et quasi autonomes, qui enregistrent et transmettent automatiquement les données. L'installation *in situ* de ces capteurs demande toutefois une certaine expérience car leur mise



Fig. 1 A gauche, exemple de fouille dont la stabilité est inexplicable sur la base des méthodes de calcul et des paramètres de sol généralement recommandés. A droite, effondrement de fouille brutal et imprévu.

Cohésion apparente des sols non saturés

en œuvre nécessite certaines précautions. Les recherches menées par le CSTC durant six ans lui ont permis d'acquérir cette compétence et de démontrer l'intérêt, tant sur un plan économique que sécuritaire, des mesures de succion sur chantier.

1 PARAMÈTRES USUELS DE DIMENSIONNEMENT DES FOUILLES ET PAROIS DE SOUTÈNEMENT

1.1 PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT

En principe, le dimensionnement d'une fouille a pour but de définir, pour une situation déterminée, la pente la plus raide possible, en tenant compte de la nature et des propriétés géotechniques du sol en place, de la profondeur d'excavation et des autres caractéristiques liées à la réalisation. Lorsque la géométrie de l'excavation et/ou les conditions géotechniques (résistance insuffisante du sol, présence d'eau, ...) ne permettent pas de réaliser une paroi non soutenue, la mise en place d'un soutènement s'impose.

1.2 PARAMÈTRES DE SOLS 'TRADITIONNELS'

Pour le dimensionnement d'une fouille, les paramètres géotechniques déterminants sont essentiellement :

- la masse volumique
- la cohésion
- l'angle de frottement interne.

Dans le cas des soutènements, une estimation de la déformabilité des sols en place est également requise. Ces données géotechniques doivent être déterminées pour chaque couche de sol et ce, jusqu'à une profondeur suffisante sous le niveau de l'excavation.

La détermination des angles de frottement et de la cohésion provient idéalement d'essais de laboratoire sur des échantillons non remaniés (essais triaxiaux), qui permettent également de caractériser les propriétés de déformation du sol.

Le plus souvent, les seules informations géotechniques disponibles sont les résistances au cône et le frottement latéral fonction de la profondeur, fournis par les essais de pénétration statique (*Cone Penetration Tests*)

ou CPT). Il n'existe malheureusement pas de corrélation directe entre les informations données par les CPT et les grandeurs nécessaires au dimensionnement d'une fouille. Pour commencer, il est néanmoins possible de se référer au tableau de l'Annexe nationale belge (ANB) qui complète l'Eurocode 7 afin de déterminer le type de sol et ses propriétés mécaniques sur la base de sondages CPT. Ce tableau, publié dans une précédente publication du CSTC [8], est actuellement en cours de révision.

L'utilisation du tableau susmentionné requiert idéalement une estimation préalable de la nature géologique des sols en place. Cela peut se faire soit en consultant des cartes géologiques et/ou géotechniques, soit en réalisant des forages d'observation et/ou d'essais d'identification. La plateforme 'dov' (<http://dov.vlaanderen.be>) constitue également une source d'informations très utile pour les chantiers situés en Flandre.

2 PRISE EN COMPTE DE LA SUCCION

2.1 PRINCIPE DE BASE ET DÉFINITION DE LA SUCCION MATRICIELLE

La quantité d'eau présente dans un sol influence grandement son comportement.

Lorsque le sol est complètement saturé, c'est-à-dire lorsque l'espace entre les grains est rempli d'eau, des pressions interstitielles positives (surpressions interstitielles) s'exercent entre les grains de sol avec pour effet de diminuer les contraintes effectives et, par conséquent, la résistance au cisaillement du sol. En outre, dans le cas des talus, la présence d'eau interstitielle peut donner naissance à des forces

d'écoulement responsables de pressions d'eau horizontales non équilibrées.

Dans les sols partiellement saturés, dont l'espace entre les grains est rempli à la fois d'eau et d'air, les surpressions interstitielles laissent place à des tensions au niveau granulaire, appelées succions matricielles. Ces tensions proviennent des forces d'adsorption au contact eau/solide et des forces capillaires à l'interface eau/air. Au contraire des surpressions interstitielles, les succions exercent une influence favorable sur la résistance en cisaillement du sol et, par conséquent, sur la stabilité des talus ou parois. Exception faite du sable des dunes (qui présente une granulométrie tout à fait particulière), on peut dire d'une manière générale que cet effet est inversement proportionnel à la teneur en eau dans le sol : plus le sol est sec, plus les tensions sont élevées et plus la résistance en cisaillement du sol augmente.

Un aspect très important du phénomène réside dans le fait que la succion régnant dans un sol, puisque dépendante de la teneur en eau, varie dans le temps.

Pour une profondeur de sol considérée, ces variations sont essentiellement fonction (cf. figure 2) :

- des mouvements de la nappe phréatique : le sol est saturé en dessous de la nappe phréatique et ne peut donc pas être le siège de phénomènes de succion. Dans les sols fins, du fait des remontées capillaires, l'établissement de la succion matricielle peut également être limité sur une hauteur non négligeable au-dessus de la nappe phréatique
- des précipitations : l'augmentation de la quantité d'eau dans le sol par infiltration tend à diminuer la succion
- de la période de l'année : pour des niveaux

comparables de précipitations, la teneur en eau dans le sol sera plus importante en période hivernale (traditionnellement de novembre à mars) du fait d'une évapotranspiration moins importante qu'en période estivale. Si on prend en compte la succion dans le sol, cet effet est davantage marqué dans les limons que dans les sables, ce qui peut s'expliquer par l'allure respective de leur courbe de rétention [8].

De manière générale, on peut considérer qu'en Belgique, dans les sols sableux et limoneux, les valeurs de succion s'établissent entre 0 et 50 kPa.

2.2 INFLUENCE DE LA SUCCION SUR LES PARAMÈTRES DE RÉSISTANCE D'UN SOL

Il existe de nombreuses méthodes de calcul permettant de vérifier la stabilité d'une pente ou d'une paroi de soutènement.

La plupart des méthodes de dimensionnement reposent sur des calculs à la rupture prenant en compte des coefficients de sécurité. Dans le cas d'un talus, il s'agit de vérifier que la résistance au cisaillement du sol le long de toute surface de rupture potentielle soit supérieure aux contraintes de cisaillement agissant sur ces mêmes surfaces (cf. figure 3, p. 3). Pour dimensionner un ouvrage de soutènement, il faut déterminer ses éléments géométriques et structuraux afin qu'il soit stable sous l'action des forces qui lui sont appliquées. La résistance au cisaillement du sol joue, là aussi, un rôle déterminant : l'équilibre sera d'autant plus facilement atteint que la résistance au cisaillement du sol sera importante.

La résistance au cisaillement d'un sol saturé/sec est généralement caractérisée par le critère de Mohr-Coulomb, selon lequel il existe à la rupture une relation linéaire entre la résistance au cisaillement (sur le plan de rupture) et la contrainte normale (au plan de rupture), comme exprimé dans l'équation suivante ainsi qu'à la figure 4 (p. 3) :

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_w) \operatorname{tg}\varphi' = c' + \sigma'_n \operatorname{tg}\varphi'$$

où :

τ_f : la résistance au cisaillement [kPa]

c' : la cohésion intrinsèque effective [kPa]

σ_n : la contrainte normale totale [kPa]

u_w : la contrainte interstitielle [kPa]

φ' : l'angle de frottement effectif [°]

σ'_n : la contrainte normale effective [kPa].

Par analogie, la résistance au cisaillement des sols partiellement saturés peut être déduite de l'équation précédente, à condition de définir la contrainte normale effective à partir de l'équation de Bishop :

$$\sigma'_n = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

où :

u_a : la pression atmosphérique [kPa]

χ : un paramètre adimensionnel lié au degré

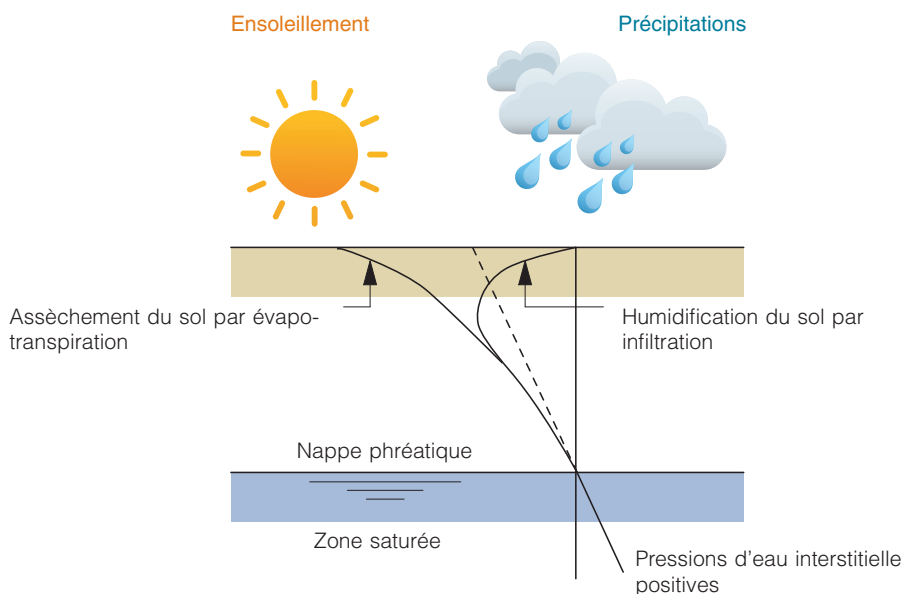


Fig. 2 Influence des conditions climatiques sur le profil de succion.

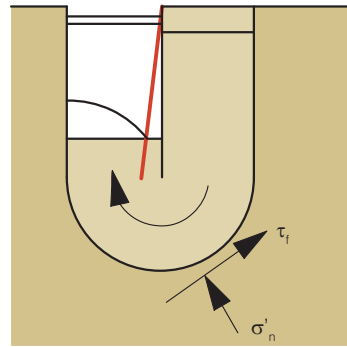
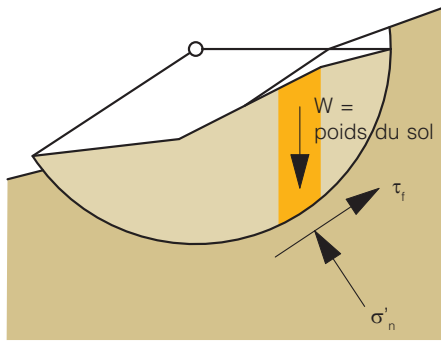


Fig. 3 Exemples de schémas de rupture d'un talus et d'un soutènement. Rôle de la résistance au cisaillement.

de saturation du sol (χ tend vers 0 quand le sol est sec et vers 1 quand il est saturé) ($u_a - u_w$) : la succion matricielle.

Cette relation peut également s'écrire [4] :
 $\tau_f = c' + (\sigma'_n - u_a) \operatorname{tg}\phi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg}\phi^b$
 $c'_a = (u_a - u_w) \operatorname{tg}\phi^b$
 où :

- c'_a : la cohésion apparente liée à la succion (appelée également cohésion matricielle) [kPa]; elle représente l'augmentation de résistance au cisaillement du sol attribuable à la succion
- ϕ^b : la variable caractérisant la relation entre succion et cohésion apparente liée à la succion [-].

En première approche, une valeur sûre est obtenue par : $\operatorname{tg}\phi^b = 0,5 \cdot \operatorname{tg}\phi'$

D'autres formules pour $\operatorname{tg}\phi^b$ ont été suggérées sur la base du degré de saturation dans le sol et, éventuellement, de son indice de plasticité [4, 5 et 7]. Elles mènent en général à des valeurs moins conservatives du paramètre $\operatorname{tg}\phi^b$ et nécessitent une meilleure reconnaissance du sol en place. Pour un site donné, le paramètre $\operatorname{tg}\phi^b$ peut également être obtenu au moyen d'essais de compression simples sur échantillons non remaniés. Ce type d'essais permet d'établir directement le niveau de cohésion apparente sur lequel on peut tabler, pour une teneur en eau pondérale à mesurer *in situ* [% massique]. Cette approche a été validée pour des sols limoneux dans le cadre de la recherche menée au CSTC.

La figure 5 montre la courbe expérimentale

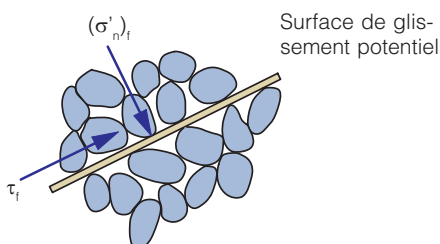


Fig. 4 Illustration du critère de Mohr-Coulomb.

obtenue pour le limon prélevé sur le site de la station expérimentale du CSTC à Limelette. Les valeurs de teneurs en eau pondérales y ont été transposées en succion à partir de la courbe de rétention du sol [6] de manière à pouvoir comparer les résultats des essais de compression simples avec les diverses formulations théoriques exposées ci-dessus.

Cette approche expérimentale, basée sur des essais de compression simple, est toutefois difficilement transposable aux sables, car il est très délicat d'en obtenir des échantillons non remaniés. De plus, l'analyse systématique d'un grand nombre d'essais de compression simple menés sur des matériaux sableux a fait apparaître l'influence prépondérante de la densité du sable sur son comportement face aux variations de teneur en eau.

La valeur de la cohésion apparente c'_a provenant de l'effet de la succion matricielle ne pourra pas être définie sur la seule base des essais CPT ou des forages. Il faudra confirmer la présence de cette succion par une mesure directe (de succion) ou indirecte.

2.3 MESURE IN SITU DE LA SUCCION MATRICIELLE

La règle d'or pour prendre en compte l'effet favorable de la succion dans les calculs de stabilité d'une fouille ou d'une paroi de soutènement est de s'assurer de sa présence. Pour ce faire, l'option la plus sûre est de mesurer cette succion *in situ* tout au long de la durée des travaux.

Dans le cadre de la recherche menée au CSTC, deux types de capteurs ont été validés pour les mesures de succion : les tensiomètres et les capteurs à matrice granulaire. Dans les deux cas, le principe de mesure est basé sur un équilibre de pression locale entre le sol et le capteur.

L'équilibre de pression entre le tensiomètre et le sol s'opère au niveau de la céramique poreuse du tensiomètre, qui doit être en contact avec le sol au point de mesure souhaité (cf. figure 6A, p. 4). La tension d'eau établie au niveau de la céramique poreuse est reportée jusqu'au filet d'air, en tête de tensiomètre, au travers de la colonne d'eau. La mesure de dépression d'air en tête de tensiomètre indique ainsi, après avoir déduit le poids de la colonne d'eau, la succion dans le sol.

Le fonctionnement des capteurs à matrice granulaire est légèrement différent (cf. figure 6B, p. 4). Il s'agit à nouveau d'une mise en équilibre du capteur dans le sol, mais cette fois la succion est déduite d'une mesure de teneur en eau dans la matrice granulaire (par résistivité). Elle pourra être traduite en succion en se basant sur la courbe de rétention dudit matériau granulaire.

Ces capteurs très peu coûteux peuvent enregistrer et transmettre les mesures de succion de manière automatique et (quasi)autonome. Leur installation *in situ* demande néanmoins une certaine expérience, du fait des précautions de mise en œuvre.

D'une manière générale, les tensiomètres sont plus précis (0,1 kPa) que les capteurs à matrice granulaire (0,5 kPa), dans la mesure où leur précision ne dépend pas de la caractérisation d'un matériau tiers. Leur mise en œuvre est cependant plus délicate encore que celle des capteurs à matrice granulaire de type Watermark®.

Puisqu'il s'agit de mesures locales (zone d'influence de l'ordre de quelques centimètres), les capteurs doivent être placés à plusieurs profondeurs (généralement jusqu'à 3-4 m, les variations de succion étant, pour raisons climatiques, fort limitées en deçà de ces profondeurs) et éventuellement posés à différents endroits sur le chantier (en fonction de l'hétérogénéité du sol).

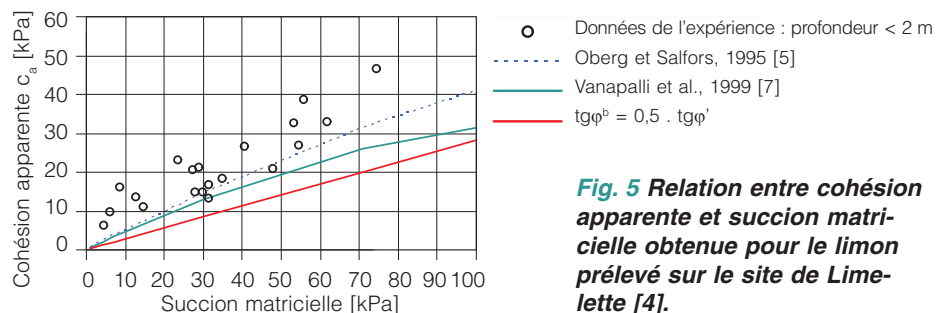


Fig. 5 Relation entre cohésion apparente et succion matricielle obtenue pour le limon prélevé sur le site de Limelette [4].

Fig. 6 Types de capteurs utilisés pour les mesures de succion réalisées par le CSTC. (a) Photo prise en fin d'essai et schéma de tensiomètre (www.eijkelkamp.nl); (b) Capteur à matrice granulaire (www.watermark-monitor.com).

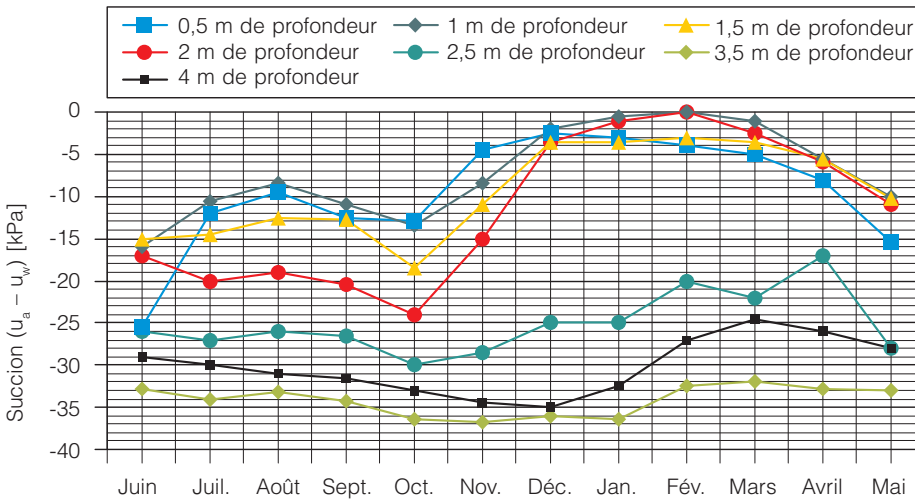
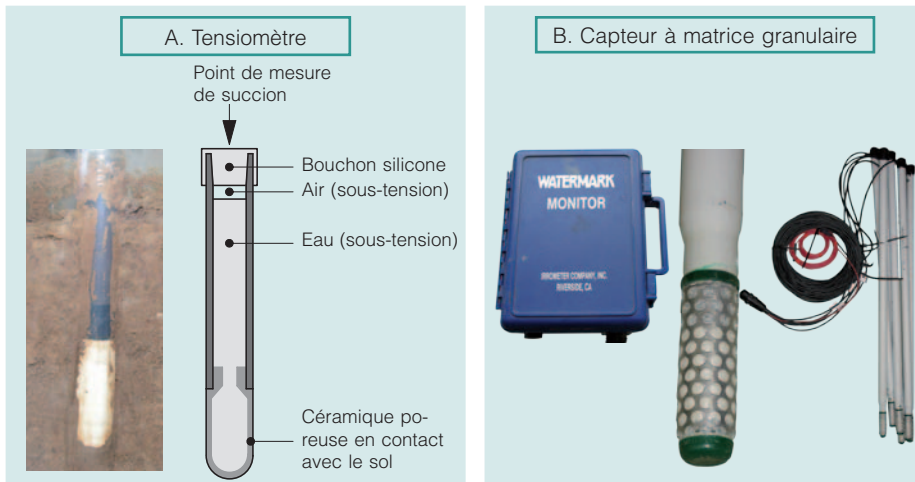


Fig. 7 Variations saisonnières des valeurs de succion mesurées sur le site de Limelette (sol limoneux) entre 0,5 et 4 m de profondeur (valeurs moyennes par mois, établies sur la base de mesures effectuées durant quatre ans).

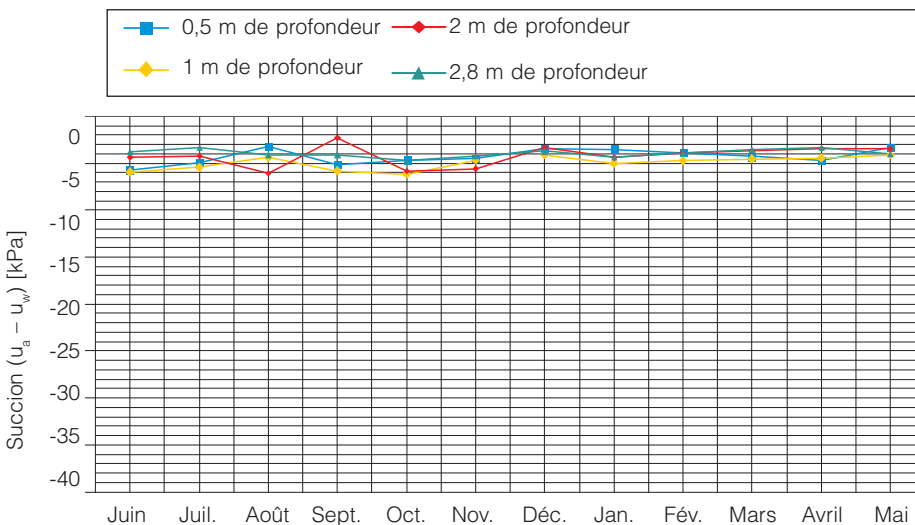


Fig. 8 Mesures de succion réalisées sur le site de Bierbeek (sol sableux) entre 0,5 et 2,8 m de profondeur (valeurs moyennes par mois, établies sur la base de mesures obtenues entre mai 2006 et juin 2007).

Notons qu'il est toujours avantageux d'installer les systèmes de mesure avant la réalisation de la fouille, de manière à pouvoir déterminer au préalable la cohésion apparente à employer dans les calculs et bénéficier de l'effet favorable de la succion dans le dimensionnement des talus et soutènements (pentes plus raides, soutènements moins coûteux).

A titre d'exemple, les figures 7 et 8 donnent les résultats de mesures de succion obtenues sur deux sites, respectivement limoneux et sableux. Ces résultats ne sont évidemment pas transposables directement à d'autres sites, mais ils permettent d'illustrer les tendances observées dans ces deux types de sols.

Dans le limon de Limelette (cf. figure 7), on distingue deux 'régimes' :

- à faible profondeur (environ moins de 2 m) : les niveaux de succion varient grandement en fonction des précipitations et de l'évapotranspiration. Ces variations sont peu visibles à la figure 7, du fait du lissage apporté par le moyennage des mesures (moyennes par mois et sur quatre ans de mesures journalières). Toutefois, les variations de succion de courte durée (moins de 15 jours) et à faible profondeur (moins de 2 m) n'ont généralement que peu d'influence sur la stabilité des pentes. Les valeurs de succion sont habituellement très faibles en période 'hivernale' (de novembre à mars), alors qu'elles peuvent atteindre jusque 25 kPa en période 'sèche' (d'avril à octobre). Sur la base du tableau de l'Annexe nationale à l'Eurocode 7 et de l'équation $tg\phi^b = 0,5 \cdot tg\phi'$, ces 25 kPa de succion correspondent à une cohésion apparente de $c_a = (u_a - u_w) \cdot 0,5 \cdot tg(25^\circ) = (25 \text{ kPa}) \cdot 0,5 \cdot tg(25^\circ) = 5,8 \text{ kPa}$.
- à grande profondeur (plus de 2 m) : on observe de faibles variations des niveaux de succion en fonction des saisons.

Dans le sable de Bierbeek (cf. figure 8), les valeurs de succion (et de cohésion apparente) sont beaucoup plus faibles (de l'ordre de 5 kPa de succion), soit sur la base du tableau de l'Annexe nationale à l'Eurocode 7 et de l'équation $tg\phi^b = 0,5 \cdot tg\phi'$, une cohésion apparente valant : $c_a = (u_a - u_w) \cdot 0,5 \cdot tg\phi' = (5 \text{ kPa}) \cdot 0,5 \cdot tg(30^\circ) = 1,4 \text{ kPa}$

Malgré la plus grande perméabilité du sable, les valeurs sont plus stables. Cela peut s'expliquer par l'allure des courbes de rétention obtenues pour les sables [8].

3 APPLICATIONS

Afin d'illustrer l'intérêt des mesures de succion pour le dimensionnement des talus et parois de soutènement provisoires, deux

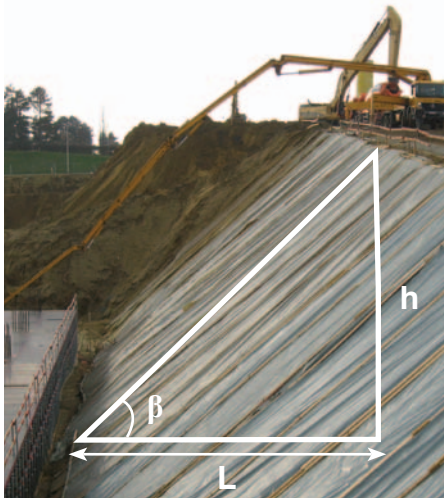


Fig. 9 Talus de Gasthuisberg (Leuven).

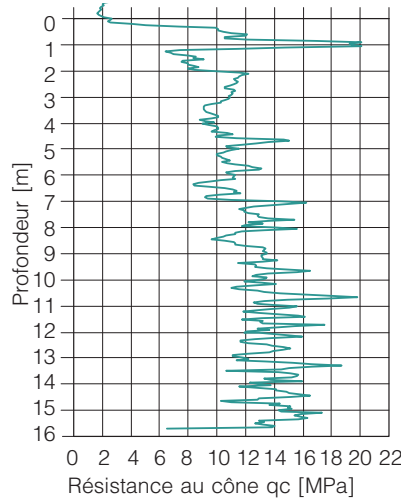
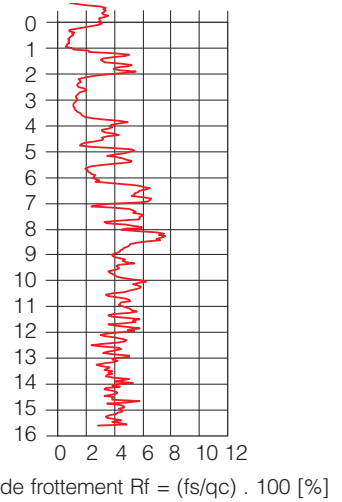


Fig. 10 Résultats de sondage CPT-E sur le site de Gasthuisberg.



Coefficient de frottement $R_f = (f_s/q_c) \cdot 100$ [%]

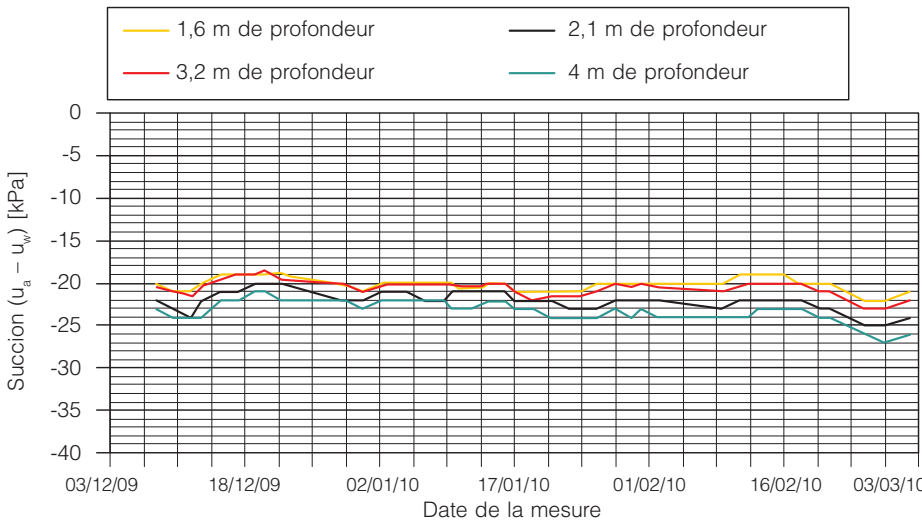


Fig. 11 Résultats des mesures de succion obtenues sur le site de Gasthuisberg (Leuven) entre 1,60 et 4 m de profondeur, pour la période du 8/12/2009 au 3/3/2010.

Pentes maximales obtenues par calcul pour un facteur de sécurité = 1 et un angle de frottement effectif φ' de 34° (β = angle, L = longueur, cf. figure 9).

Hauteur h	5 m		7 m		10 m		15 m	
	β [°]	L [m]	β [°]	L [m]	β [°]	L [m]	β [°]	L [m]
Sans prise en compte de la succion : $c_a = 0$ kPa	34	7,4	34	10,4	34	14,8	34	22,2
Avec prise en compte de la succion : $c_a = 6,7$ kPa	65	2,3	60	4	50	8,5	45	15

exemples de chantiers instrumentés sont présentés ci-dessous :

- le talus de Gasthuisberg
- la paroi de soutènement à Wetteren.

3.1 CAS 1 : TALUS DE GASTHUISBERG

Cet exemple concerne un talus sur le site

de Gasthuisberg (Leuven), représenté à la figure 9, dont le sous-sol est constitué de sable argileux glauconifère (formation de St. Huibrechts Hern et formation de Diest). Les valeurs caractéristiques des propriétés intrinsèques du sol ont été estimées à $\varphi' = 34^\circ$ et $c' = 0$ kPa. Ces valeurs sont déduites :

- d'une analyse menée par la division 'Géotechnique' du département 'Mobilité en

openbare werken' du Gouvernement flamand sur la base des essais triaxiaux disponibles pour la courbe géologique considérée

- de résultats d'essais triaxiaux réalisés à partir d'échantillons de sols prélevés sur le site même.

Un sondage CPT est donné en complément à la figure 10. Sur la base de ces seules indications, un dimensionnement par calcul ne permet pas de justifier la pente adoptée pour ce talus. Cependant, des mesures de succion réalisées entre 1,6 et 4 m de profondeur et à 0,5 m de distance par rapport au sommet du talus ont permis de mettre en évidence des niveaux de succion assez importants pour du sable (cf. figure 11). Ces valeurs peuvent s'expliquer par la teneur en argile du sol (indice de frottement élevé au CPT). La figure 11 montre par ailleurs des niveaux de succion stables, probablement grâce aux bâches mises en place sur le talus (cf. figure 9) qui protègent les parois des venues d'eaux pluviales.

Sur la base des formules exposées précédemment pour la prise en compte de la succion dans les calculs, on peut établir que ces mesures de succion correspondent à des valeurs de cohésion apparente de l'ordre de $c_a = (u_a - u_w) \cdot 0,5 \cdot \text{tg}\varphi'$
 $= (20 \text{ kPa}) \cdot 0,5 \cdot \text{tg}(34^\circ) = 6,7 \text{ kPa}$

Le tableau reprend les pentes maximales obtenues par calcul sans prise en compte de facteur de sécurité ni présence de surcharge, pour $\varphi' = 34^\circ$ et, d'une part, sans prise en compte de la succion mesurée sur le site de Gasthuisberg : $c_a = 0$ kPa, avec prise en compte et utilisation de l'équation : $\text{tg}\varphi^b = 0,5 \cdot \text{tg}\varphi'$: $c_a = 6,7$ kPa.

Selon ce tableau, la prise en compte de ces valeurs complémentaires de cohésion apparente s'avère déterminante pour le dimensionnement des talus.



Fig. 12 Paroi berlinoise de Wetteren (niveau d'excavation = 2,6 m avec une fiche de 5,5 m).

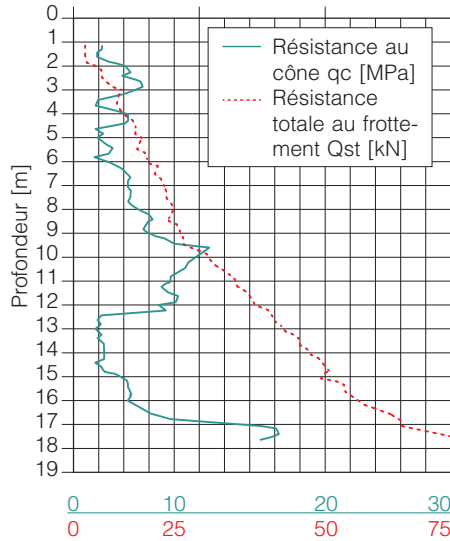


Fig. 13 Résultats de sondage CPT-M1 sur le site de Wetteren.

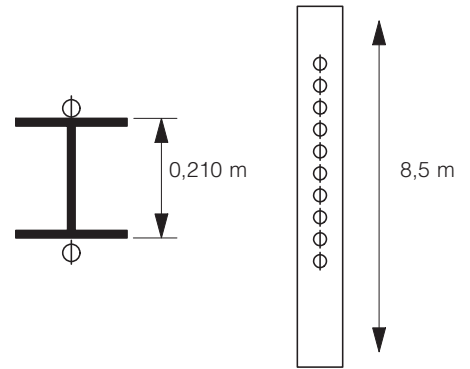


Fig. 15 Instrumentation du profilé.

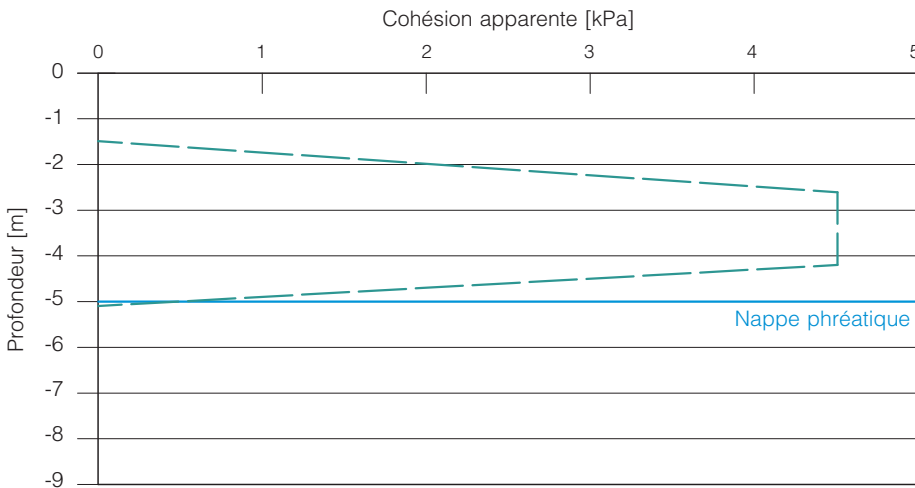


Fig. 14 Profil de cohésion apparente sur le chantier de Wetteren.

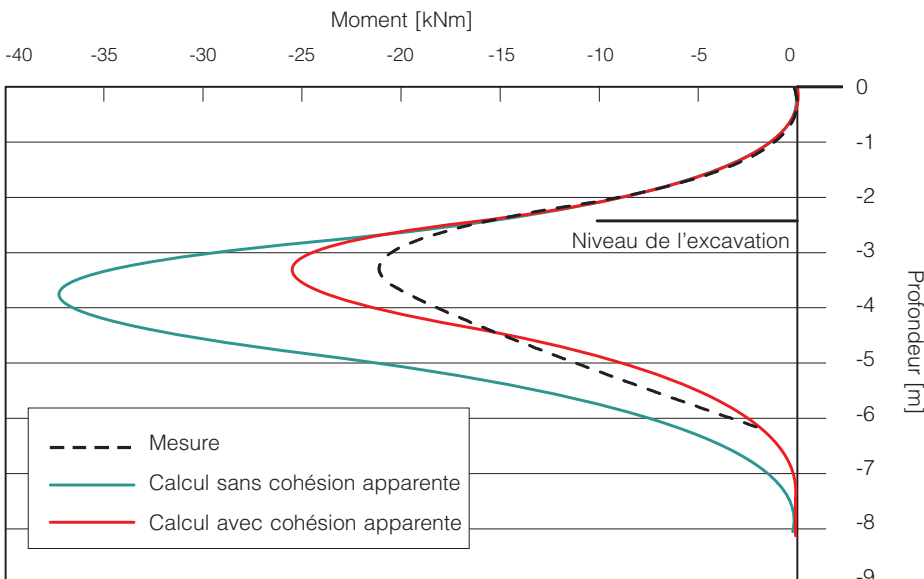


Fig. 16 Moments de flexion calculés sur la base des mesures par fibres optiques et des modélisations, avec et sans prise en compte de la succion dans le sol.

3.2 CAS 2 : PAROI DE SOUTÈNEMENT À WETTEREN

Un deuxième exemple concerne une paroi berlinoise à Wetteren, formée de profilés verticaux (HEA220) de 8,5 m et espacés de 1,6 m [1]. Entre ces profilés, des plaques en acier de 10 mm d'épaisseur sont mises en place jusqu'au niveau de l'excavation, à 2,6 m de profondeur (cf. figure 12).

Un sondage (cf. figure 13) et trois forages réalisés à proximité de la paroi ont permis de déterminer les caractéristiques du sol, constitué essentiellement de sable fin à très fin (formation de Gent).

La nappe, placée initialement à -1,7 m, a été rabattue pour la durée de l'excavation jusqu'à une profondeur oscillant entre -4,2 et -5,5 m (d'après des mesures réalisées heure par heure). Des mesures de succion effectuées à l'aide de tensiomètres placés à -1,6 m et -2,6 m ont par ailleurs permis d'établir le profil de cohésion apparente présenté à la figure 14. Ce profil de succion est basé non seulement sur les mesures de succion, mais également sur une distribution théorique de l'eau dans le sol, construite à partir des conditions limites de nappe phréatique et de surface libre, et partant de l'hypothèse que le sol peut être considéré comme relativement homogène entre -2,6 et -4,2 m.

L'un des profilés (situé au centre de la paroi pour éviter les effets de bord) a été instrumenté au moyen de fibres optiques, de façon à obtenir les niveaux de déformation de l'acier (et les contraintes correspondantes) tous les 50 cm entre -1,6 et -6,1 m (cf. figure 15). A partir des mesures de contraintes par fibres optiques réalisées de part et d'autre de ce profilé, il a été possible de calculer les moments de ce dernier

(cf. figure 16). Cette figure illustre également les moments de flexion obtenus par modélisation : sur la base de la géométrie de la paroi, des paramètres de sol, du niveau d'eau et en supposant que l'effet du sol peut être représenté par des ressorts linéaires, le modèle de calcul évalue les pressions de terre exercées sur la paroi berlinoise ainsi que les moments de flexion correspondants.

Il apparaît nettement que le calcul standard (sans prise en compte de la succion mesurée) surestime très largement les efforts de flexion dans le profilé, tandis que le calcul considérant cette succion se rapproche sensiblement des valeurs mesurées. Du point de vue de la masse de matériau nécessaire, les calculs menés sans facteur de sécurité indiquent une économie potentielle de 35 % en poids de profilés lorsque la cohésion apparente liée à la succion est prise en compte. Ce résultat est évidemment fonction des caractéristiques du site et ne

peut donc pas être transposé à d'autres chantiers sans que des mesures de succion ne soient réalisées.

4 CONCLUSION

La succion constitue un paramètre essentiel pour l'évaluation de la stabilité des fouilles ou parois de soutènement temporaires : elle permet de justifier des pentes plus raides et/ou des soutènements moins coûteux.

L'instrumentation des chantiers représente une solution simple et économique pour pouvoir prendre en compte cette succion dans les calculs. Il convient toutefois de respecter les précautions d'usage pour éviter d'importantes variations de teneur en eau dans le sol, en mettant en place des systèmes de drainage adéquats et en posant éventuellement une bâche sur le talus lorsque celui-ci est exécuté en pé-



INFORMATIONS UTILES

Les résultats présentés dans cet article ont été obtenus dans le cadre d'une recherche financée par le SPF Economie et menée par le CSTC de 2003 à 2009 en collaboration avec R. Charlier (ULg), J.-C. Verbrugge (ULB) et J. Maertens (Jan Maertens bvba & K.U.Leuven).

riode 'humide' (traditionnellement entre les mois de novembre et mars).

Si la succion est prise en compte dans les calculs, une valeur minimale de succion doit être définie en fonction des caractéristiques de l'ouvrage. Les mesures de succion doivent être également poursuivies sur toute la durée des travaux d'excavation, ceci afin de vérifier que la valeur minimale de succion ne soit jamais atteinte. ■



BIBLIOGRAPHIE

- Centre scientifique et technique de la construction
Parois de soutènement : règles de dimensionnement, d'exécution et de monitoring des systèmes de blindage traditionnels ou non . Bruxelles, CSTC, Recherche financée par le NBN, convention CC CCN/PN/NBN - 613, 2007-2009.
- Centre scientifique et technique de la construction
Stabilité des talus : méthodes de calcul avec prise en compte du degré de saturation du sol et déduction de règles pratiques pour l'exécution des tranchées et fouilles temporaires. Bruxelles, CSTC, Rapport de recherche (non publié), biennale 2003-2005.
- Centre scientifique et technique de la construction
Stabilité des talus : méthodes de calcul avec prise en compte du degré de saturation du sol, et déduction de règles pratiques pour l'exécution des tranchées et fouilles temporaires. Bruxelles, CSTC, Rapport de recherche (non publié), biennale 2005-2007.
- Fredlund D.G. et Rahardjo H.
Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York, John Wiley and Sons Inc., 1993.
- Öberg A.-L. et Sällfors G.
A Rational Approach to the Determination of the Shear Strength Parameters of Unsaturated Soils. In 'Unsaturated Soils, Sols non saturés', Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils (Paris, 6-8 septembre 1995). Rotterdam, A.A. Balkema (Alonso E.E. et Delage P.), 1995.
- Tomboy O., Whenham V., De Vos M., Charlier R., Maertens J. et Verbrugge J.-C.
Shear Strength of Unsaturated Soil and its Influence on Slope Stability. Durham, Proceedings of the First European Conference on Unsaturated Soils, 2-4 juillet 2008.
- Vanapalli S.K., Pufahl D.E. et Fredlund D.G.
Interpretation of the Shear Strength of Unsaturated Soils in Undrained Loading Conditions. Regina, Proceedings of the 52nd Canadian Geotechnical Conference, 25-27 octobre 1999.
- Whenham V.
Principes relatifs à l'exécution des fouilles. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 11, Cahier 3, 2006.
- Whenham V., De Vos M., Legrand C., Charlier R., Maertens J. et Verbrugge J.-C.
Influence of Soil Suction on Trench Stability. Weimar, 2nd International Conference on Mechanics of Unsaturated Soils, 7-9 mars 2007.