

Conductivité hydraulique des matériaux de fondation de chaussées partiellement saturés

PROBLÉMATIQUE

Les exigences relatives aux matériaux de fondation s'appliquent aux caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats et non à la capacité de drainage du matériau, d'une part parce que la mesure de la conductivité hydraulique (ou perméabilité) était difficilement réalisable en condition non saturée (ce qui est généralement le cas dans une chaussée), et d'autre part parce qu'on ne discerne pas tous les effets du drainage sur le comportement de la chaussée. On obtient cependant une certaine capacité de drainage en imposant des exigences relatives à la granulométrie d'un matériau et à la nature des particules fines. L'étude dont il est ici question, réalisée par l'Université Laval en collaboration avec le Service des matériaux de chaussées, montre qu'il est possible de mesurer en laboratoire la conductivité hydraulique des matériaux de fondation à différents degrés de saturation. On peut aussi mieux comprendre le comportement des matériaux sous sollicitation ainsi que les interactions entre les paramètres de drainage des matériaux, la teneur et la nature des particules fines.

TRAVAUX RÉALISÉS

Dans un matériau non saturé qui se draine, la phase liquide (eau) est soumise à une pression interstitielle négative appelée : « succion matricielle »; plus le matériau s'assèche, plus la succion augmente, et plus la conductivité hydraulique est réduite. Le coefficient de conductivité hydraulique est ainsi fortement dépendant de la teneur en eau ou de la succion. La relation qui existe entre la teneur en eau et la succion matricielle est communément appelée : « courbe caractéristique de rétention d'eau » (figure 1). Cette relation dépend de la nature des matériaux, de la forme et de la dimension des particules, ainsi que de la teneur en particules fines ; elle permet d'évaluer la pression d'entrée d'air qui correspond à la succion quand la phase gazeuse (air) commence à investir le milieu poreux et que le drainage commence à se faire, ainsi que la teneur en eau résiduelle correspondant au point où la phase liquide est désormais discontinuée dans le milieu poreux. À des teneurs inférieures à la teneur en eau résiduelle, l'eau est soumise aux forces capillaires d'attraction responsables de la remontée capillaire dans le matériau.

La succion est mesurée au moyen de tensiomètres fabriqués avec des bougies poreuses, et la teneur en eau est mesurée au moyen de sondes électromagnétiques TDR (*time domain reflectometry*) qui déterminent la constante diélectrique du matériau. Cette instrumentation a été disposée à trois hauteurs différentes dans un moule de compactage de 305 mm de diamètre pour permettre la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau d'un matériau. Les courbes

ont été déterminées pour trois matériaux de fondation MG-20 de nature différente, c'est-à-dire une pierre granitique, une pierre calcaire et un gravier schisteux. Pour chacun de ces matériaux, trois granularités différentes ont été analysées avec des teneurs en particules fines de 2 %, 7 % et 12 %. Les échantillons densifiés à un degré correspondant à l'optimum Proctor sont d'abord soumis à une phase de saturation, puis ensuite à une phase de séchage et à une phase d'imbibition pendant lesquelles la teneur en eau est mesurée en fonction de la succion matricielle.

Un modèle mathématique basé sur la théorie de la distribution du volume des pores a été retenu pour le calcul de la conductivité hydraulique à différents degrés de saturation à partir des données de la courbe caractéristique de rétention d'eau. La mesure en laboratoire de la conductivité hydraulique initiale à fort degré de saturation a été réalisée au moyen de la procédure d'essai LC 22-322.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les courbes caractéristiques de rétention d'eau sont tracées pour chacun des échantillons (matériaux schisteux à la figure 2), et les coefficients de conductivité hydraulique sont calculés en fonction du degré de saturation (figure 3). L'analyse des résultats montre que :

- pour une même source de granulats, la pression d'entrée d'air et la teneur en eau résiduelle augmentent lorsque la teneur en fines augmente. Une valeur de la pression d'entrée d'air élevée témoigne d'une remontée capillaire plus élevée dans le matériau. Les matériaux plus fins (haut du fuseau), qui entraînent des suctions plus élevées que les matériaux grossiers (bas du fuseau), présentent une capacité de drainage plus faible et une remontée capillaire plus grande;
- pour un pourcentage de fines élevé, les matériaux granitiques sont les plus drainants; viennent ensuite les matériaux schisteux, alors que les matériaux calcaires sont les moins drainants. Ces résultats s'accordent bien avec les résultats de l'essai de la valeur au bleu des matériaux;
- le matériau calcaire à 7 % de fines s'est montré moins drainant que le matériau schisteux à 12 % et que le matériau granitique à 12 % (figure 3);
- l'augmentation de la pression d'entrée d'air entraîne une diminution de la conductivité hydraulique du matériau; la remontée capillaire, qui dépend aussi de la granulométrie, est plus grande si les fines sont argileuses que si elles ne le sont pas;
- l'effet d'hystérésis (mouillage) ne se manifeste que pour les matériaux à forte teneur en fines et confirme que la conductivité hydraulique augmente avec la diminution de la succion;

– la conductivité hydraulique d'un matériau diminue généralement d'un ordre de grandeur 10x pour une teneur en particules fines augmentant de 2% ; elle dépend non seulement de la granulométrie mais aussi de la nature du matériau. La conductivité hydraulique chute de façon importante quand le degré de saturation diminue et que la succion matricielle se développe.

DISCUSSION

Il est admis que l'application de contraintes sur un matériau possédant des degrés de saturation supérieurs à 80 % entraîne directement une augmentation des pressions interstitielles. À ces degrés de saturation, les pressions appliquées sont alors transmises à l'eau interstitielle, ce qui entraîne une diminution de la capacité de support du matériau et cause la dégradation de la chaussée. Si la fondation est saturée à la période de dégel, il faut donc que le matériau possède une forte capacité de drainage pour atteindre rapidement des degrés de saturation inférieurs à 80 %, ce qui est généralement le cas en cours d'année. Les matériaux aptes à offrir un bon drainage présentent une pente abrupte de la courbe caractéristique de rétention d'eau et une faible pression d'entrée d'air, donc une conductivité hydraulique élevée (autant dans des conditions de saturation que de non-saturation) ; ils maintiennent une portance élevée parce qu'ils se drainent rapidement sans grande augmentation de la succion matricielle.

Si l'écart entre l'élévation de la nappe phréatique et celle de la fondation est faible, inférieur à la pression d'entrée d'air exprimée en hauteur d'eau (1 kPa \approx 10 cm d'eau), la remontée capillaire sera élevée lorsque la capacité de drainage de la fondation est faible. Celle-ci demeurera saturée tout en conservant une forte succion matricielle; le trafic lourd peut faire varier cet état de pression par de très légers changements de volume, et il y aura génération de pressions interstitielles positives diminuant la capacité de support des matériaux.

CONCLUSION

L'évolution des courbes caractéristiques de rétention d'eau et des courbes de conductivité hydraulique montre l'influence de la quantité et de la nature des particules fines. Cette étude montre que les paramètres qui contrôlent le drainage des fondations sont la conductivité hydraulique quasi saturée (à fort degré de saturation), la pression d'entrée d'air, qui influence la remontée capillaire, et la teneur en eau résiduelle, qui détermine la quantité d'eau drainable à faible succion matricielle. Il a aussi été mis en évidence que la diminution de la conductivité hydraulique quasi saturée, pour les trois types de matériaux étudiés, est accompagnée d'une augmentation de la pression d'entrée d'air et de la teneur en eau résiduelle.

À partir des courbes caractéristiques de rétention d'eau et des courbes de conductivité hydraulique établies en fonction du degré de saturation, il est possible d'étudier le comportement hydrique des matériaux de fondation; des études sont encore en cours. Les propriétés hydrauliques mesurées en laboratoire peuvent être différentes de celles observées *in situ*; il est donc souhaitable d'instrumenter quelques sites afin de suivre l'évolution hydrique des matériaux sous différentes conditions climatiques et de réaliser des simulations d'écoulement par méthodes numériques.

RÉFÉRENCE

Côté, J. et Roy, M.; « Conductivité hydraulique de matériaux de fondations de chaussées partiellement saturés » *Rapport GCS-97-07* soumis par l'Université Laval au ministère des Transports du Québec,

août 1997, 165 pages, ou *Recueil des communications du 32^e Congrès annuel, AQTR*, p. 317-335.

RESPONSABLE: Claude Robert, ing., M.Sc.
Service des matériaux de chaussées

DIRECTEUR : _____
Pierre La Fontaine, ing.

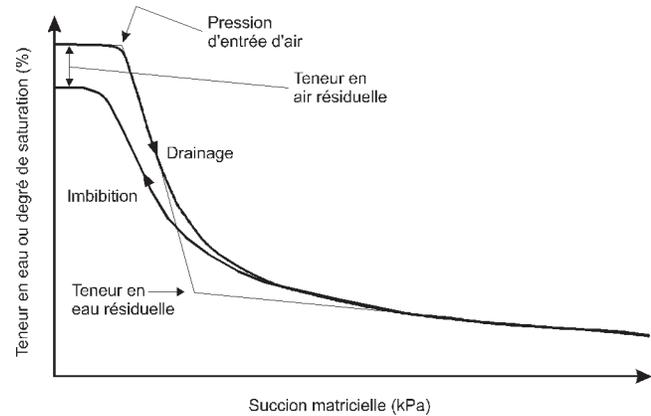


Figure 1 : schéma de la courbe caractéristique de rétention d'eau

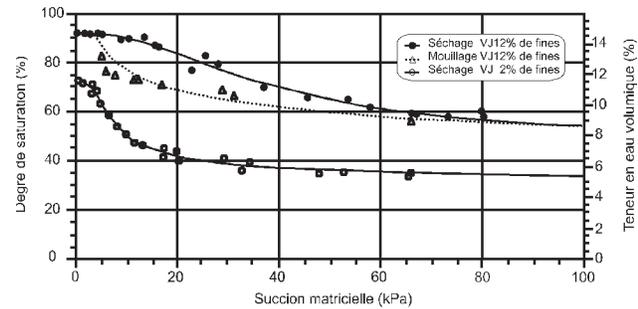


Figure 2 : courbes caractéristiques de rétention d'eau pour les matériaux schisteux

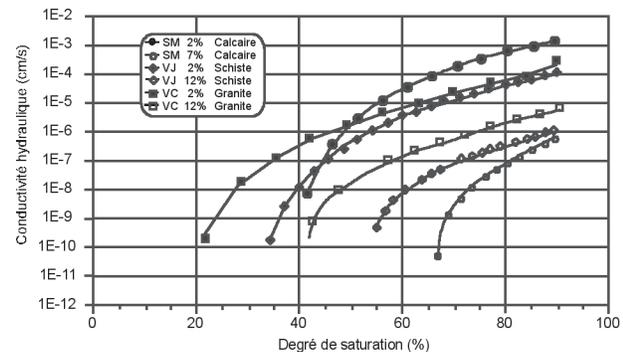


Figure 3 : conductivité hydraulique pour les matériaux calcaires, schisteux et granitiques