Chapitre 3

HYDRAULIQUE DES SOLS

Dans ce chapitre nous étudierons les écoulements permanents dans un sol saturé.

3.1 - DÉFINITIONS

3.1.1 - Vitesse de l'eau dans le sol

Par définition, la vitesse apparente est la valeur $v = Q/S$, rapport du débit de l'eau écoulée à la section de l'échantillon de sol. En fait, la vitesse réelle (entre les grains) moyenne est v/n où n est la porosité, mais il est plus simple de raisonner sur la vitesse apparente. Dans ce qui suit, v représentera toujours la vitesse apparente.

3.1.2 - Charge hydraulique en un point

Considérons un point situé dans un massif saturé siège d'un écoulement permanent. Soit u la pression de l'eau en ce point et z sa cote par rapport à un repère quelconque. La charge hydraulique en ce point, est par définition : $h = u / \gamma_w + z - v^2 / (2.g)$.

Or les vitesses dans les sols sont toujours faibles rendant négligeable le terme en $v^2 / 2g$. D'où : $h \approx u / \gamma_w + z$.

3.1.3 - Gradient hydraulique

Dans un écoulement uniforme et unidirectionnel, le gradient i est par définition le rapport de la différence de charge h à la longueur L du trajet de l'eau dans le sol (cf. figure 8).

Dans un écoulement quelconque, le gradient hydraulique en M est le vecteur $\vec{i}$ de composantes $-\frac{\partial h}{\partial x}, -\frac{\partial h}{\partial y}, -\frac{\partial h}{\partial z}$ (où h est la charge en M).

Si M' est infiniment proche de M : $dh = -\vec{i}.\overrightarrow{MM'} = -\vec{i}.\overrightarrow{dM}$.

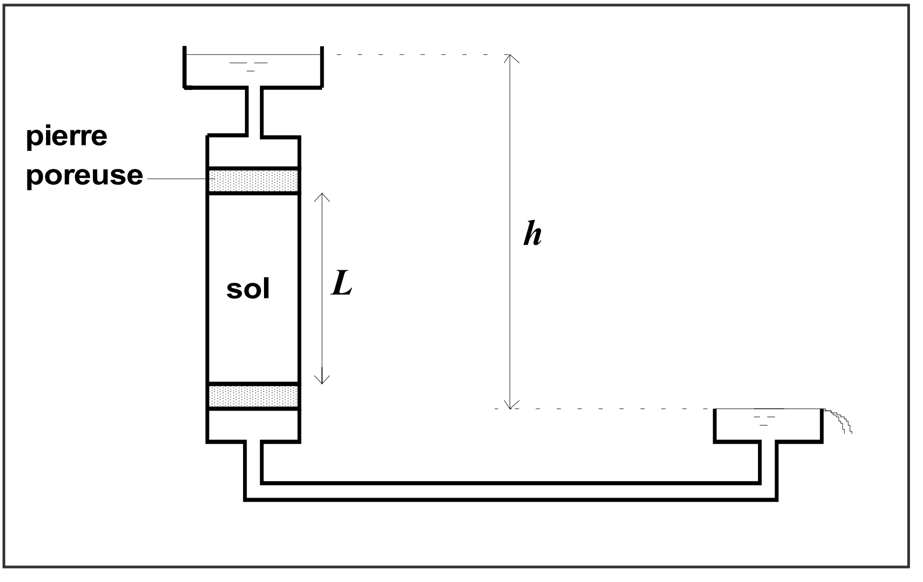


Figure 8 - échantillon de sol soumis à un gradient hydraulique $i = h/L$

3.2 - PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES SOLS

3.2.1 - Loi de Darcy

Cette relation fondamentale s'écrit : $\vec{v} = k.\vec{i}$ où k est le coefficient de perméabilité du sol. Il vaut de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-10} m/s pour une argile et 10^{-4} à 10^{-6} m/s pour un sable.

3.2.2 - Equipotentielles et lignes de courant

Les équipotentielles sont les lignes où la charge h est constante. Elles sont orthogonales aux lignes de courant puisque si $dh = 0$, alors $\vec{i}.dM = 0$ (cf. figure 9).

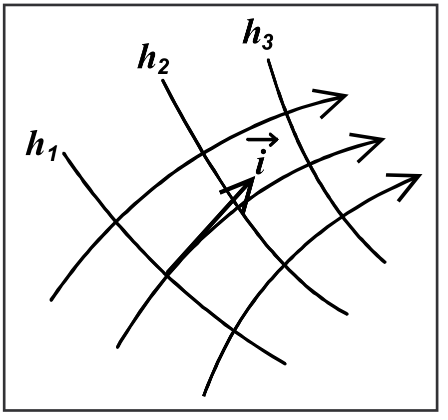


Figure 9 - réseau de lignes de courant et d'équipotentielles

3.2.3 - Cas d'un barrage à drain horizontal sur substratum imperméable

Considérons un barrage drainé horizontalement, en situation d'écoulement permanent. Nous disposons de deux conditions aux limites en régime permanent (cf. figure 10) : $h = H$ le long du parement amont AB et $h = z$ le long de BC (courbe de saturation).

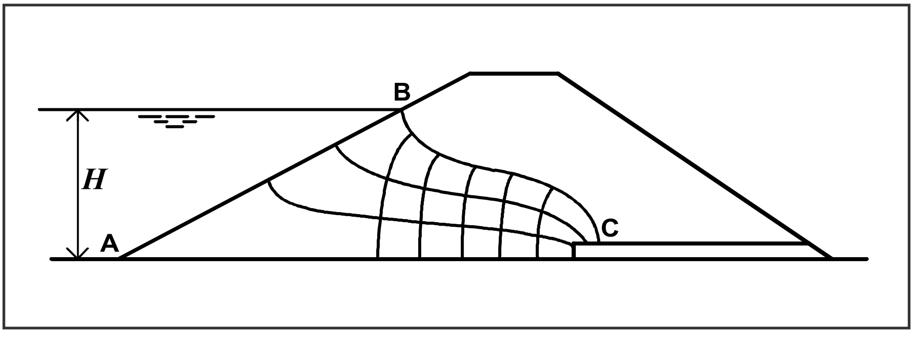


Figure 10 - saturation d'un barrage en terre

Le potentiel est nul au niveau du drain. La courbe de saturation et le contact avec la fondation sont des lignes de courant. D'où l'allure du tracé de la figure 10.

Le débit de fuite total se calcule en sommant les débits de fuite dans chaque tube de courant où l'on applique la loi de Darcy.

Pour des raisons pédagogiques, nous avons montré l'exemple d'un drain horizontal dans un milieu isotrope. Or, les conditions de formation des sols (dépôts stratifiés) ou de construction des remblais (par couches compactées) conduisent le plus souvent à une forte anisotropie du sol avec des perméabilités beaucoup plus fortes dans la direction horizontale (voir § 3.2.7). Pour éviter tout risque de contournement du drain en cas d'anisotropie, il est vivement recommandé de construire un drain vertical entre la base du remblai et le niveau normal des eaux plus 0,20 à 0,30 m. Le lecteur pourra se reporter à ce sujet au manuel de recommandations du Comité français des grands barrages cité en bibliographie.

3.2.4 - Forces d'écoulement et forces de pesanteur dans un sol saturé

La force de pesanteur appliquée à un grain de volume unité est un vecteur vertical descendant de module : $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w)/(1+e)$, formule déjà rencontrée au paragraphe 2.1.

La force d'écoulement est : $\gamma_w.\vec{i}$. Elle est tangente à la ligne de courant. Voir figure 11.

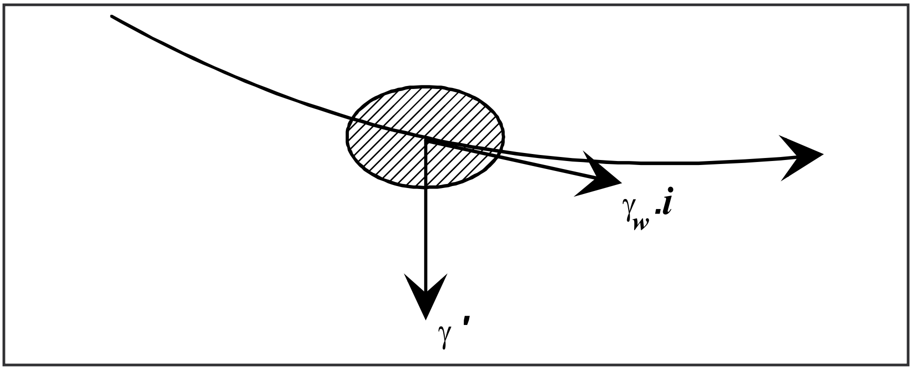


Figure 11 - forces appliquées à un grain de sol

3.2.5 - Gradient critique ; renard

Un phénomène de renard intervient lorsque la force d'écoulement est ascendante et de module supérieur au module de la force de pesanteur, c'est à dire si $\gamma_w . i > \gamma '$. D'où le gradient critique : $i_c = \gamma' / \gamma_w$. Pour un sable d'indice des vides 0,7 : $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} \approx \frac{27-10}{1,7} = 10$ kN/m^3. Le gradient critique vaut donc dans ce cas $i_c = 1$. Sur la figure 12 ci-après, $i = h/(2.L)$ et le renard apparaît lorsque le rabattement de l'eau dans l'enceinte atteint $h = 2. L$.

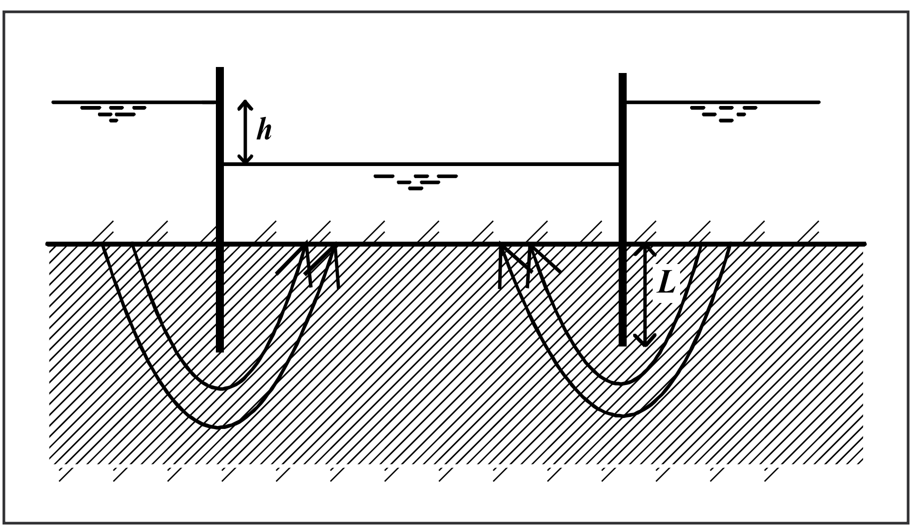


Figure 12 - écoulement sous une enceinte en palplanches

3.2.6 - Mesure de la perméabilité

- *Au laboratoire,* la perméabilité se mesure au perméamètre (dont le principe est en figure 8) :

  - à charge constante si l'on mesure le débit nécessaire pour maintenir plein le réservoir haut ;

  - à charge variable si l'on mesure, en fonction du temps, la descente dans le tube (situé sous le réservoir haut).

- *In situ*, l'essai classique (norme NFP 94-130) consiste à pomper dans un forage, avec un débit constant jusqu'à ce qu'un régime permanent soit atteint (h= constante).

On démontre que, lors de l'essai de rabattement en régime permanent, le coefficient de perméabilité est obtenu par la formule :

$k = Q\dfrac{\ln(R/r)}{\pi(H^2 - h^2)}$, les hauteurs h et H étant mesurées par rapport au substratum imperméable (cf. figure 13).

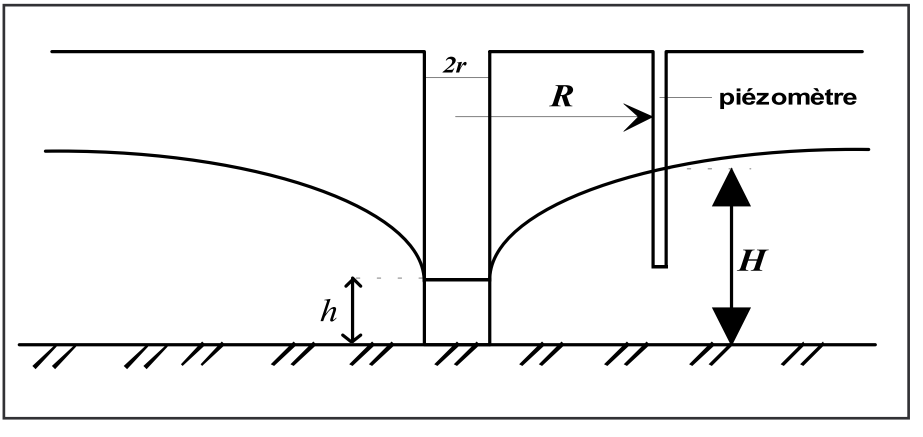


Figure 13 - rabattement d'une nappe

Dans les sols perméables sous la nappe, on pratique également l'essai Lefranc (norme NFP 94-132) : pompage ou injection à débit constant dans un forage et mesure de la variation de la charge avec le temps. Dans les massifs rocheux, on pratique l'essai Lugeon (norme NFP 94-131) : injection d'eau sous pression constante dans un forage.

3.2.7 - Cas des milieux anisotropes

Lorsque le milieu est anisotrope $(k_h \neq k_v)$, un changement d'unité sur l'axe des z défini par $z' = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}.z$ permet de se ramener au cas d'un milieu isotrope. Dans un remblai argileux compacté, il n'est pas rare de constater que k_h est 10 à 100 fois supérieur à k_v. Cela est dû au mode de mise en œuvre par couches horizontales compactées. Une scarification entre couches permet d'éviter une trop forte anisotropie.

3.3 - RÈGLES DE FILTRE

Sous l'effet de la circulation de l'eau, les particules de sol peuvent migrer vers une zone de sol plus grossier. C'est par exemple ce qui peut se produire entre le remblai d'un barrage et le matériau drainant. Pour l'éviter, deux zones successives d'un ouvrage hydraulique doivent vérifier des **conditions de filtre** qui sont des règles granulométriques. En pratique, les conditions de filtre ne sont pas faciles à respecter entre ces deux matériaux et l'on interpose, le plus souvent, un matériau de granulométrie intermédiaire, appelé filtre. Les conditions explicitées ci-après doivent être vérifiées aux deux interfaces : entre matériau fin du remblai et filtre puis entre filtre et drain. Dans chaque cas, D désigne la taille des grains du matériau le plus grossier et d celle des plus fins.

- Lorsque un matériau fin à granulométrie continue est en contact dans un ouvrage hydraulique avec un matériau uniforme (drain ou filtre), leurs granulométries doivent répondre aux conditions suivantes :

. condition de non entraînement des fines : $D_{15} < 5.d_{85}$ [1] ;

. condition de perméabilité : $D_{15} > 0,1$ mm ;

. coefficient d'uniformité des filtres et des drains compris entre 2 et 8.

On impose aussi le plus souvent une condition de propreté pour le matériau constitutif d'un drain, condition qui s'écrit par exemple : $D_{05} > 0,08$ mm.

- La condition de filtre au contact entre deux matériaux très uniformes ($D_{60}/D_{10} < 3$ et $d_{60}/d_{10} < 3$), - ce qui est le cas entre le filtre et le drain - s'écrit : $5.d_{50} < D_{50} < 10.d_{50}$.
- Pour réaliser le drain vertical d'un petit barrage en terre, il est habituel de recreuser plusieurs couches du matériau fin compacté pour y déverser un sable considéré comme drainant et auto filtrant (pas de filtre entre ce sable et le matériau du remblai). On recommande dans ce cas de choisir un sable 0-5 mm vérifiant : $D_{05} > 0,08$ mm (propreté) et $D_{15} > 0,1$ mm (perméabilité).
- Enfin, un sol très gradué ($d_{60}/d_{10} > 16$) et à granulométrie discontinue présente des risques d'érosion interne de sa partie fine sous l'effet des circulations d'eau. Le filtre contigu à ce matériau doit donc être déterminé avec le d_{85} de la partie inférieure de la courbe granulométrique du sol, après le changement de pente (cf. figure 14).

[1] D_a et d_b sont les diamètres des tamis laissant passer respectivement a % en poids du matériau le plus grossier et b% en poids du matériau le plus fin.

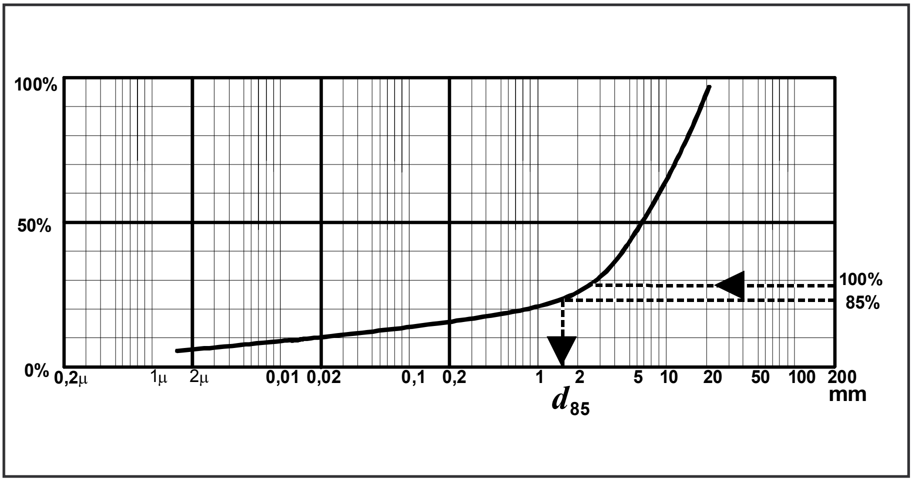
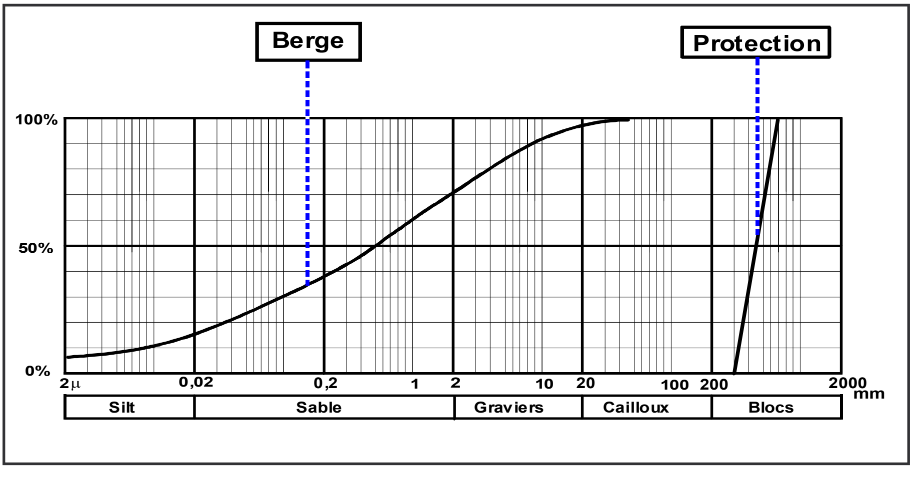


Figure 14 - Cas d'un sol à granulométrie discontinue

Exercice : dimensionnement de la transition granulométrique d'une protection de berge en enrochements.

Soit une berge sableuse dont la courbe granulométrique est représentée ci-dessous et une protection contre l'érosion par le courant constituée de blocs 300-700 mm (c'est-à-dire 50-400 kg).



1 – Nécessité d'une transition

Une transition est nécessaire si d_{15}(protection)> 5.d_{85}(berge).

Ici : d_{85}(berge)= 5 mm et d_{15}(protection) = 350 mm.

350 > 5 x 5 = 25. La condition n'est pas satisfaite, et de loin. Une transition est donc nécessaire.

2 – Condition sur le d_{50} de la transition

La transition et la protection étant uniformes, la condition à respecter est : *5.*d_{50}(transition) **<** d_{50}(protection) < *10.*d_{50}(transition).

D'où *5.*d_{50}(transition) < 450 mm < *10.*d_{50}(transition), soit

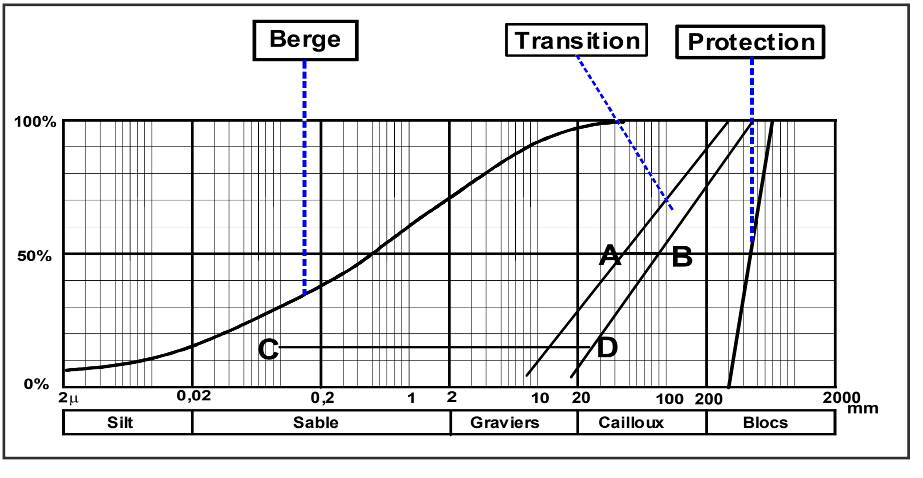
45 mm < d_{50}(transition)< 90 mm (segment AB sur le graphique ci-après).

3 – Condition sur le d_{15} de la transition

0,1 mm < d_{15}(transition) < *5.* d_{85}(berge)

Soit 0,1 mm < d_{15}(transition) < 5x5 = 25 mm (segment CD).

Le fuseau représenté ci-après convient car en outre d_{60}/d_{10} = 6 ou 7 est bien compris entre 2 et 8.



3.4 - APPLICATIONS DE CE CHAPITRE

• Calcul du débit de fuite, dans un barrage en terre, sous un réseau de palplanches, etc.

• Vérification de la stabilité au renard dans un massif de sol qui est le siège de circulations d'eau, par exemple une digue de canal.

• Définition des fuseaux granulométriques des drains et des filtres dans un barrage en terre.

• Calcul de la transition granulométrique d'une protection de berges ou d'une protection anti batillage d'un parement amont de barrage.

• Calcul du rayon d'action d'un forage pour l'eau potable.