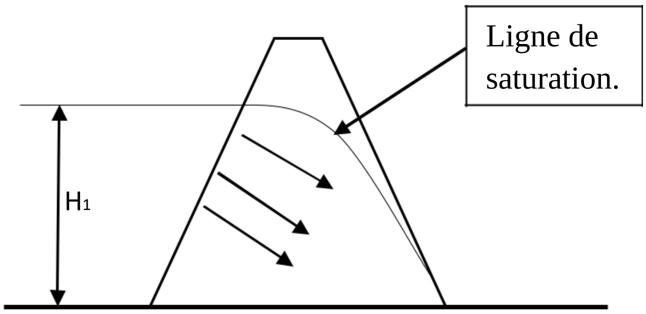
ETUDE DES INFILTRATIONS A TRAVERS LE BARRAGE EN TERRE ET SES FONDATIONS.

1- Généralités.

1-1 Objectifs de l'étude.

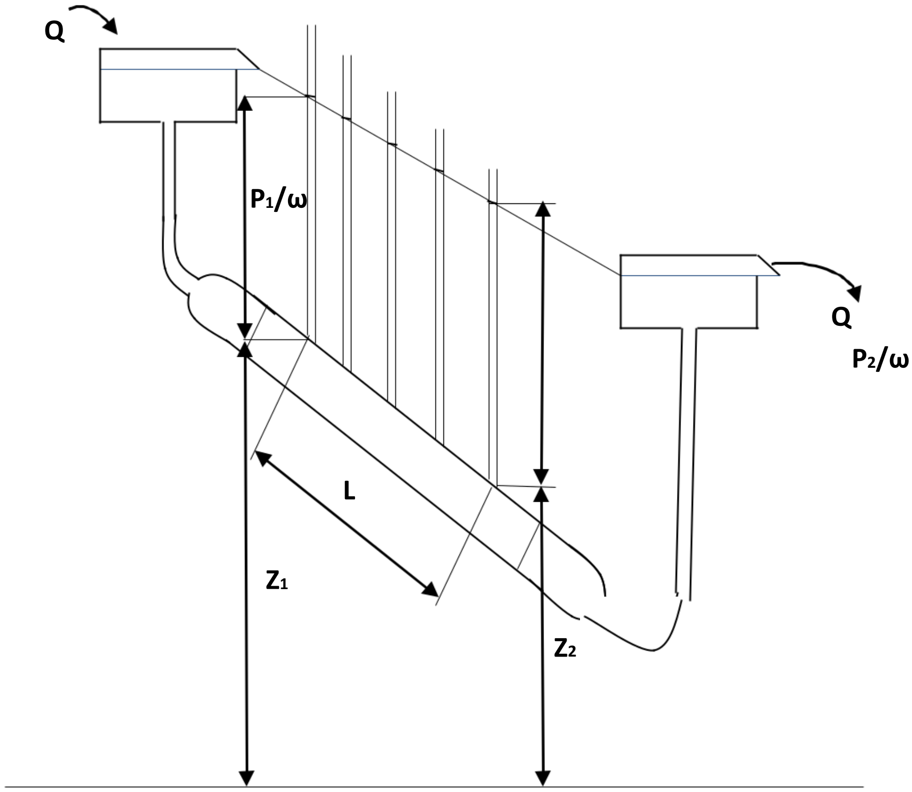
Les infiltrations dans le corps du barrage et sa fondation sont dues à la charge hydraulique au bief amont. Ces infiltrations sont directement ou indirectement les causes de plus de 50%, des avaries survenues sur les barrages à travers le monde, c'est pour cette raison qu'une attention particulière doit être accordée à l'étude de ce phénomène.



Le calcul des infiltrations dans un barrage en terre doit permettre de solutionner trois problèmes:

- Déterminer le tracé de ce qu'on appelle habituellement la ligne phréatique, il s'agit en fait de surface (ligne en coupole transversale) le long de laquelle la pression hydrostatique de l'eau d'infiltration est nulle (cette surface phréatique est distincte de la surface de saturation et la différence entre les deux étant la hauteur d'élévation capillaire).
- Déterminer la pression de l'eau interstitielle qui nécessite la précision de la surface de pression nulle et le potentiel en chaque point.
- Déterminer le débit d'infiltration qui est le débit de fuite à travers le barrage et sa fondation afin de prouver qu'il est admissible et n'enclenche pas le phénomène de renard.

1-2 Expérience de perméabilité et loi de Darcy.



En réalisant l'expérience suivant le schéma ci-dessus où l'eau s'écoule à travers un sable fin sélectionné, nous remarquons que le débit d'écoulement est proportionnel à la pente de la droite passant par les niveaux des piézomètres.

$$Q = a.\frac{h_1 - h_2}{L}$$

Si on change la section (A) du tube utilisé, on remarque que les débits correspondants à une même pente des niveaux piézométriques sont proportionnels à l'aire du tube.

$$Q = b.S$$

De ce qui précède nous pouvons écrire l'expression.

$$\frac{Q}{SL} = K.\frac{h_1 - h_2}{}$$

K- ne dépend que du milieu poreux et du liquide qui s'écoule dans le sable.

$$h = \frac{P}{\varpi} + z$$

C'est la hauteur dans les piézomètres correspondant à la pression à la base mesurée à partir d'une référence.

La pente de la ligne des niveaux piézométrique est le gradient de la charge hydraulique qui peut s'écrire:

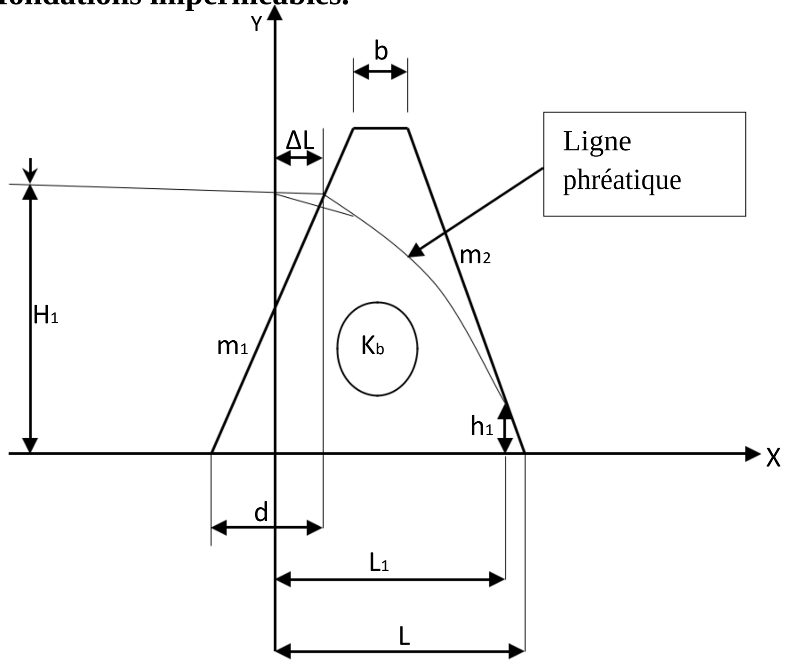
$$J = \frac{d\varphi}{dL} = \frac{dh}{dL} = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

De ce qui précède nous pouvons écrire:

$$\frac{Q}{A} = V = -K.J = -K\frac{d\varphi}{dL}$$

Cette expression représente la forme élémentaire de la loi de darcy et le signe moins exprime le fait que l'écoulement se fait dans le sens de la charge décroissante. Cette loi présente des limites de validité en restant valable jusqu'à un nombre de Reynolds limite compris entre 1 et 10 environ c'est-à-dire tant que l'écoulement reste uniforme

2- Infiltration à travers un barrage en terre homogène sans drainage sur des fondations imperméables.



- Dans le cas de l'absence de l'eau à l'aval, l'équation de la ligne phréatique peut s'écrire :

$$\frac{q}{K} = \frac{H_1^2 - y^2}{2.x} \quad \text{Ou} \quad y^2 = H_1^2 - 2\frac{q}{K}.x$$

Avec: q- débit d’infiltration par mètre de longueur du barrage (m^3/s.ml).

K- perméabilité du barrage (en m/s).

H_1- charge d’eau à l’amont du barrage (en m).

Cette ligne phréatique peut être donc représentée par l’équation théorique d’une parabole appelée Parabole de Kozeny. Seulement cette équation reste valable dans sa partie médiane et doit être corrigée au droit du parement amont car elle s’écarte de la ligne pratique. La distance (ΔL) entre l’intersection de la ligne pratique et la ligne théorique au niveau du plan d’eau peut être calculée par des formules empiriques:

D’après **Mikhaïlov.**

$$\Delta L = \lambda.H_1 = \frac{m_1}{2m_1 + 1} H_1$$

D’après **Kozeny.**

$$\Delta L = 0{,}3d = 0{,}3.m_1 H_1$$

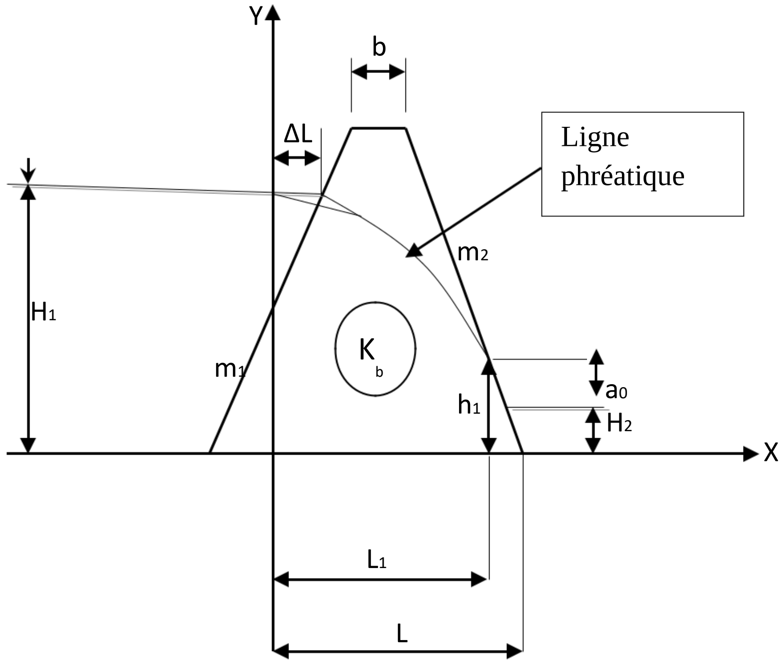
La hauteur h_1 est calculée d’après l’expression dite de Pavlovski.

$$h_1 = \frac{L}{m_2} - \sqrt{\frac{L^2}{m_2^2} - H_1^2}$$

Le calcul du débit peut se faire d’après l’équation:

$$q = K\frac{H_1^2 - h_1^2}{2L_1}$$

- Dans le cas de la présence de l'eau à l'aval.



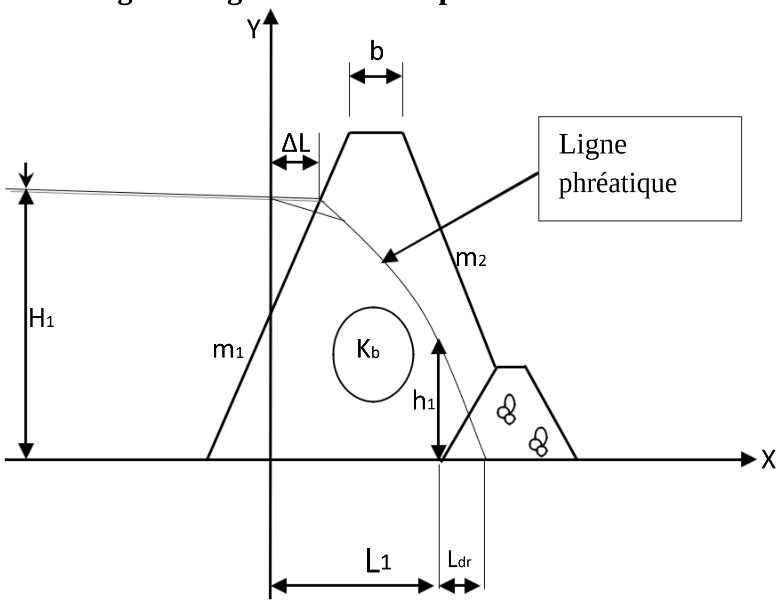
D'après **Zamarine.**

$$a_0 = h_1 - H_2 = \frac{L}{m_2} - \sqrt{\frac{L^2}{m_2^2} - (H_1 - H_2)^2}$$

Le débit est calculé par l'expression:

$$q = K\,\frac{H_1^2 - h_1^2}{2(L - m_2 h_1)}$$

3- Barrage homogène avec drain prisme sur des fondations imperméables.



La hauteur (h_1) au début du drain prisme est calculée par l'expression:

$$h_1 = 2L_{dr} \sqrt{L_1^2 + H_1^2} - L_1$$

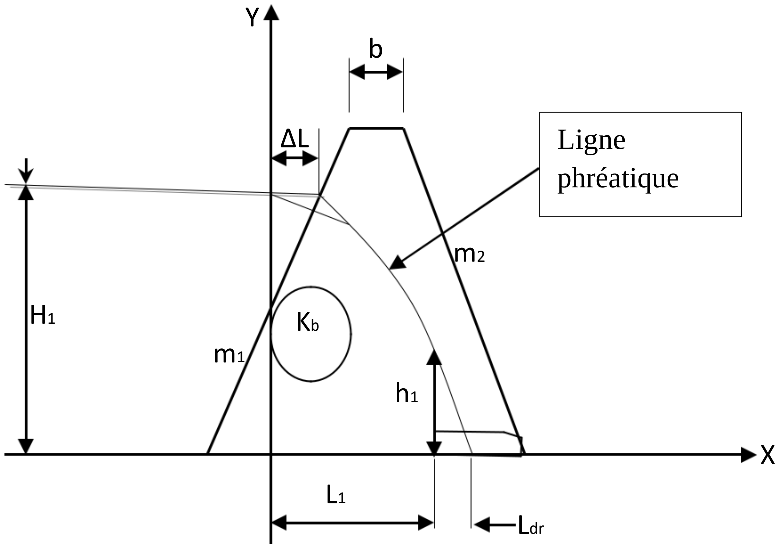
L'équation de la ligne phréatique peut s'écrire:

$$2\frac{q}{K}x = \left(H_1^2 - y^2\right)$$

Le débit d'infiltration est calculé par:

$$q = K\frac{H_1^2 - h_1^2}{2L_1}$$

4- Barrage homogène avec drain tapis interne sur des fondations imperméables.



La hauteur au début du drain tapis est calculée par:

$$h_1 = \sqrt{L_1^2 + H_1^2} - L_1$$

La ligne de saturation peut être tracée d'après l'équation:

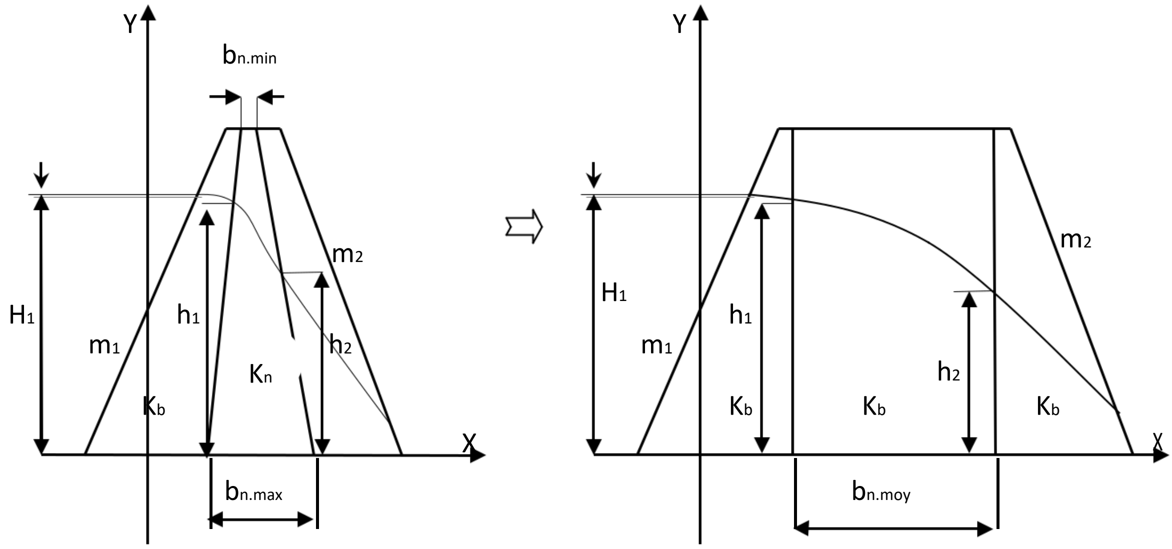
$$2\frac{q}{K}x = H_1^2 - y^2$$

Le débit est calculé par:

$$q = K\frac{H_1^2 - h_1^2}{2L_1} = \frac{H_1^2}{2\left(L_1 + L_{dr}\right)}$$

5- Infiltration à travers un barrage en terre avec organe d'étanchéité sur des fondations imperméables.

Pour faire le calcul des infiltrations à travers un tel barrage, on peut le transformer en barrage homogène et le calculer ainsi.



Pour la transformation de ce barrage, on commence par calculer l'épaisseur du noyau à parements verticaux :

$$\frac{b_{n.min} + b_{n.max}}{2}$$

Après, on détermine l'épaisseur moyenne du noyau qui jouerait le même rôle mais avec une perméabilité égale à celle du barrage.

$$b_{n.moy} = \frac{b_{n.min} + b_{n.max}}{2} \cdot \frac{K_b}{K_n}$$

Une fois la transformation terminée, on calcule le barrage ainsi obtenu comme un barrage homogène pour déterminer h_1 et h2 qui sont directement portées sur le barrage réel.

6- Etudes des infiltrations dans les barrages en terre sur des fondations perméables.

6-1 Cas du barrage homogène en terre sans drainage.

Dans ce cas on peut utiliser la méthode de Pavlovski qui propose de calculer le débit d'infiltration total (Q) comme la somme des deux débits :

Q_1- débit d'infiltration du même barrage sur des fondations imperméables.

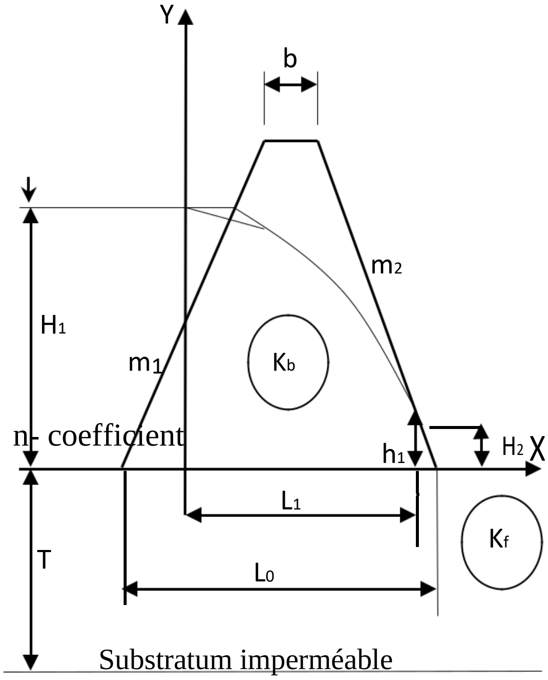
Q_2- débit d'infiltration des fondations perméables sous un même barrage imperméable.

$Q=Q_1+Q_2$

$$Q_1 = K_b \cdot \frac{H_1^2 - h_1^2}{2L_1}$$

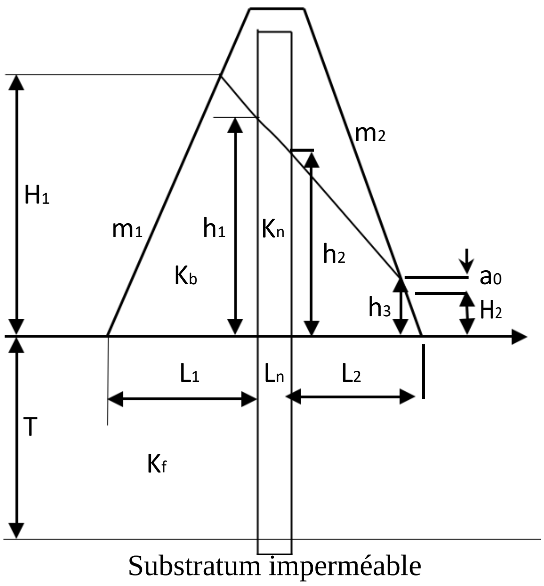
Si $H_2 \# 0$ $Q_2 = K_f \cdot \frac{H_1 - H_2}{n.L_0} T$

Si $H_2=0$ $Q_2 = K_f \cdot \frac{H_1}{n.L_0} T$



$L_{0/T}$	20	5	4	3	2	1
n	1,15	1,18	1,23	1,30	1,44	1,87

6-2 Cas du barrage à noyau avec parafouille.



Pour calculer les infiltrations à travers un tel barrage, on le divise en parties séparées et qui sont calculées séparément.

- 1[ere] partie : à gauche du noyau et du parafouille.
- 2[eme] partie : noyau et parafouille.

- 3^{eme} partie : à droite du noyau et du parafouille.

Chaque partie est à son tour divisée en deux parties.

- La partie du barrage est calculée comme dans le barrage homogène.

- La partie de la fondation est calculée comme si elle se trouve sous un barrage imperméable.

De ce qui précède, et sachant que le débit qui s'infiltre est le même qui passe par les trois parties considérées on peut écrire les trois équations suivantes:

- Le débit de la 1^{ere} partie: $$Q = K_b \frac{H_1^2 - h_1^2}{2L_1} + K_f \frac{H_1 - h_1}{nL_1} T$$

- Le débit de la 2^{eme} partie: $$Q = K_n \frac{(h_1 + T)^2 - (h_2 + T)^2}{2L_n}$$

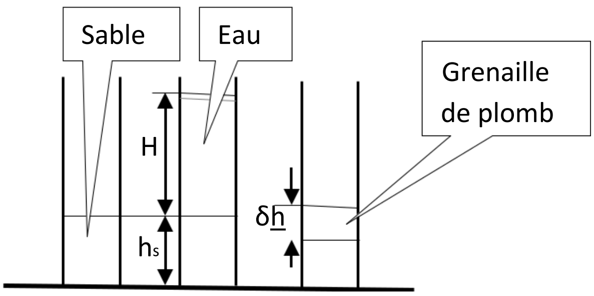
- Le débit de la 3^{eme} partie: $$Q = K_b \frac{h_2^2 - h^2}{2L_2} + K_f \frac{h - h_3}{nL_2} T$$

Ainsi nous avons trois inconnues : Q, h1, h2 et h_3 si on ajoute que. $h_3 = a_0 + H_2$

Et on calcule a_0 par la formule de Zamarine le système des quartes équations peut être résolu pour déterminer toutes les inconnues.

7 – phénomène de renard.

7-1 Expérience de Terzaghi.



Dans un récipient contenant du sable sur une hauteur h_s, on charge ce récipient d'eau sur une hauteur H, on n'observera aucun tassement bien que la pression à la surface du sable soit de γ_ω.

Au contraire, si l'on charge le même récipient par une couche de grenaille de plomb de même poids que la colonne d'eau, on observera un tassement δh.

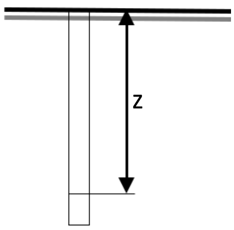
Donc on remarque que seules les charges appliquées directement au squelette solide provoquent des effets mécaniques dans le milieu poreux. L'effet d'une charge d'eau réside uniquement dans une augmentation de la pression du liquide.

Ainsi, on appelle:

- **Contrainte effective** : celle qui est transmise directement de grains en grains (grenaille de plomb).
- **Contrainte ou pression neutre:** c'est la pression du liquide.

Donc la contrainte totale appliquée à un complexe solide/liquide peut se décomposer en contrainte effective et en pression neutre ou interstitielle.

7-2 Le soulèvement hydrostatique.



Dans un massif poreux de porosité n, on considère un élément horizontal situé à une profondeur z. si le massif est sec, cet élément sera sous l'effet d'une pression effective correspondant au poids de la colonne de hauteur z,

On peut donc écrire:

$$\sigma_z = \gamma_g.(1-n).z = \gamma.z$$

Avec : σ_z – contrainte en z.

γ_g - poids spécifique des grains solides.

γ - poids spécifique du terrain sec.

Si l'on sature d'eau le massif poreux, la pression qui régnera à la profondeur z sera:

$$\sigma_{(z|tot)} = \gamma_g.(1-n).z + \gamma_w.n.z = \gamma_{sat}.z$$

Avec : $\gamma_{sat} = \gamma_g.(1-n) + \gamma_w.n$ -poids spécifique du terrain saturé.

Nous avons :

la pression effective= la pression totale – la pression neutre

Donc on peut écrire :

$$\sigma_{(z|eff)} = \gamma_{sat}.z - \gamma_w.z = (\gamma_{sat} - \gamma_w).z = \gamma_{sub}.z$$

Donc : $\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma_g.(1-n) + \gamma_w.n - \lambda_w = \gamma_g(1-n) - \gamma_w(1-n)$

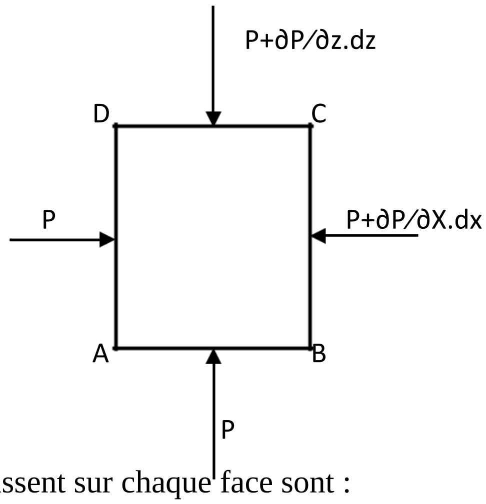
Soit : $\gamma_{sub} = (1-n).\left(\gamma_g - \gamma_w\right)$ qui représente le poids spécifique submergé.

Cela prouve que la force de soulèvement hydrostatique réduit en apparence le poids spécifique des grains solides, c'est se qu'on appelle couramment la poussée d'Archimède.

Et on remarque donc que le terme $(1-n)\gamma_w$, représente le poids de l'eau déplacée.

7-3 Pression du courant.

Dans le ca où l'eau n'est pas au repos mais en mouvement et si l'on prend un élément de ce massif : dx.dz.



Les forces agissent sur chaque face sont :

- Sur AD : **P.dz**
- Sur BC : $\left(P + \frac{\partial P}{\partial x}\right).dz$

La résultante de ces deux forces sera égale à: $\frac{\partial P}{\partial x}.dx.dz$

De même pour les eux autres faces AB et CD on aura : $-\frac{\partial P}{\partial z}.dx.dz$

La résultante des forces qui agissent sur le volume serait égale à : $-\overline{grad}\,P.dx.dz$

Et en tridimensionnel : $-\overline{grad}\,P.dx.dy.dz$

Si on introduit la notion de charge hydraulique H on aura: $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{P}}{\gamma_w} + \mathbf{z}$

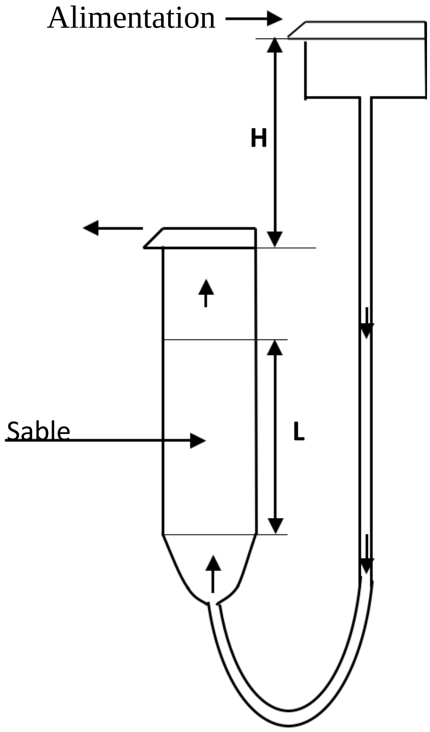
On aura : $-\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{P} = -\gamma_w\,.\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{H} + \gamma_w\,.\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{z}$

En résumé nous pouvons citer toutes les forces qui agissent sur un volume unité du massif comme suite :

- La pesanteur : $\gamma_g\,.\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{z}$
- La force de volume constante : $\gamma_w\,.\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{z}$
- La force de volume variable en fonction de l'écoulement de l'eau interstitielle: $-\gamma_w\,.\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{H}$

7-4 Etude pratique du phénomène de boulance et de renard.

Le phénomène de boulance est la conséquence de l'action de la pression du courant d'eau. Le mot boulance à l'origine provient de l'expression « sable boulant »



Dans cette expérience l'écoulement est uniforme et le gradient de charge: $\overline{\text{grad}}\,\text{H} = \frac{\text{H}}{\text{L}}$.

Si on considère une unité de volume du sable et on y étudit les forces qui agissent sur la phase solide.

$\gamma_g = \gamma_{sat} - \gamma_w$ Dirigée verticalement vers le haut.

$\gamma_w\,\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{H}$ Pression de courant.

$\gamma_g - \gamma_w\,\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{H}$ Résultante des deux forces.

Si l'on augmente le gradient de charge,

$\overline{\mathbf{grad}}\,\mathbf{H} = \frac{\mathbf{H}}{\mathbf{L}}$, La résultante diminue jusqu'à une valeur nulle, à ce moment le sable se retrouve en apparence soustrait à la pesanteur donc il est devenu boulant.

Si on continu à augmenter le gradient de charge, la colonne de sable se soulève et on aura créé un renard.

Le gradient critique de déclanchement du renard est donc.

$$(\overline{\mathbf{grad}}\ \mathbf{H})_{cr} = \frac{\gamma_g}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}.$$

Dr. Messaid Belkacem – Département Hydraulique
Institut De Génie Civil, D'Hydraulique Et D'Architecture - Université de Batna