

Chapitre 2 Etude des infiltrations dans un barrage en terre

2.1. Réseau d'infiltration

2.1.1. Notion d'écoulement dans le sol

Conservation de la masse

La loi de conservation de la masse fluide pour un écoulement laminaire se réduit à l'équation du débit :

$$q = v.S = \text{cte}$$

Charge hydraulique

La hauteur du liquide dans les tubes piézométriques est l'énergie totale par unité de masse de fluide. Elle est donnée par la formule de Bernoulli :

$$h = \frac{v^2}{2g} + \frac{u}{\gamma_w} + z$$

z : la cote du point par rapport à une référence

γ_w : le poids volumique de l'eau

g : l'accélération de la pesanteur

v : la vitesse apparente de filtration

u : la pression du fluide

Si on considère que la vitesse de filtration est négligeable, la formule s'écrit (cas des sols)

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

La charge hydraulique est mesurée en un point donné par l'**altitude du niveau** atteint par l'eau dans un tube piézométrique placé au point considéré par rapport au plan de **référence**.

- La viscosité du fluide entraîne une dissipation interne de l'énergie.
- Ceci se traduit dans l'expérience du perméamètre par la décroissance de la hauteur du niveau de l'eau : C'est la perte de charge

Gradient hydraulique

La pente de cette droite n'est autre que le gradient de la charge hydraulique i .

$$i = \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} = \frac{\Delta h}{\Delta l} \approx \frac{dh}{dl}$$

Hypothèses

- L'eau interstitielle est incompressible ;
- La masse d'eau interstitielle se conserve ;
- Les contraintes totales σ et effective σ' ainsi que la pression de l'eau u sont liées par la relation de Terzaghi $\sigma = \sigma' + u$;
- L'eau qui circule entre les grains présente de la viscosité ;
- Il est tenu compte de l'effet de la pesanteur ;
- Les mouvements sont permanents, c'est-à-dire que les vitesses de l'eau aux différents endroits sont indépendantes du temps ;

2.1.2. Stabilité hydraulique

Quel que soit la perméabilité d'un barrage en terre, il y a toujours infiltration d'eau qui est due à la charge d'eau amont. L'étude des infiltrations consiste en la réalisation des étapes suivantes :

1. Détermination de la **ligne de saturation** ou ligne phréatique, qui est confondue avec la ligne le long de laquelle la pression hydrostatique est nulle.
2. Tracé du **réseau** des lignes **équipotentielles**, c'est à dire des lignes reliant les points d'égal potentiel hydraulique au sein du corps du barrage et de ses fondations. Ce réseau nous permet de connaître la valeur de la pression interstitielle en chaque point du champ de filtration.
3. Tracé des lignes de **courant**, qui représentent la trajectoire de l'écoulement de l'eau à travers le corps du barrage.
4. Ces lignes nous permettent de calculer le débit de fuite.

2.1.3. Équations régissant l'écoulement

L'écoulement de l'eau d'infiltration dans le corps du barrage et de ses fondations est régi par la loi de **Darcy** :

$$v = k \cdot i$$

v : vitesse d'écoulement de l'eau en mètre par seconde;

k : coefficient de perméabilité de Darcy en (m / s);

i : gradient hydraulique de filtration.

L'introduction de cette relation dans la loi de conservation de masse permet d'obtenir la relation de la charge hydraulique. Cette dernière s'écrit en ce qui nous concerne, c'est à dire un problème bidimensionnel d'écoulement permanent :

$$\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Milieu isotrope})$$

h : étant la charge hydraulique

Cette dernière, jointe aux conditions aux limites, constitue le système d'équations à résoudre pour l'obtention des différents paramètres recherchés. Cette résolution peut être obtenue par différentes méthodes (numérique, analogie électrique, graphique etc.).

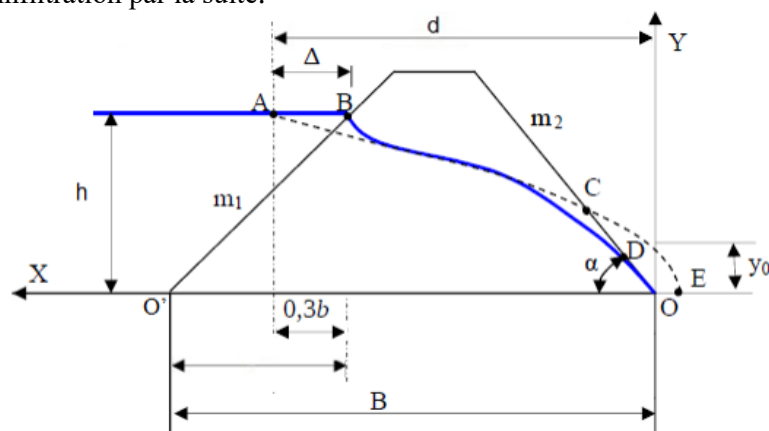
2.1.4. Méthodes de résolution

a- Ligne de saturation

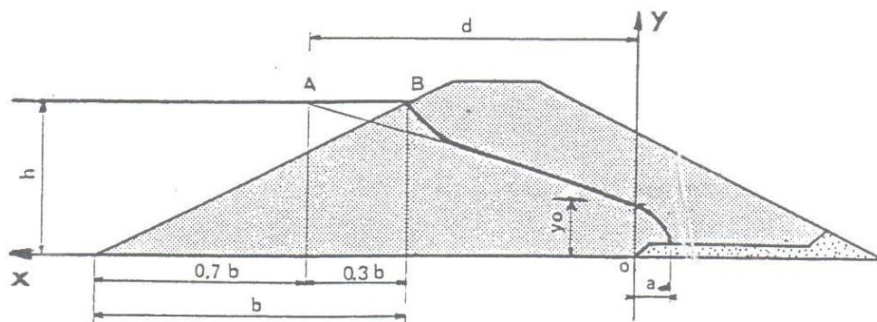
Une ligne de saturation précise la limite supérieure de la zone humide à l'intérieur d'une digue en terre partiellement immergée.

Méthode graphique (Kozeny)

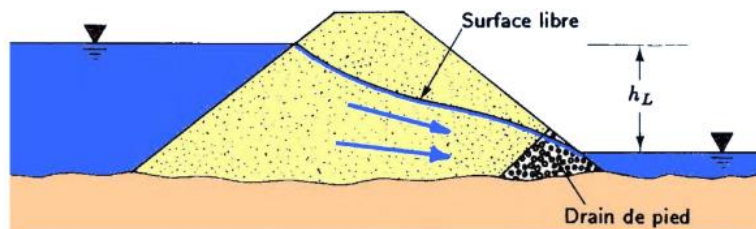
C'est la méthode la plus simple, elle donne des résultats très approchés. Elle permet de tracer de la ligne de saturation et de calculer le débit d'infiltration par la suite.



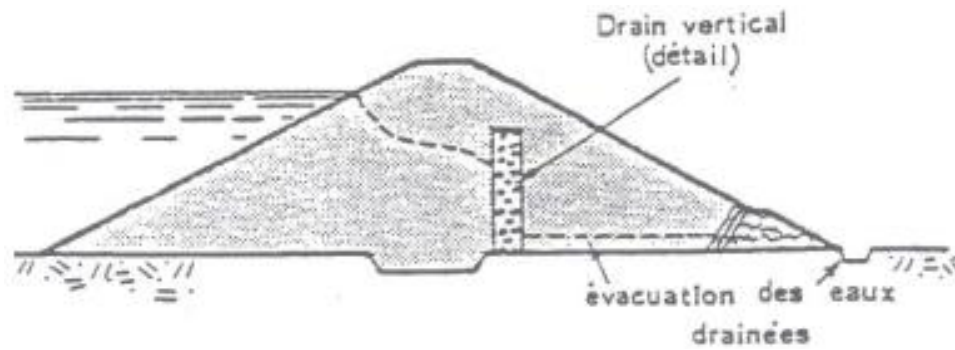
Ligne de saturation d'un barrage en terre homogène sans drain



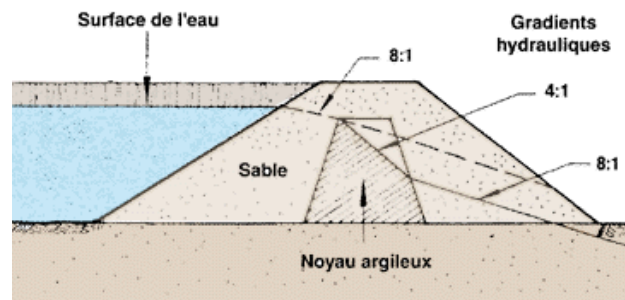
Ligne de saturation d'un barrage à drain horizontal



Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain de pied



Ligne de saturation pour un barrage homogène sur sol imperméable avec drain vertical

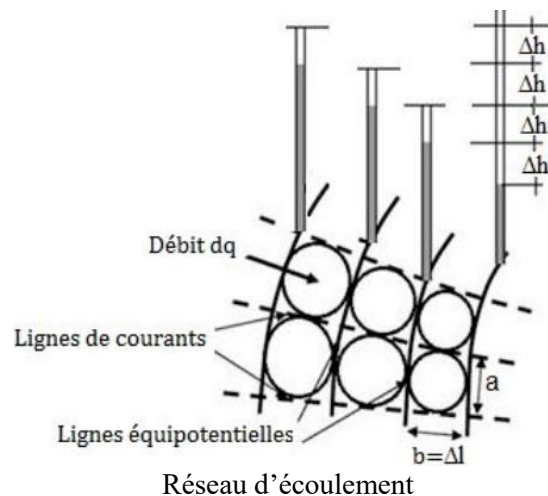


Ligne de saturation d'un barrage à noyau étanche

Le noyau argileux abaisse la ligne de saturation.

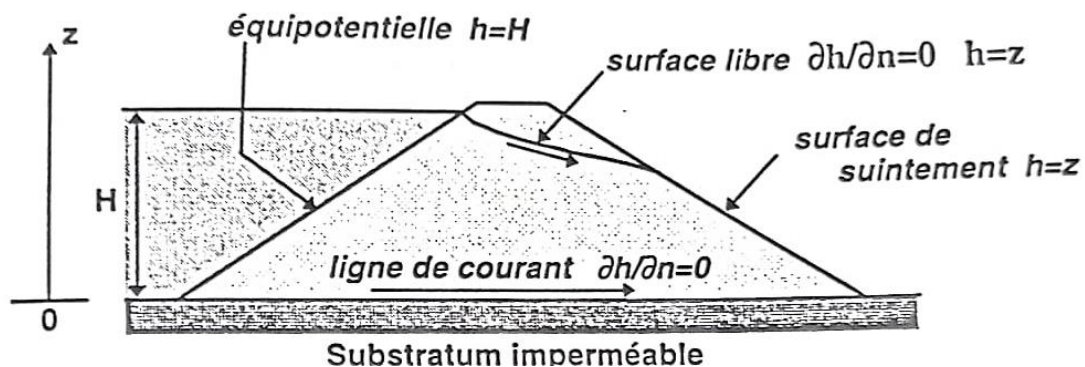
b- Tracé des équipotentiels et des lignes de courant

Un réseau d'écoulement est une représentation graphique d'un champ d'écoulement (Solution de l'équation de Laplace). Sa construction a pour but de connaître en tout point du massif, la charge hydraulique et des débits percolant dans une section donnée.



Réseau d'écoulement

c- Condition aux limites pour l'écoulement à surface libre à travers un barrage en terre homogène



Les surfaces de contact avec des masses d'eau en équilibre hydrostatique sont des équipotentiellles (à charge hydraulique constante) $h=H$

Les surfaces imperméables sont des lignes de courant à débit normal nul ($\frac{\partial h}{\partial n} = 0$).

Dans le cas des barrages on trouve la surface libre à débit normal nul ($\frac{\partial h}{\partial n} = 0$) et $h=z$, avec n , direction normale à la surface imperméable

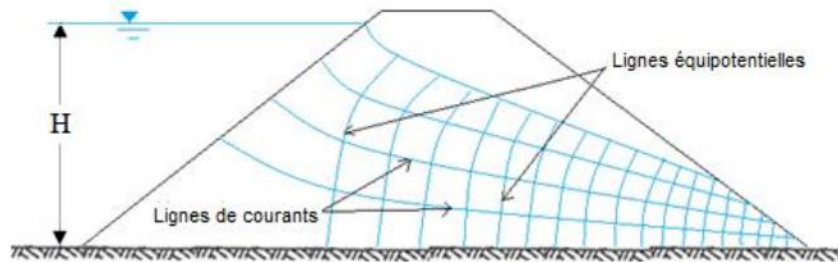
L'écoulement débouche sur la face aval du barrage qui constitue une surface de suintement $h=z$.

d- Tracé du réseau d'écoulement dans le cas des barrages en remblai par la méthode graphique

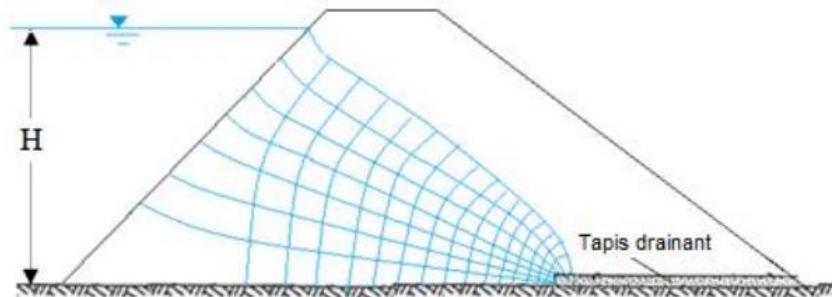
La solution graphique du problème d'infiltration des barrages en remblai se ramène donc à tracer un réseau de lignes orthogonales, les conditions aux limites étant connues.

Dans le cas d'un massif homogène reposant sur une assise (fondation) imperméable :

- La ligne de saturation et la ligne au contact massif- fondation sont deux lignes de courant.
- Le parement amont est une équipotentielle.
- Si le massif comporte un tapis drainant, la ligne équipotentielle au côté du drain est une ligne à pression atmosphérique.

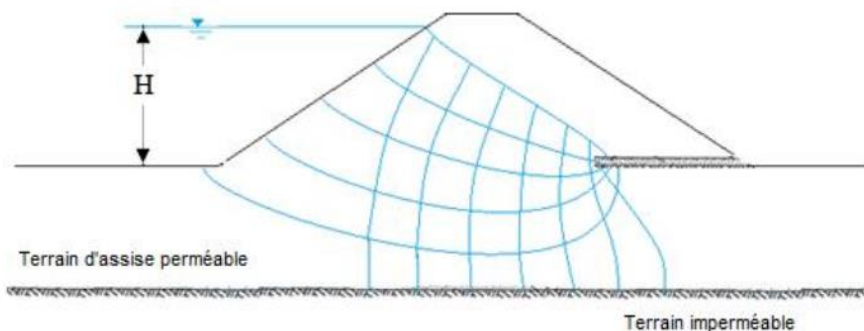


Réseau d'écoulement pour un barrage homogène sur sol imperméable sans drain



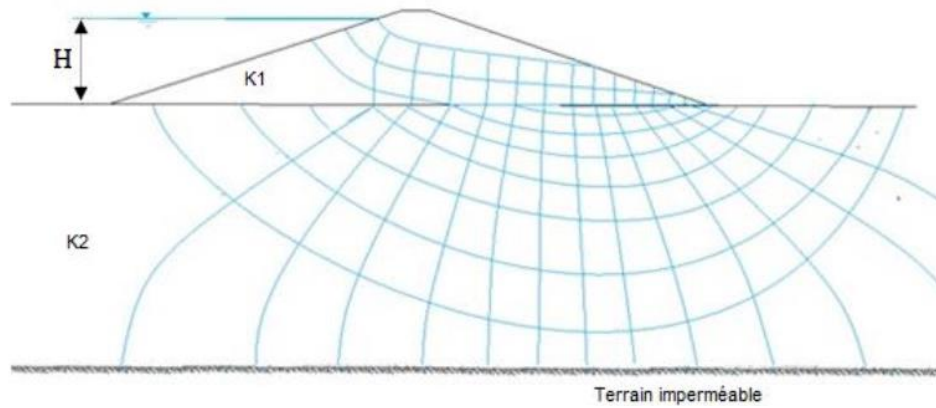
Réseau d'écoulement pour un barrage homogène sur sol imperméable avec drain horizontal

Si les terrains d'assise sont perméables sur une hauteur finie avec une perméabilité semblable à celle du massif barrage, la ligne de saturation et la ligne limitant la partie inférieure de la couche perméable sont des lignes de courants limites constituant les frontières du système considéré.



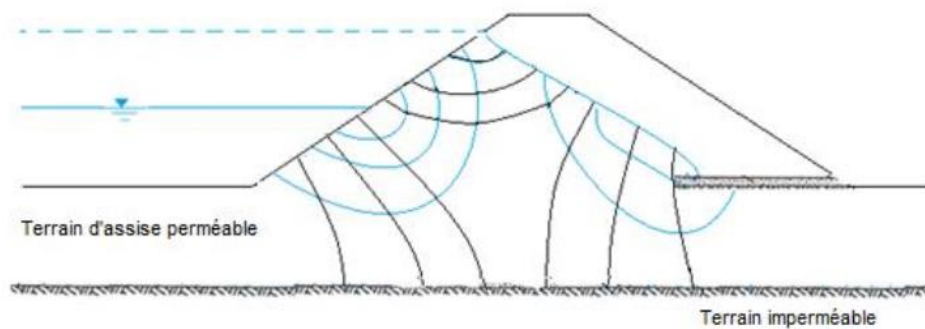
Réseau d'écoulement pour un barrage homogène avec drain horizontal sur sol de même perméabilité

Si l'écoulement se fait à travers des couches de différentes perméabilités, les lignes de courant se réfractent au contact de la surface de séparation des deux couches. Elles se resserrent lorsqu'elles entrent dans un matériau plus perméable et s'écartent dans un matériau moins perméable.



Réseau d'écoulement dans le cas d'une assiette moins perméable que le massif du barrage $k_1 > k_2$

Dans le cas de vidange rapide partielle les lignes se répartissent différemment puisque le parement amont n'est plus une ligne équipotentielle et son potentiel varie en fonction du point considéré.



Réseau d'écoulement dans le cas d'une vidange rapide

2.2. Débit de fuite par infiltration

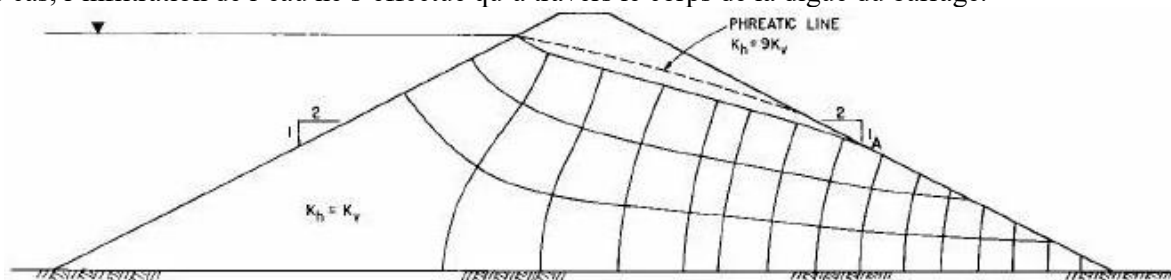
Calcul du débit de fuite

Le débit de fuite dû aux infiltrations peut s'obtenir à partir du réseau de lignes de courant orthogonales aux équipotentielles. Si ce débit est trop élevé, le volume d'eau de la retenue sera réduit et ne permettra plus de satisfaire les besoins. De plus, cela engendrera un risque d'instabilité du barrage.

Il peut être calculé par la formule suivante :

a - Cas d'une fondation imperméable :

Dans ce cas, l'infiltration de l'eau ne s'effectue qu'à travers le corps de la digue du barrage.



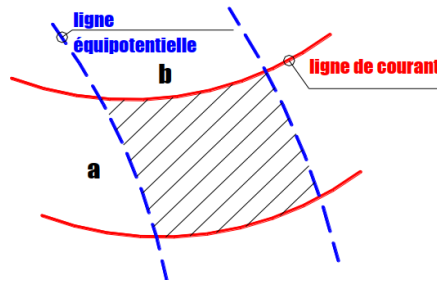
Barrage homogène sans drain avec fondation imperméable

Un tube de courant est délimité par deux lignes de courant. Dans un tube de courant, le débit est constant tout le long. Si la perméabilité est la même dans toutes les directions de l'espace (on dit qu'elle est isotrope).

Entre deux équipotentielles, il y a une perte de charge Δh_e dans le sens de l'écoulement. En général, on s'arrange pour que le débit soit le même dans chaque tube de courant et que Δh_e soit le même entre n'importe quelle équipotentielle successive.

Si Δh est la perte de charge totale de l'écoulement, déterminée à partir des conditions limites et si N_h est le nombre d'intervalles entre équipotentielles : $\Delta h_e = \Delta h / N_h$.

Dans un élément de réseau quasi-rectangulaire, on considère que l'écoulement est similaire à un écoulement monodirectionnel, donc le débit unitaire :



$$q = k * i * A = k * \frac{\Delta h_e}{b} * a * 1 = k * \frac{\Delta h}{N_h} * \frac{a}{b}$$

Si N_c est le nombre de tubes de courant, le débit total unitaire est égal à :

$$Q = q * N_c = k * \Delta h * \frac{N_c}{N_h} * \frac{a}{b}$$

Soit $Q = K * \Delta h * \frac{N_c}{N_h}$ Pour un milieu isotrope

Remarques :

Pour un milieu anisotrope $Q = \sqrt{K_H * K_V} * \Delta h * \frac{N_c}{N_h}$

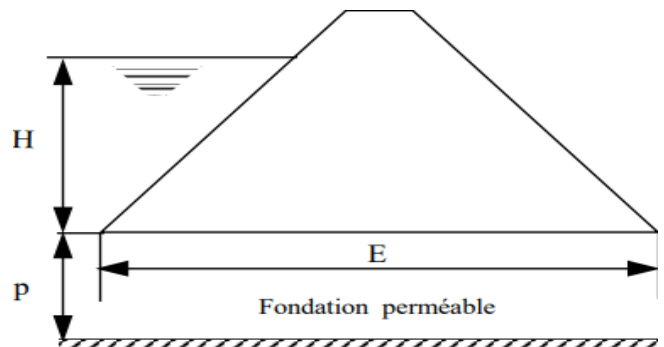
En Anglais N_f « flow channel » et N_d « drop head » au lieu de N_c et N_h .

b - cas d'une fondation perméable :

On admet que la longueur moyenne de la ligne de courant est celle de la ligne de contact du massif imperméable avec la fondation plus perméable. En se reportant à la figure, Le débit de fuite par unité de largeur de fondation perméable est :

$$q = P * K * \frac{H}{E}$$

P : profondeur de la fondation perméable
K : perméabilité de la fondation perméable
E : empattement de la digue

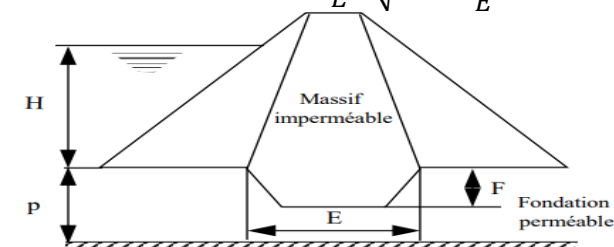


c – cas d'un barrage à noyau central :

Pour un barrage muni d'un noyau central, l'expression ci-dessus reste valable, il suffit de prendre E comme étant l'empattement du noyau.

Dans le cas où le noyau imperméable est ancré dans l'assise perméable sur une profondeur F, le débit d'infiltration à travers l'assise est alors donné par :

$$q = \frac{1}{2} K * H * \log \frac{\frac{2P}{E} * \sqrt{1 + 4 * \frac{P^2}{E^2}}}{\frac{2F}{E} * \sqrt{1 + 4 * \frac{F^2}{E^2}}}$$



La largeur moyenne de la ligne de courant est : $L = E + 2 * F$

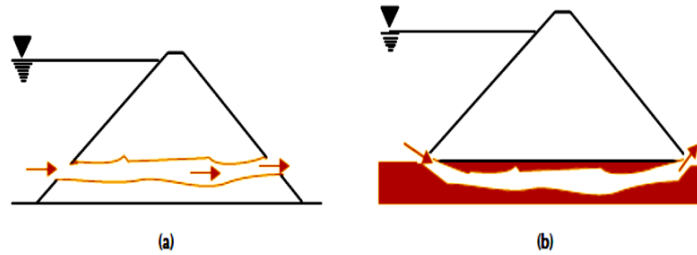
Le débit par unité de largeur est :

$$q = (P - F) * K * \frac{H}{E + 2 * F}$$

2.3. Phénomène de renard

Erosion interne

C'est un processus qui implique des arrachements de particules et leur transport dans le barrage ou sa fondation " Piping" en Anglais. Ceci n'est possible que si les particules du sol sont fines et qu'elles puissent migrer à travers les vides du massif.



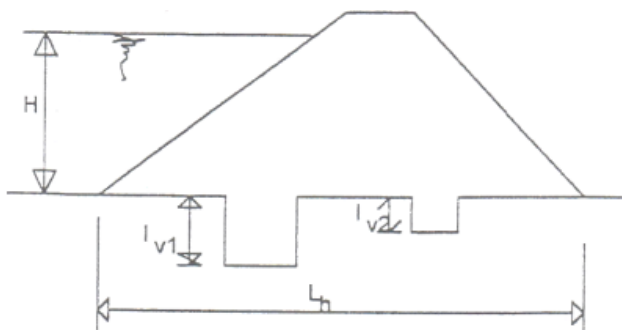
Renard dans le corps de l'ouvrage (a) et dans la fondation (b)

Boulance

Le phénomène de Boulance se produit quand l'écoulement est ascendant et la pression de l'écoulement avec la poussée d'Archimède arrivent à annuler le poids des particules du sol. Ceci n'est en général possible que si le sol est fin et pulvérulent.

Méthodes de préventions

Pour empêcher l'érosion interne (renard) en fondation d'un barrage, il faut réduire le gradient hydraulique le long de la ligne de cheminement. Comme la hauteur d'eau H est imposée, c'est la longueur L des cheminements qui est le paramètre essentiel. LANE distingue les cheminements verticaux L_v des cheminements horizontaux L_h . Sa règle empirique généralement utilisée pour le calcul des fondations de barrages s'écrit :



$$\frac{1/3 L_h + \sum L_v}{H} \geq C$$

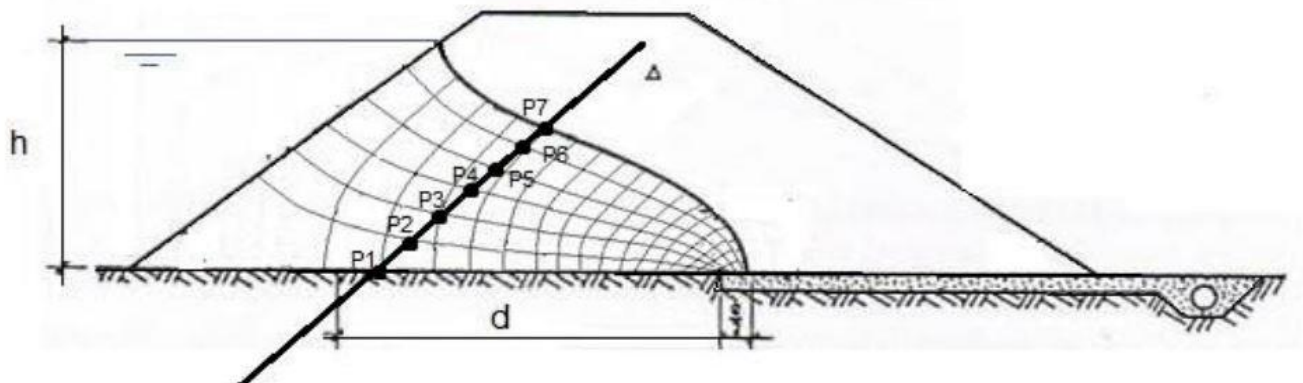
Valeurs du coefficient de LANE	
Nature du terrain	C
Sables fin et limons	8.5
Sables fin	7
Sables moyens	6
Gros Sables	5
Petits graviers	4
Gros graviers	3
Mélange de gravier et de gros galets	2.5
Argile plastique	3
Argile consistante	2
Argile dure	1.8

2.4. Application

Soit un barrage en terre constitué d'un massif homogène de perméabilité isotrope k , reposant sur un substratum horizontal imperméable et muni d'un drain tapis. Dans le cas d'un réseau d'écoulement représenté par la figure ci-dessous, calculer :

1. Le débit d'infiltration drainé par le drain horizontal.
2. Les pressions interstitielles aux points interceptés par la droite.

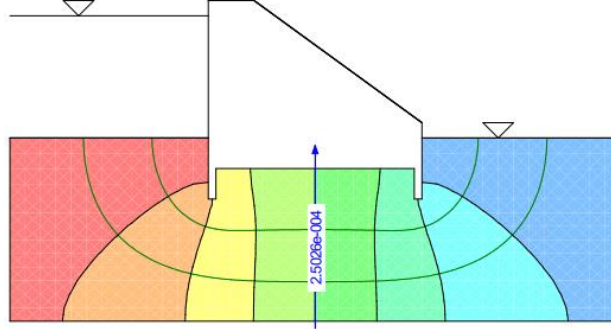
$h = 20\text{m}$, largeur du barrage $L = 200\text{m}$, largeur de la crête $7,5\text{m}$, $m_1 = m_2 = 1/2,5$ et $K = 10^{-3} \text{ cm/s}$



2.5. Calcul à l'aide d'outils numérique

Grandeurs de débit

Le calcul des quantités de flux est généralement d'un intérêt primordial dans une analyse d'infiltration. Avec le module SEEP/W du logiciel Geostudio, cela se fait en définissant une section de flux. La figure montre l'exemple discuté ici avec une section de flux. L'infiltration totale sous la structure est de $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/ml}$, comme indiqué sur la section flux. La conductivité a été spécifiée comme étant de $1 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$.



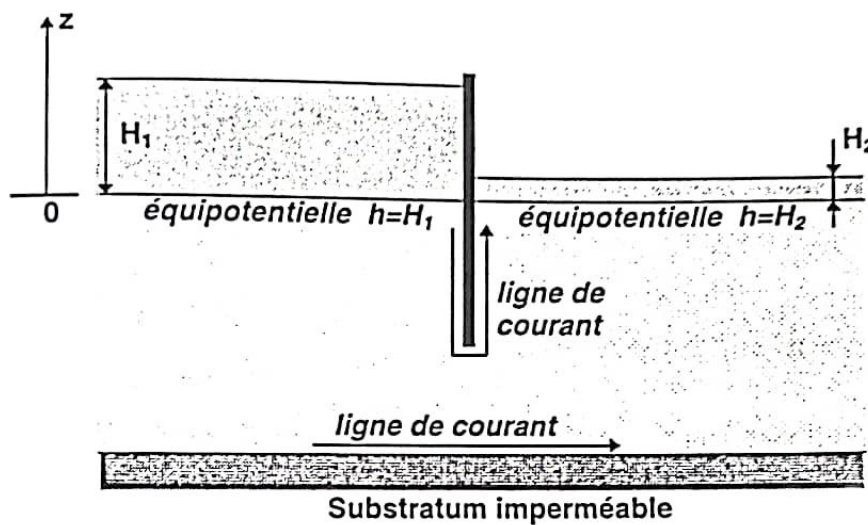
Nombre de canaux d'écoulement $N_f=3$ nombre de chutes équipotentiellles $N_d=8$. La chute de charge totale est de 8m. Le débit est :

$$q = K \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_d} = (1 \times 10^{-4})(8) \frac{3}{8} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

Cette approximation de l'équation du flux net est raisonnablement proche du flux calculé SEEP/W. La différence entre les deux valeurs confirme que les trajectoires d'écoulement estimées ne sont qu'approximatives. Pour obtenir la même valeur du réseau de débit, 2,5 canaux de débit sont nécessaires pour les 8 chutes équipotentiellles.

La valeur calculée SEEP/W est le Q correct, puisque les filets de flux sont au mieux toujours une approximation.

2.6. Palplanche



Annexe 1

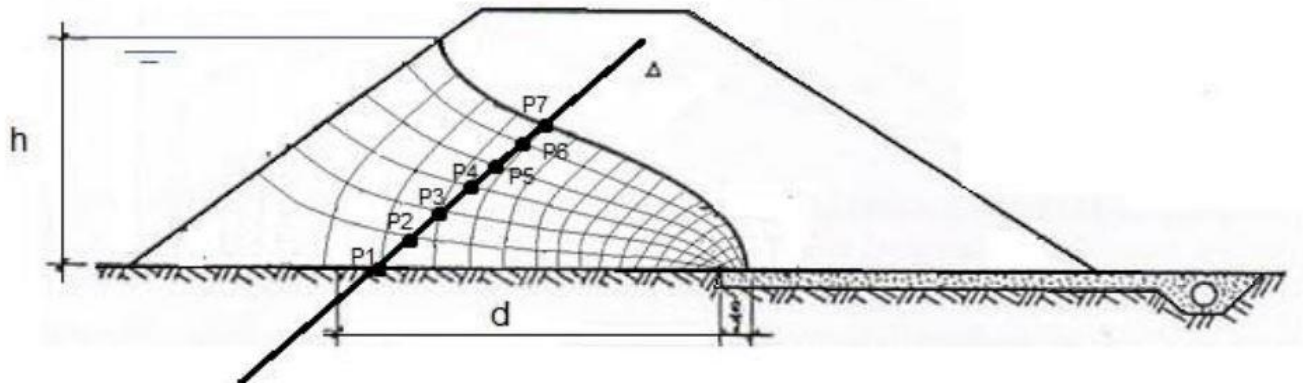
Type de sol	Perméabilité	Ordre de grandeur (m/s)
Argile compacte	Imperméable	10^{-9} à 10^{-12}
limon	Très faible	10^{-7} à 10^{-9}
Sables très fins	Faible	10^{-5} à 10^{-7}
Petits graviers, sables	Assez élevée	10^{-3} à 10^{-5}
Graviers moyens à gros	Très élevée	10^{-1} à 10^{-2}

Solution de l'application :

Soit un barrage en terre constitué d'un massif homogène de perméabilité isotrope k , reposant sur un substratum horizontal imperméable et muni d'un drain tapis. Dans le cas d'un réseau d'écoulement représenté par la figure ci-dessous, calculer :

3. Le débit d'infiltration drainé par le drain horizontal.
4. Les pressions interstitielles aux points interceptés par la droite.

$h = 20\text{m}$, largeur du barrage $L = 200\text{m}$, largeur de la crête $7,5\text{m}$, $m_1 = m_2 = 1/2,5$ et $K = 10^{-3} \text{ cm/s}$



Le débit d'infiltration drainé par le drain horizontal

D'après la figure le nombre d'intervalles des lignes de courant est $N_c = 6$, le nombre d'intervalle des lignes équipotentielle est $N_h = 17$.

Le débit total par unité de largeur est :

$$q = K \cdot \Delta h \cdot \frac{N_c}{N_h} = 10^{-5} \cdot 20 \cdot \frac{6}{17} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

$$q = 7 \cdot 10^{-5} \cdot (24 \cdot 3600) = 60.48 \text{ m}^3/\text{j/ml}$$

Pour une largeur du barrage $L = 250\text{m}$

$$Q = 60.48 \cdot 250 = 15120 \text{ m}^3/\text{j}$$

Calcul des pressions interstitielles aux points interceptés par la droite

Par définition la pression en chaque point du massif est : $u = (h_M - z_M) \cdot \gamma_e$

La perte de charge total entre l'amont et l'aval est : $\Delta h = 20\text{m}$.

La perte de charge entre deux équipotentielles est : $\Delta h_e = \frac{20}{17} = 1.18\text{m}$.

- Le point P1 est situé sur l'équipotentielle $h - 2\Delta h_e = 20 - 2 \times 1.18 = 17.64\text{m}$

$$u_{p1} = (h_{p1} - z_{p1}) \gamma_w = (h - 2\Delta h_e - z_{p1}) \gamma_w = (17.64 - 0) \cdot 10 = 176.4 \text{ kN/m}^2$$

- Le point P2 est situé sur l'équipotentielle $h - 2.5\Delta h_e = 20 - 2.5 \times 1.18 = 17.05\text{m}$

$$u_{p2} = (h_{p2} - z_{p2}) \gamma_w = (h - 2.5\Delta h_e - z_{p2}) \gamma_w = (17.05 - 2.7) \cdot 10 = 143.5 \text{ kN/m}^2$$

- Le point P3 est situé sur l'équipotentielle $h - 3\Delta h_e = 20 - 3 \times 1.18 = 16.46\text{m}$

$$u_{p3} = (h_{p3} - z_{p3}) \gamma_w = (h - 3\Delta h_e - z_{p3}) \gamma_w = (16.46 - 4.7) \cdot 10 = 117.6 \text{ kN/m}^2$$

- Le point P4 est situé sur l'équipotentielle $h - 3.5\Delta h_e = 20 - 3.5 \times 1.18 = 15.87\text{m}$

$$u_{p4} = (h_{p4} - z_{p4}) \gamma_w = (h - 3.5\Delta h_e - z_{p4}) \gamma_w = (15.87 - 7.3) \cdot 10 = 85.7 \text{ kN/m}^2$$

- Le point P5 est situé sur l'équipotentielle $h - 3.8\Delta h_e = 20 - 3.8 \times 1.18 = 15.52\text{m}$

$$u_{p5} = (h_{p5} - z_{p5}) \gamma_w = (h - 3.8\Delta h_e - z_{p5}) \gamma_w = (15.52 - 8.7) \cdot 10 = 68.2 \text{ kN/m}^2$$

- Le point P6 est situé sur l'équipotentielle $h - 4\Delta h_e = 20 - 4 \times 1.18 = 15.28\text{m}$

$$u_{p6} = (h_{p6} - z_{p6}) \gamma_w = (h - 4\Delta h_e - z_{p6}) \gamma_w = (15.28 - 10.7) \cdot 10 = 45.8 \text{ kN/m}^2$$

- Le point P7 est situé sur la ligne de saturation d'où $u_{p7} = 0$