Chapitre V : Infiltrations et hydraulique interne

Introduction.
1. Rappel des équations du mouvement de l'eau dans un sol (loi de DARCY)
2. Le tracé de la ligne phréatique par la méthode de KOZENY.
    - 2.1. Cas d'un barrage homogène non drainé sur une fondation imperméable.
    - 2.2. Cas d'un barrage homogène drainé sur une fondation imperméable.
    - 2.3. Cas d'un barrage à zones sur une fondation imperméable.
    - 2.4. Cas d’une vidange rapide.
    - 2.5. Cas d'un barrage sur une fondation perméable.
3. Calcul du débit et la pression interstitielle.
4. Protection contre le renard.
    - 4.1. Ecrans étanches.
    - 4.2. Allongement des lignes d'écoulement.
    - 4.3. Utilisation des filtres.
        - 4.3.1. Drain Tapis.
        - 4.3.2. Drain vertical.
        - 4.3.3. Loi des filtres ou règles de non contamination.

Introduction :

Les problèmes d'étanchéité d'un barrage se situent en général à trois niveaux :

- L'étanchéité de la cuvette,
- L'étanchéité du corps de remblai,
- L'étanchéité de la fondation et des rives.

Les infiltrations peuvent provoquer trois types de phénomènes :

- Fuites d'eau : souvent inévitables, mais qu'il convient de les limiter.
- Sous-pressions qui sont en général défavorables à la stabilité des ouvrages.
- Phénomène de renard menace gravement la survie de l'ouvrage

1. Rappel des équations du mouvement de l'eau dans un sol (loi de DARCY) :

La loi de DARCY montre que la vitesse d'un écoulement à travers un milieu poreux est proportionnelle à la perte de charge entre deux sections quelconques de cet écoulement. Cette loi s'exprime donc par la relation :

$$\vec{V} = K\frac{\Delta H}{\Delta l}$$

Dans le cas d'une structure stratifiée du sol (anisotropie) qu'on rencontre dans les remblais compactés, puisqu'il arrive que cette anisotropie apparaisse à la suite du compactage par couches horizontales successives, la perméabilité horizontale et verticale sont définies comme suit :

- Perméabilité horizontale d'un sol stratifié : $K_{eq,h} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} K_i H_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i}$
- Perméabilité verticale d'un sol stratifié : $K_{eq,v} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} H_i}{\sum_{i=1}^{n} \dfrac{H_i}{K_i}}$
- Perméabilité moyenne dans un sol stratifié : $K = \sqrt{K_h K_v}$

Dans le cas d'un sol anisotrope, on peut contractant les distances horizontales en posant le changement de variable $x' = x\sqrt{\dfrac{K_v}{K_h}}$ et en passant par les étapes suivantes :

- Représentation du barrage dans le système d'axe xy
- Réduction des distances horizontales dans le rapport $\sqrt{\dfrac{K_v}{K_h}}$ et résolution du problème d'écoulement dans ce milieu considéré comme isotrope.

- Déduction graphique de l'écoulement dans le milieu anisotrope par application de l'opération inverse.

2. Le tracé de la ligne phréatique par la méthode de KOZENY:

KOZENY a montré que, dans un barrage en terre non drainé la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole dont le foyer est situé au pied du parement aval du barrage.

Lorsque le barrage est muni d'un drain, celui-ci rabat la ligne phréatique à l'intérieur du remblai. Dans ce cas la parabole de KOZENY a pour foyer l'extrémité amont du drain auquel se raccorde la ligne de saturation.

L'équation de la ligne phréatique donnée par KOZENY est de la forme :

$$y^2 = 2y_0x + y_0^2$$

2.1. Cas d'un barrage homogène non drainé sur une fondation imperméable :

Les travaux de CASAGRANDE ont montré que la ligne phréatique théorique passe par un point A situé à la surface de la retenue et éloigné de 0.3 b du parement amont, b étant la longueur de la projection horizontale de la longueur mouillée du parement.

Les coordonnées de ce point A (d, h) vérifient donc l'équation de la parabole de KOZENY, ce qui permet de définir le paramètre y_0 :

$$h^2 - 2y_0d - y_0^2 = 0$$

La résolution de cette équation donne : $y_0 = \sqrt{d^2 + h^2} - d$

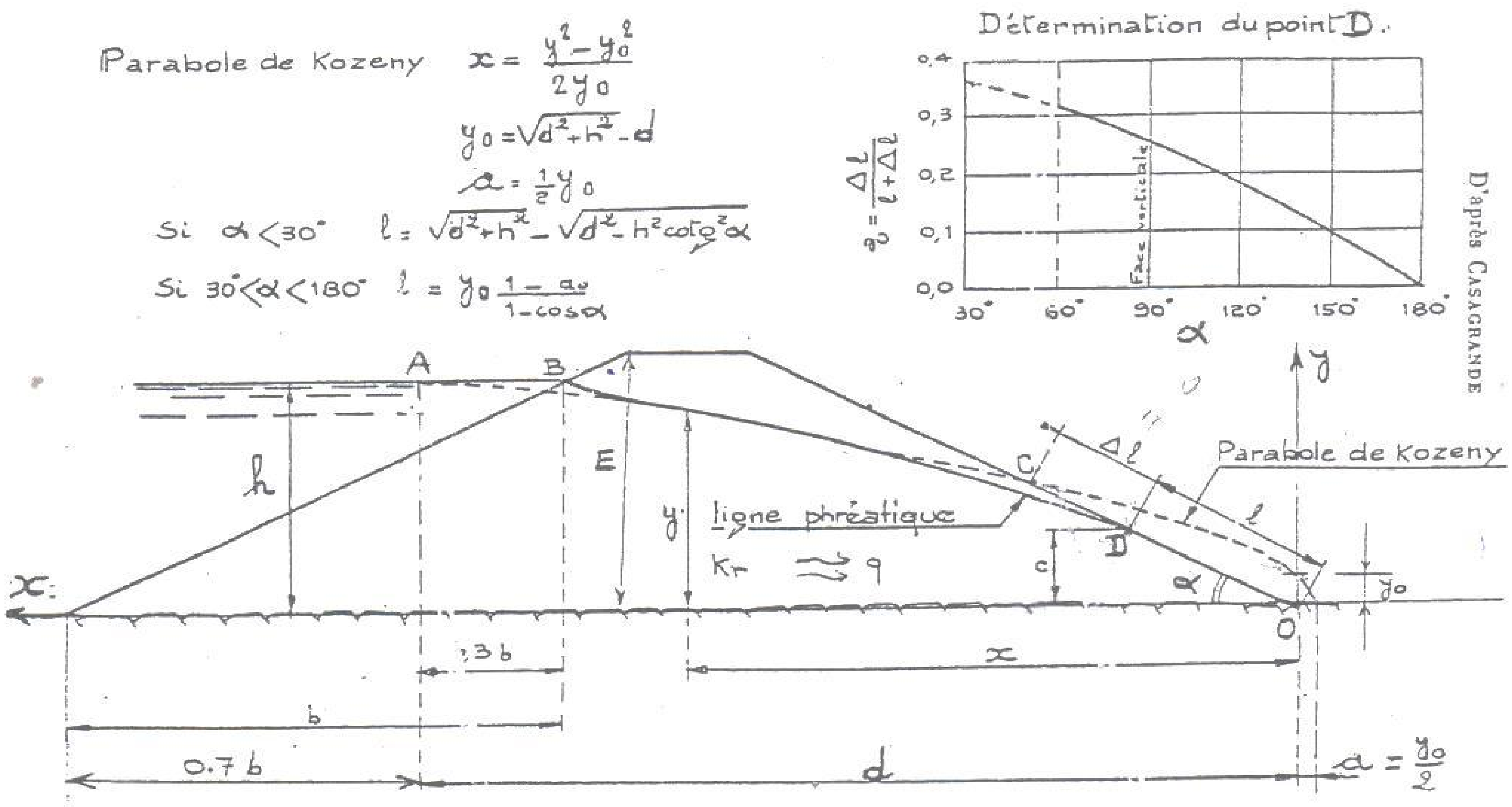


Figure N° 30 : Détermination de la ligne phréatique.

Le fait que le parement amont est une équipotentielle, on raccorde la parabole au point B du plan d'eau par une courbe normale au parement amont et tangente à la parabole.

En aval, la ligne phréatique (de saturation) en un point D se situe sensiblement au 2/3 de OC de la ligne théorique (parabole de KOZENY) tel que : $\frac{DC}{OC} = \frac{\Delta l}{\Delta l + l} = \frac{3}{8}\cos\frac{\alpha}{2}$

CASAGRANDE a démontré que Δl dépond de la distance focale de la parabole de base et l'angle α du talus aval, il a dressé la table de $a_0 = \frac{\Delta l}{\Delta l + l}$ en fonction de α.

On peut aussi déterminer le point D en utilisant les formules suivantes :

Pour $\alpha < 30°$ $\Rightarrow l = \sqrt{d^2 + h^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot g^2 \alpha}$

Pour $30° < \alpha < 180°$ $\Rightarrow l = y_0 \frac{1 - a_0}{1 - \cos\alpha}$.

2.2. Cas d'un barrage homogène drainé sur une fondation imperméable :

En général les barrages en terre sont munis d'un drain aval qui rabat la ligne phréatique à l'intérieur du barrage. Dans ce cas la parabole de KOZENY a pour foyer l'extrémité amont du drain auquel se raccorde la ligne phréatique. Le raccordement se fait comme les figures ci-dessous montrent dans le cas d'un drain horizontal et vertical :

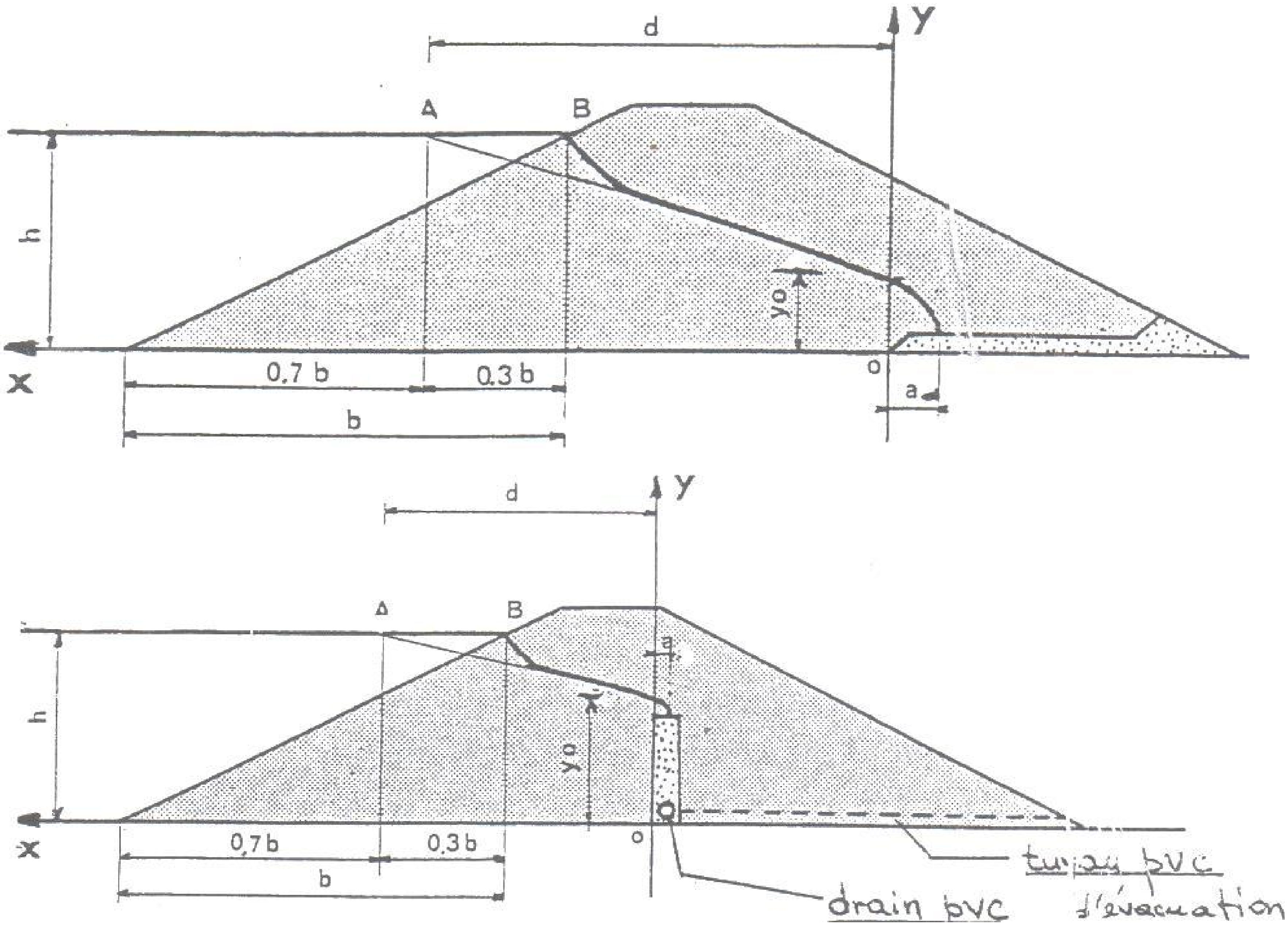
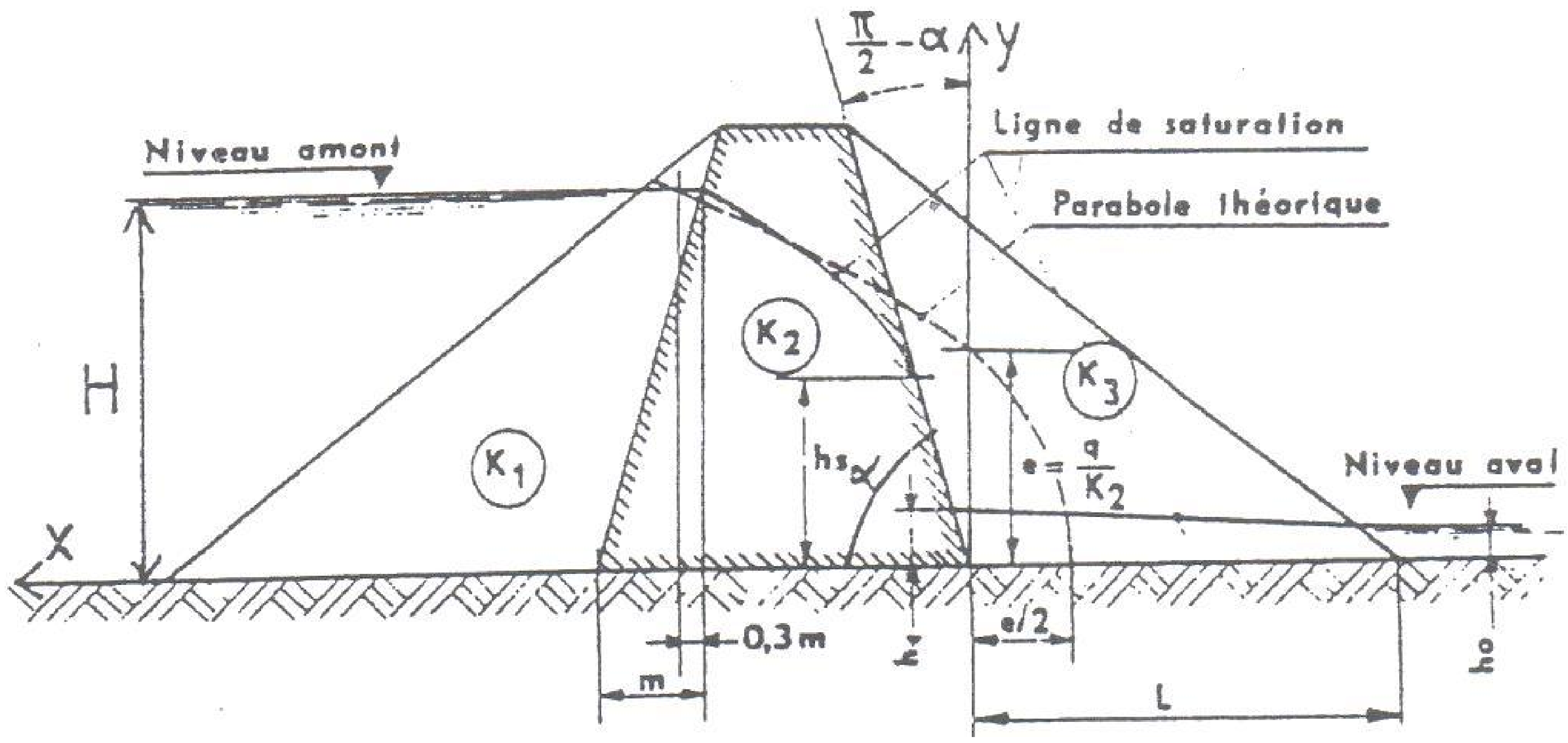


Figure N°31 : Barrage homogène drainé. (a) : Cas d'un drain horizontal (drain tapis), (b) : Cas d'un drain vertical.

2.3. Cas d'un barrage à zones sur une fondation imperméable :

Dans ce type d'ouvrage, le noyau étanche a une perméabilité beaucoup plus faible que les recharges amont et aval. On montre que l'on peut également modéliser les lignes de courant dans le noyau par des paraboles en considérant comme parfaitement perméable la recharge amont. La figure suivante schématise cette situation.



La ligne de saturation dans le noyau de perméabilité K_2 est construite à partir de la parabole de base, suivant les règles précédentes, en considérant cependant le fait que la ligne débouche plus bas que la ligne théorique, à la hauteur h_s, déterminée à l'aide de l'abaque suivant:

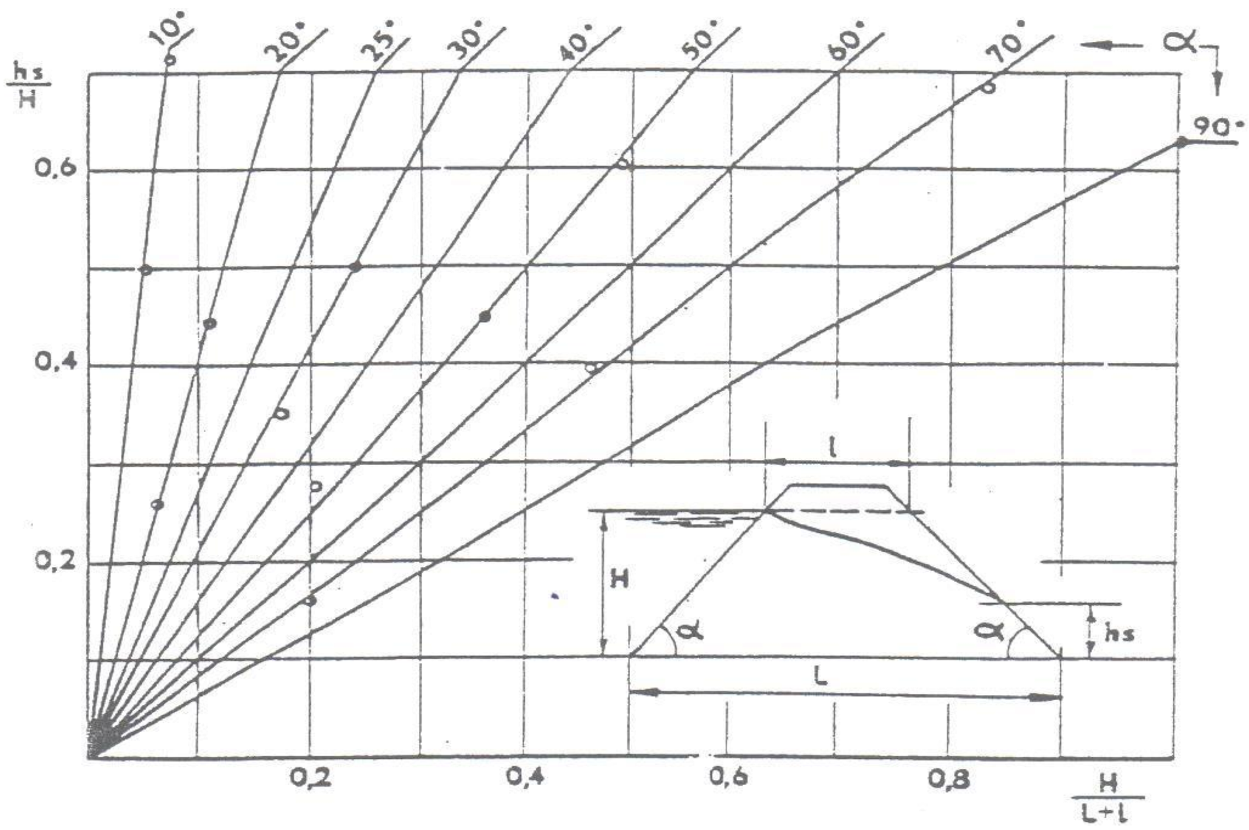


Figure N°33 : Détermination de h_s

Dans la recharge aval de perméabilité K_3, l'écoulement peut être assimilé à un écoulement à travers un massif rectangulaire de longueur L. Si h_0 est le niveau aval et h_1 la cote amont de la ligne de saturation dans la recharge aval, le débit est donné par :

$$q = K_3 \frac{h_1^2 - h_0^2}{2L}$$

Ce débit doit être égal à celui qui traverse le noyau et qui peut s'écrire au moyen de la formule :

$$q = K_2 e$$

En éliminant q entre les deux équations ci-dessus, on obtient : $h_1 = \sqrt{2Le\frac{K_2}{K_3} + h_0^2}$

La connaissance de h_1 permet de tracer la ligne de saturation dans la recharge aval avec une précision suffisante en l'assimilant à une droite.

2.4. Cas d'une vidange rapide :

On peut considérer comme rapide une vidange qui s'effectue en un délai inférieur à un ou plusieurs mois. Le parement amont n'est plus une équipotentielle. Les lignes de courant ressortent sur le parement amont dénoyé. Ceci justifie encore plus pourquoi on dispose sous le rip-rap de l'amont une couche de pose filtrante afin d'éviter la fuite des fines (entrainement des fines) lors de la vidange.

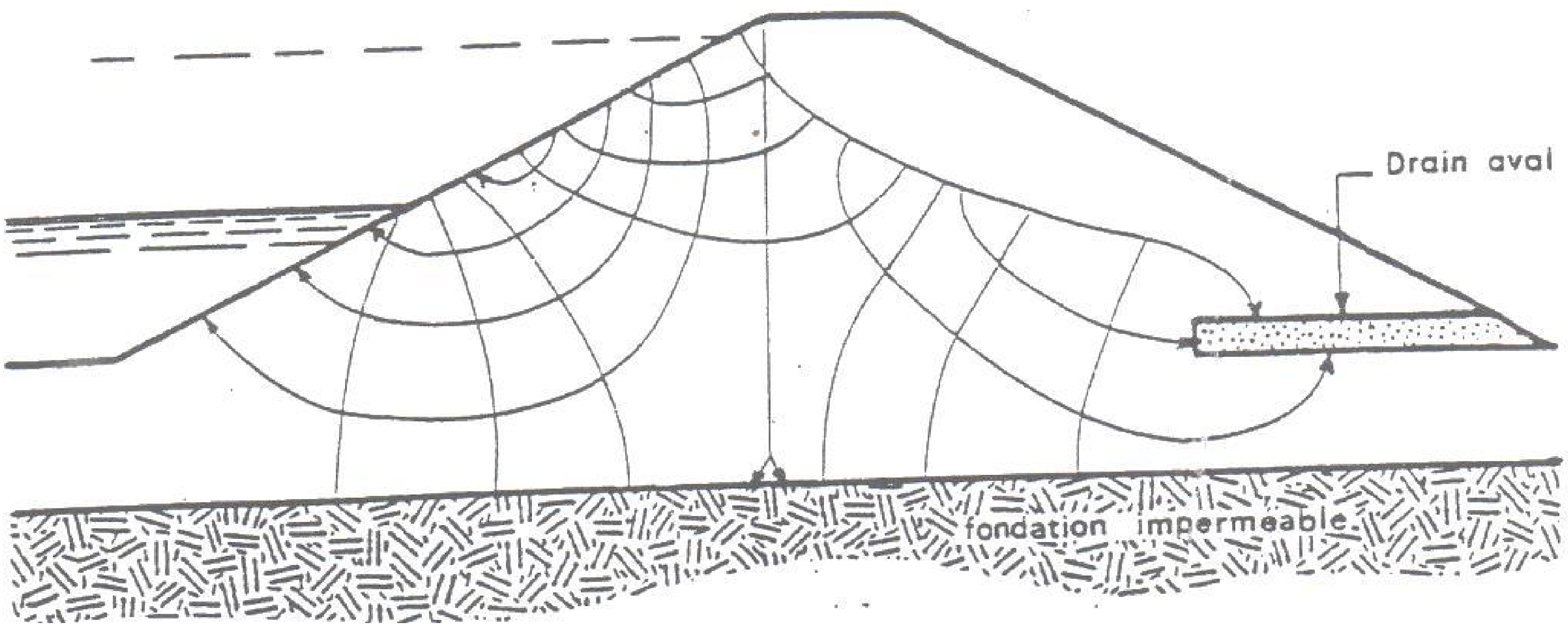


Figure N°34 : Equipotentielles et ligne de courant dans le cas d'une vidange rapide.

2.5. Cas d'un barrage sur une fondation perméable :

La méthode de calcul reste la même et la ligne phréatique ne change pas. Seules, les autres lignes de courant sont modifiées.

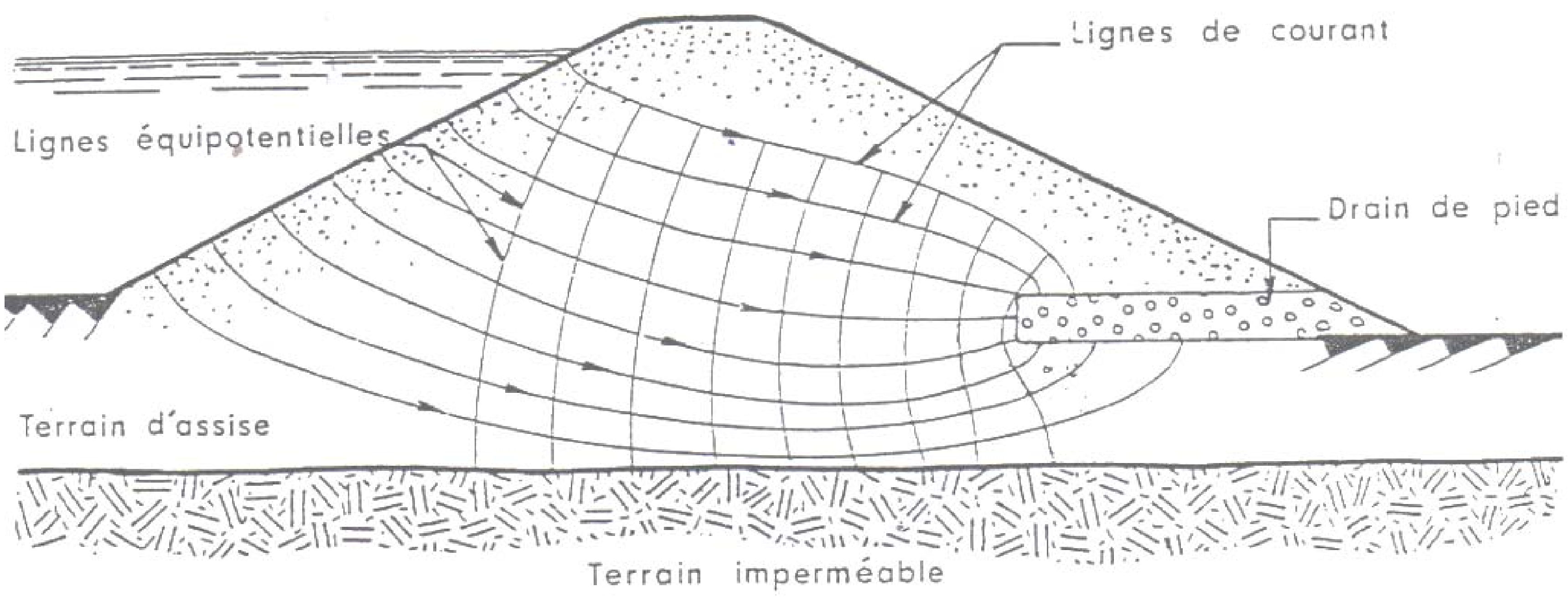


Figure N°35 : Trajectoire de l'eau à travers le barrage.

3. Calcul du débit et la pression interstitielle :

-Le débit de fuite à travers d'un barrage peut être estimé comme suit : ($Q=Ky_0$)

Pour $\alpha < 30° \Rightarrow \quad Q = K\left(\sqrt{d^2+h^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot g^2\alpha}\right)\sin^2\alpha$

Pour $30° < \alpha < 180° \Rightarrow \quad Q = K\left(\sqrt{d^2+h^2} - d\right)$

-Le calcul du débit de fuite à travers une fondation relativement perméable, comme représente la figure ci-après :

$L = B + 2F$

$q = S.K_H.\dfrac{H}{L}$

S : Longueur mouillé de la couche de fondation.

$S = (T - F)$

$q = K_H.\dfrac{H(T-F)}{B+2F}$

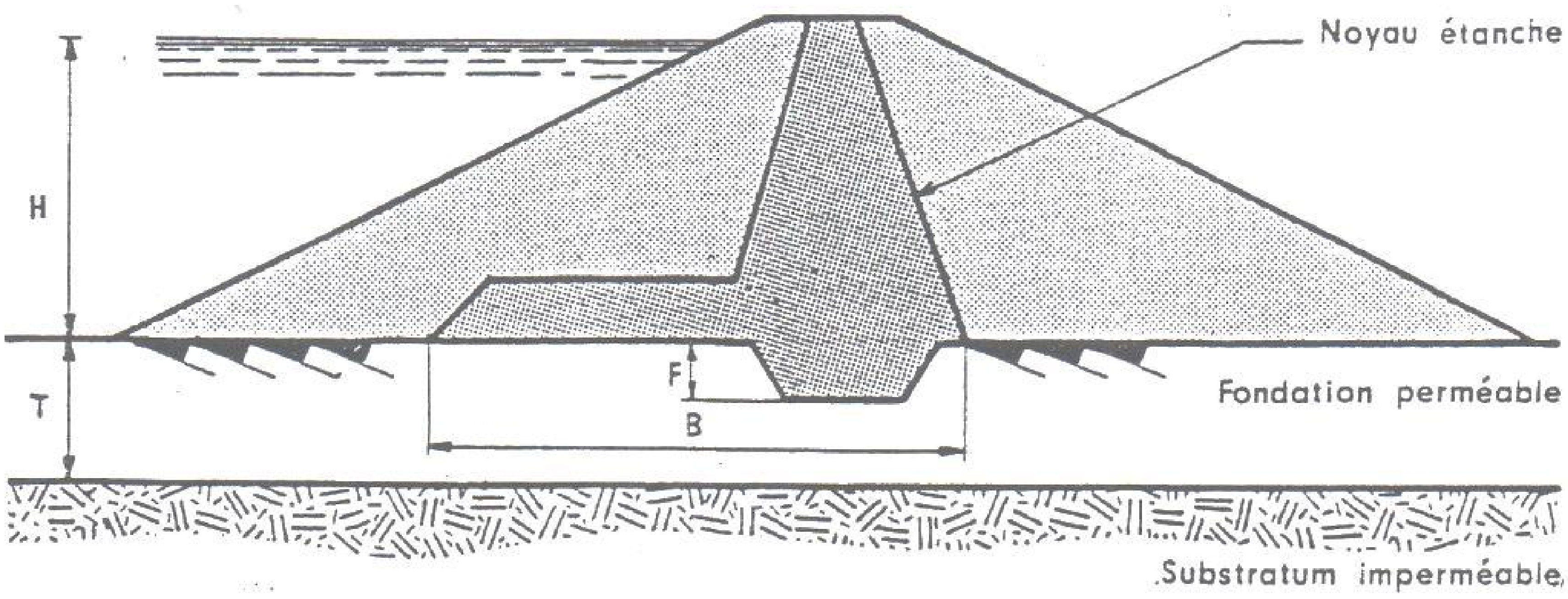


Figure N°36 : Débit de fuite à travers fondation

Si B est négligeable devant F, on peut utiliser la formule de SCHOKLITSCH :

$$q = C.K_H.H$$

Avec ; $C = f\left(\frac{F}{T}\right)$

F/T	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
C	100	80	67	58	50	43	37	31	25

Autre méthode :

$$q = \frac{1}{2}K_H.H.\log\left[\frac{\frac{2T}{B}+\sqrt{1+4\frac{T^2}{B^2}}}{\frac{2F}{B}+\sqrt{1+4\frac{F^2}{B^2}}}\right]$$

Pour un massif anisotrope de perméabilité verticale et horizontale, on prend pour les calculs :

$$K = \sqrt{K_V.K_H}$$

Le calcul de la pression interstitielle en point M_0 situé au côté z_0 est :

$$P_0 = \rho g(z_1 - z_0)$$

D'où z_1 est la cote du point M_1 qui représente l'intersection entre la ligne phréatique et la ligne équipotentielle qui passe par M_0.

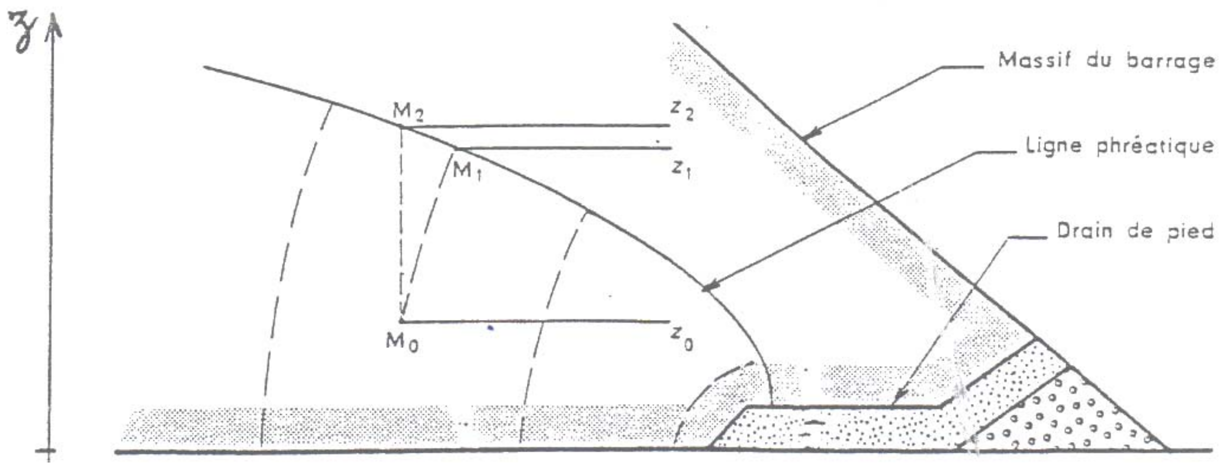


Figure N°37 : détermination de la pression interstitielle.

4. Protection contre le renard :

Lutter contre la formation des renards consiste :

- Soit à supprimer les infiltrations si on le peut en formant des coupures imperméables par un écran étanche.
- Soit à réduire la force volumique visqueuse, c'est-à-dire à réduire la valeur du gradient hydraulique, donc à allonger les lignes d'écoulement.
- Soit à empêcher l'amorçage du phénomène, c'est-à-dire disposer dans la zone de résurgence des filtres chargés d'empêcher l'entraînement des particules solides.

4.1. Ecrans étanches

Il existe différentes techniques utilisables pour réaliser ces écrans (murs en béton, noyaux d'argile, murs de palplanches, parois moulées, voiles d'injection).

4.2. Allongement des lignes d'écoulement

Afin de réduire les forces volumiques visqueuses on cherche à rallonger le parcours moyen des lignes d'écoulement.

BLIGHT puis LANE ont proposé des règles expérimentales définissant un gradient moyen maximum qui est supposé tel qu'en aucun point dans le sol les conditions d'entraînement du sol ne soient requises. D'autre part ce gradient est défini sur la ligne de courant qui suit le contact ouvrage-sol de fondation en effet, ce contact est un lieu d'écoulement privilégié où les renards risquent davantage de se former.

Il est possible d'obtenir un allongement de cette ligne de courant particulière en réalisant un ou plusieurs parafouilles imperméables.

BLIGHT proposait la condition :

$$\frac{L_h + \sum I_v}{H} \geq \frac{l}{i_{moy}} = C$$

LANE a modifié cette condition en affectant un coefficient minorateur égal à 1/3 aux distances horizontales pour tenir compte des décollements possibles par suite de tassements sous la fondation :

$$\frac{1/3\,L_h + \sum I_v}{H} \geq \frac{l}{i_{moy}} = C$$

Le coefficient C dépend de la nature des terrains :

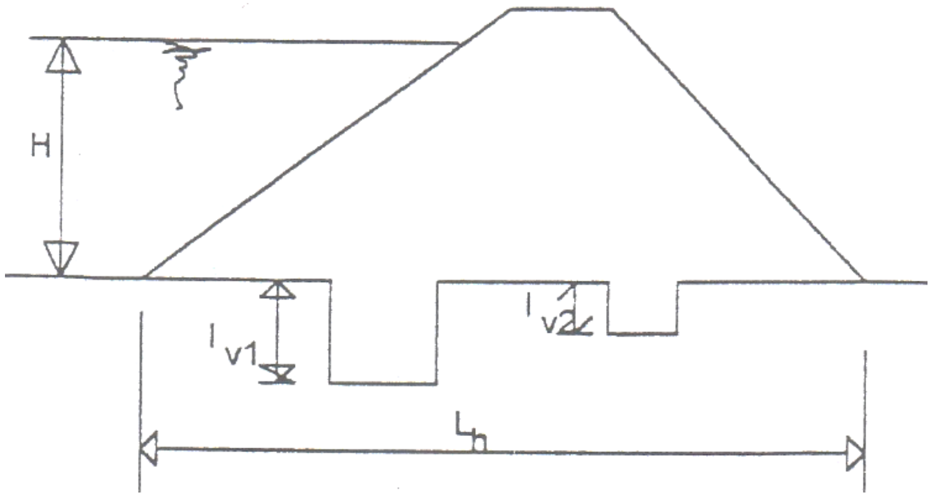


Tableau N°04 : Valeurs du coefficient « C » de LANE :

N°	Nature du terrain	C
1	Sables fins et limons	8,5
2	Sables fins	7
3	Sables moyens	6
4	Gros sables	5
5	Petits graviers	4
6	Gros graviers	5
7	Mélang de graviers et de galets	2,5
8	Argile plastique	3
9	Argile consistante	2
10	Argile dure	1,8

4.3. Utilisation des filtres :

L'apparition du renard est due à l'existence de contraintes effectives trop faibles dans les zones de résurgence. Un moyen de lutte contre le renard consiste alors à charger ces zones avec des matériaux plus perméables les contraintes effectives sont ainsi augmentées ; les pertes de charges dans le matériau filtrant étant négligeables le risque de renard dans le filtre n'existe donc pas (au contraire une charge constituée par un matériau imperméable serait dangereuse : la perte de charge augmente et le renard se formait mieux).

Pour la protection des massifs de barrage, on a deux types de filtre :

- Le filtre (ou drain) de pied horizontal ou drain tapis

- Le filtre (ou drain) cheminée (ou drain vertical).

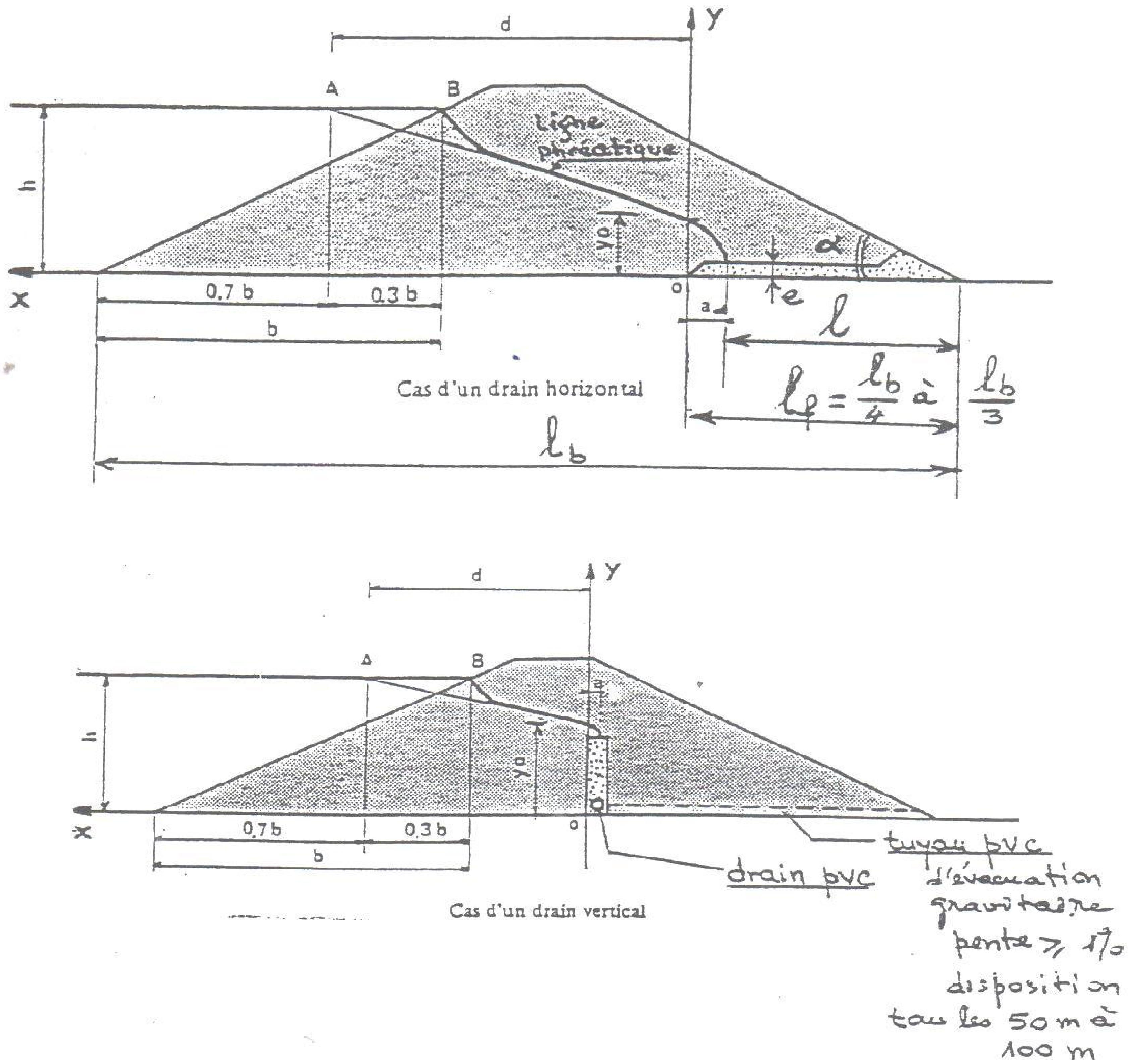


Figure N°39 : Utilisation des filtres.

4.3.1. Drain Tapis :

Pour intercepter les infiltrations dans le massif d'un barrage en terre on dispose habituellement dans la partie aval du massif et au contact de celui-ci avec les fondations, un drain-tapis filtrant désigné à rabattre la ligne phréatique à l'intérieur du massif. Ce drain s'étend sur $\frac{l_b}{4}$ à $\frac{l_b}{3}$ de l'emprise du barrage. Son épaisseur se calcule en fonction du débit de fuite.

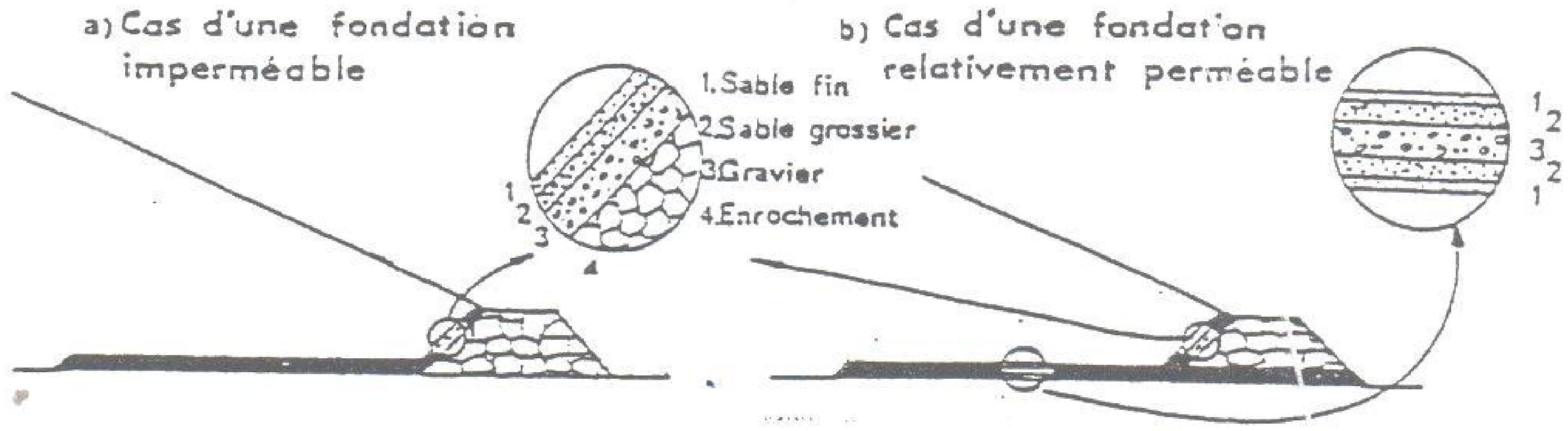


Figure N°40 : Drain de tapis filtrant

Lorsque la fondation n'est pas complètement imperméable, ce drain interceptera également les infiltrations à travers la fondation. Il doit être alors protégé contre l'entrainment des éléments fins de la fondation par un filtre inversé.

Le drain tapis filtrant est efficace dans la mesure où la perméabilité du massif est isotrope. Très souvent, du fait de la technique d'exécution des barrages en terre qui consiste à compacter la terre par couches horizontales, il existe une anisotropie assez forte du barrage, la perméabilité verticale étant inférieure à la perméabilité horizontale. De ce fait le drain-tapis est souvent inefficace et on observe des affleurements de nappes sur les talus aval de nombreux barrages munis de drain-tapis.

Le débit unitaire et l'épaisseur du drain tapis à travers un filtre horizontal

Peuvent s'évaluer comme suit :

$$q = K_f .i.A$$

Où A est la valeur moyenne de la section mouillée.

$$i = \frac{H}{l} = \frac{e-h}{l}$$

$$A = \frac{e+h}{2}(moyenne)$$

$$q = K_f \frac{e^2 - h^2}{2l}$$

$$e = \sqrt{\frac{2ql}{K_f} + h^2}$$

h étant petit, on peut négliger h^2 d'où :

$$e = \sqrt{\frac{2ql}{K_f}}$$

Il est prudent de prendre un débit q est égal au double du débit de fuite estimé. Ainsi, l'épaisseur e du filtre à prévoir :

$$e = 2\sqrt{\frac{ql}{K_f}}$$

La valeur de l n'est pas égale à la longueur totale du tapis filtrant, il faut retrancher la longueur de résurgence qui est égale à :

$$a = \frac{q}{K_f}$$

La longueur totale l_f du tapis filtrant sera :

$$l_f = l + a$$

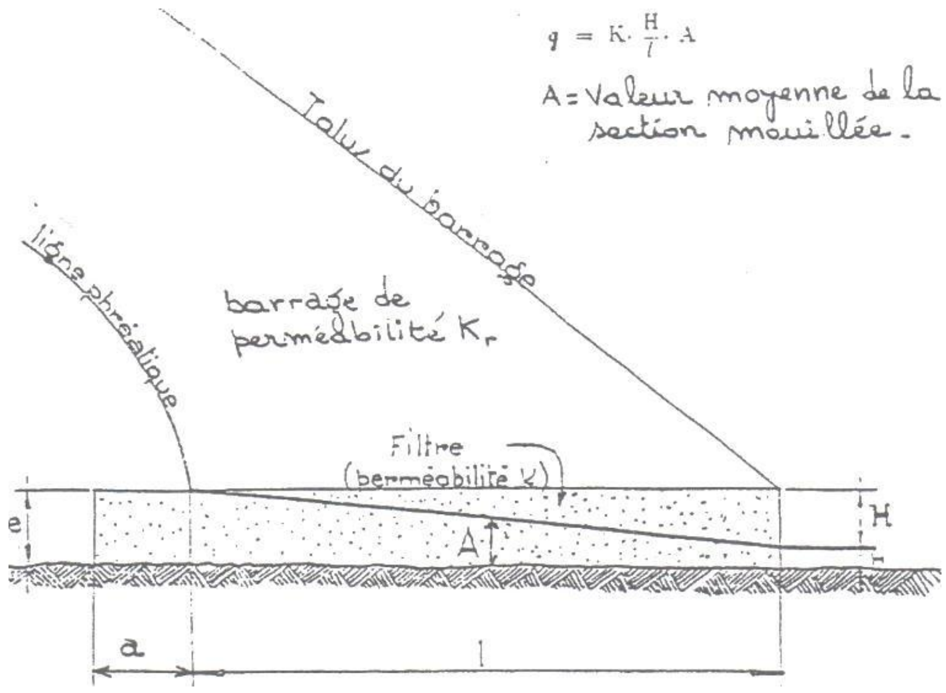


Figure N°41 : Débit unitaire à travers un filtre horizontal.

4.3.2. Drain vertical :

Le drain vertical placé au centre de la digue constitue une solution plus efficace pour intercepter les eaux d'infiltration. Un tel drain est constitué d'un rideau d'une largeur (épaisseur) minimale de 1 m en matériau grossier (graviers et sables) dont la granularité est choisie de manière à ce que les conditions de filtre soient réalisées. Il peut remonter pratiquement jusqu'à la cote moyenne du plan d'eau dans la retenue.

L'eau de percolation interceptée par ce drain filtrant est évacuée soit par un réseau de tuyaux-drains soit par un drain-tapis filtrant, s'il est également nécessaire de drainer les fondations.

Le drain vertical peut être constitué uniquement de gravier, le rôle de filtre étant alors assuré par un tapis synthétique placé en fond de tranchée, le long de la paroi amont du drain et au-dessus du drain.

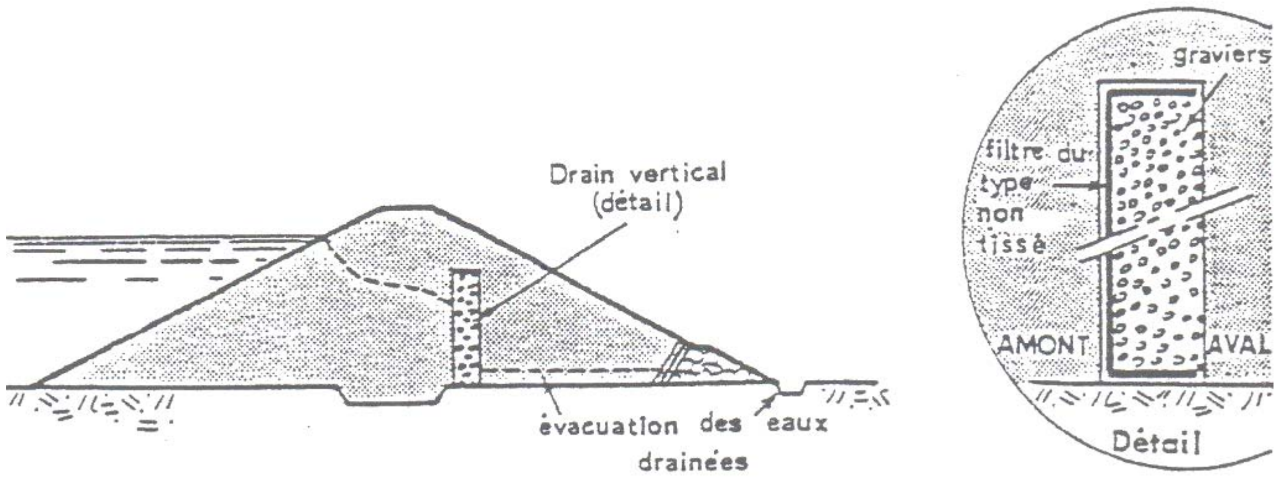


Figure N°42 : Drain vertical

4.3.3. Loi des filtres ou règles de non contamination :

Un filtre ne doit ni se dégrader par entrainement de ses éléments, ni se colmater. Il est conseillé pour cela d'utiliser des sables dont le coefficient d'uniformité $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ est supérieur à 2.

Si on schématise par D_x et d_x les dimensions des grains du filtre et du matériau de base qui correspondent au point d'ordonnée *x* % sur la courbe granulométrique, les conditions à respecter d'après **TERZAGHI** sont :

Granulométrie étroite : $5 < \frac{D_{50}}{d_{50}} < 10$

Granulométrie étendu : $\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4$ ou 5 et $\frac{D_{15}}{d_{85}} > 4$ ou 5

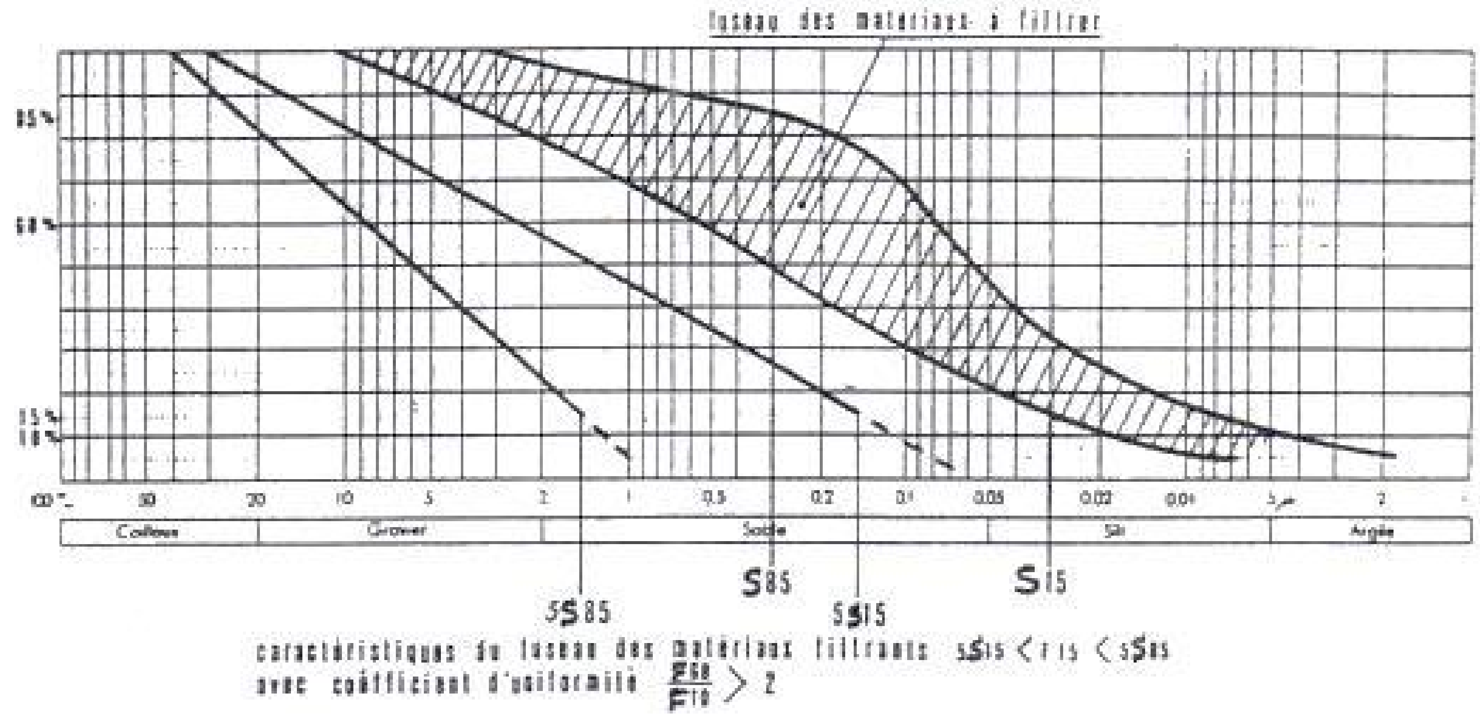


Figure N°43 : Granulométrie d'un filtre.

- La courbe granulométrique du matériau constituant chaque couche du filtre doit être à peu près parallèle à celle du matériau de la couche précédente.

- L'épaisseur de chaque couche doit être au moins de 20 à 30 cm et en tout cas supérieure ou égale à 50 fois le diamètre F_{15}.
- La valeur de la perméabilité d'un filtre est donnée avec une assez bonne approximation (50 %) par la formule de **HAZEN** pour les matériaux sableux.

$K = 100 D_{10}^2$ où D_{10} est en cm et K en cm/s.