

CHAPITRE V: ÉCOULEMENT A SURFACE LIBRE ET DÉVERSOIRS.

V.1- Définitions essentielles : les paramètres géométriques.

Ces paramètres sont relatifs à une section du chenal dans un plan perpendiculaire à son axe, dont la position est définie par une abscisse (x). Les paramètres essentiels sont le tirant d'eau (y), la section mouillée (S), la largeur au miroir (L) ou largeur de la section mouillée, le périmètre mouillé (P). Ils sont définis sur le schéma de la figure I.1. Bien noter que le périmètre mouillé est la longueur de paroi en contact avec l'eau (berges et fond), mais ne comporte pas le contact eau-atmosphère.

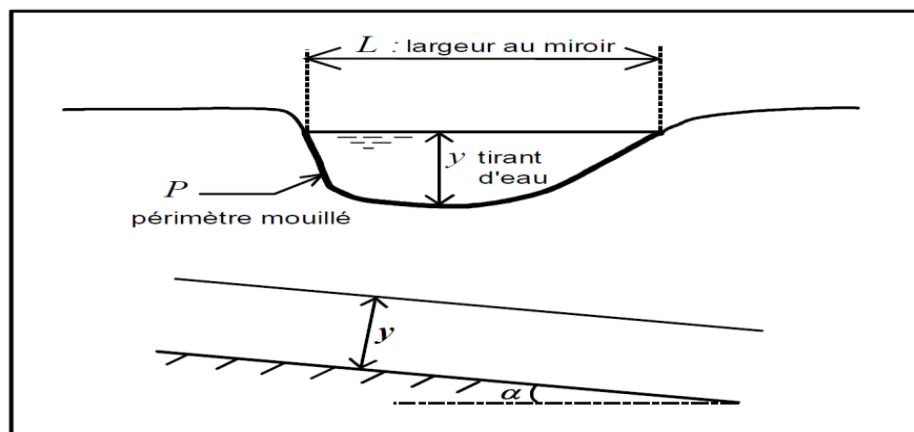


Figure V.1 - Tirant d'eau, largeur au miroir et section mouillée.

Le rayon hydraulique est le rapport entre section mouillée et périmètre mouillé, $R = S/P$.

- Pour un canal rectangulaire, $R = \frac{L \cdot y}{L + 2 \cdot y}$
- Pour un canal infiniment large, $R = y$.

La pente du chenal est la pente de son fond, mesurée tout le long de son axe, et comptée positivement si le chenal est descendant. Elle est notée i ($i = \sin \alpha$). Si z désigne la cote du fond, alors $i = -dz/dx$

V.2 Type D'écoulement :

Une classification des écoulements peut se faire selon la variation de la profondeur, h ou dh , en fonction du temps et de l'espace : $dh = f(t, x)$.

V.2.1 Variabilité dans le temps:

Le mouvement est permanent si les vitesses moyennes, V , et ponctuelles, u , ainsi que la profondeur, h ou dh , restent invariables dans le temps en grandeur et en direction. Par conséquent, le débit est constant : $Q = V \cdot S$ entre les diverses sections du canal sans apport latéral.

Le mouvement est non permanent si la profondeur, $dh(t)$, ainsi que les autres paramètres varient avec le temps. Par conséquent, le débit n'est pas constant. En pratique, l'écoulement dans les canaux est rarement permanent. Néanmoins, les variations temporelles sont souvent suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme permanent, du moins dans un intervalle de temps relativement court.

V.2.2 Variabilité dans l'espace:

Trois cas sont à envisager :

a) Le mouvement est uniforme si la profondeur, dh , ainsi que les autres paramètres, restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente de fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre et l'on a $i = J$.

b) Le mouvement est non uniforme ou varié si la profondeur, $dh(x)$, ainsi que les autres paramètres, changent d'une section à l'autre. La pente de fond diffère alors de celle de la surface libre, $i \neq J$.

L'écoulement non uniforme peut être permanent ou non permanent. Lorsque le mouvement est graduellement varié, la profondeur, $dh(x) = dh$, ainsi que les autres paramètres, ne changent que très lentement d'une section à l'autre.

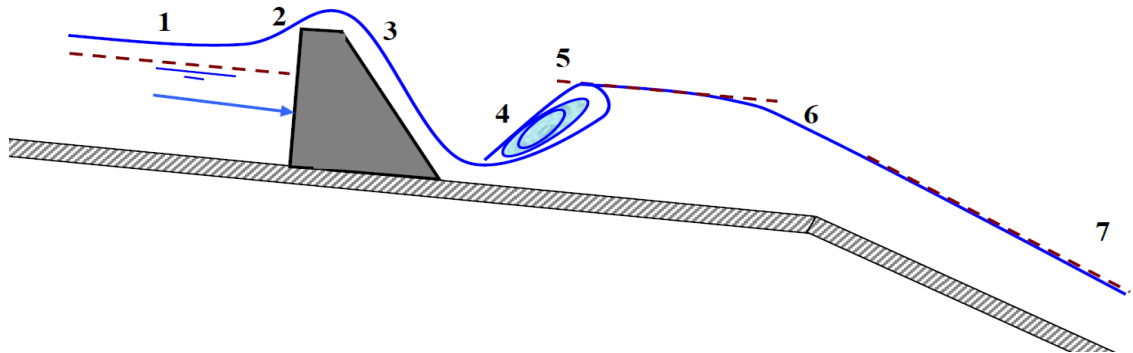


Figure V.2 - Schéma représentant les différents régimes d'écoulement.

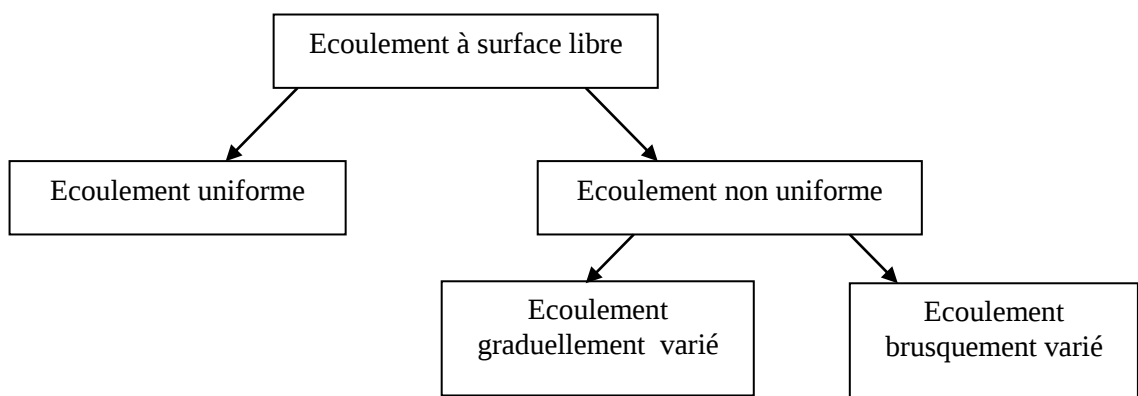
Légende :

- | | |
|---|---|
| 1) uniforme fluvial. | 2) fluvial graduellement décéléré. |
| 3) rapidement accéléré (fluvial puis torrentiel). | 4) ressaut. |
| 5) uniforme fluvial. | 6) rapidement accéléré (fluvial puis torrentiel). |
| 7) uniforme torrentiel. | |

c) Lorsque le mouvement est rapidement varié, la profondeur $dh(x)$, ainsi que les autres paramètres changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un déversoir, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque.

V.2.3 Différents types d'écoulement :

Les types d'écoulement qu'on rencontre en hydraulique à surface libre peuvent être résumés ainsi :



V.2.4 Les régimes d'écoulement :

Le nombre de Froude, qui est le rapport entre les forces de gravité et celles d'inertie ou:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

- ✓ écoulement fluvial : $Fr < 1$
- ✓ écoulement torrentiel : $Fr > 1$
- ✓ écoulement critique : $Fr = Fr_{cr} = 1$

- **REGIME UNIFORME:** (Fig. VI.3)

- L'écoulement considéré comme uniforme si la hauteur h constante le long de l'écoulement.
- La pente de la surface libre égale (i_p), égale à la pente du radier (i_r), égale à la pente hydraulique (I), $I = i_p = i_r$.

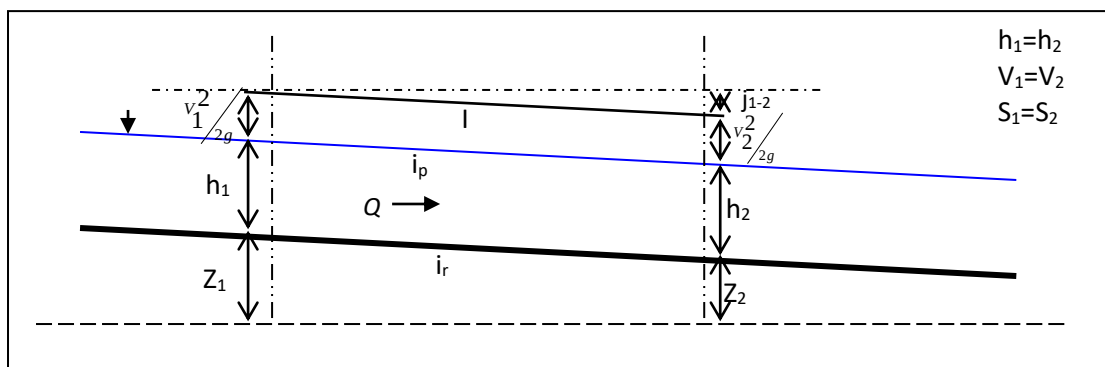


Figure V.3- Ecoulement uniforme dans un canal

L'écoulement uniforme doit remplir les conditions suivantes :

1. Le débit de l'eau dans le lit est constant.
2. Le canal est prismatique.

$$S_{\text{mouillé}} = \text{constante}, P_{\text{mouillé}} = \text{constant}, R_h = \frac{S_m}{P_m} = \text{constant}, I = i_p = i_r, h = \text{constant}.$$

3. La pente du radier est constante.
4. La rugosité du canal est constante le long de l'écoulement.
5. Les lignes de l'écoulement sont parallèles.

Formules de calcul principales :

a. Vitesse moyenne de l'écoulement :

La formule principale de calcul pour un écoulement à surface libre est celle de Chezy:

$$V = C\sqrt{R.i}$$

Où:

V: vitesse d'écoulement.

C: coefficient de Chezy.

R: rayon hydraulique.

i: la pente du fond du canal (pente du radier)

Pour déterminer C, on peut utiliser l'une des formules suivantes :

- Formule de Bazin : $C = \frac{87\sqrt{R}}{\gamma + \sqrt{R}}$

- Formule de Kutter : $C = \frac{100\sqrt{R}}{\eta + \sqrt{R}}$.

- Formule de Maning: $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$

γ, η Et n sont des coefficients qui dépendent de la rugosité des parois

$\gamma = 0,16, \eta = 0,2, n = 0,0125 \Rightarrow$ canaux en brique, pierre ou planche.

$\gamma = 1,8, \eta = 1,3, n = 0,0167 \Rightarrow$ canaux en terre.

- Formule de Manning-Strickler:

$$V = K_s R^{2/3} i^{1/2} \dots\dots\dots VI.5$$

b. Le débit de l'écoulement :

$$Q = V \times S, \quad V = C\sqrt{R.i}$$

$$\Rightarrow Q = C.S.\sqrt{R.i} \dots\dots\dots VI.6$$

$$\Rightarrow Q = C.S\sqrt{R}\sqrt{i} \Rightarrow Q = K\sqrt{i}, \quad K = \text{module du débit}, K = C.S\sqrt{R}$$

c. Caractéristiques géométriques d'un canal trapézoïdal et rectangulaire :

a/ Section rectangulaire:

$$S_m = b.h$$

$$P_m = b + 2h$$

$$R = \frac{S_m}{P_m} = \frac{bh}{b + 2h}$$

$$\text{Si } b \gg h \Rightarrow R \approx h \quad / \quad R = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{bh}{b + 2h} = h$$

b/ Section trapézoïdale :

$$S_m = (b + mh)h, \quad m = \frac{1}{\tan \alpha}$$

$$P_m = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$$

$$\text{Si } b \gg h \Rightarrow R \approx h$$

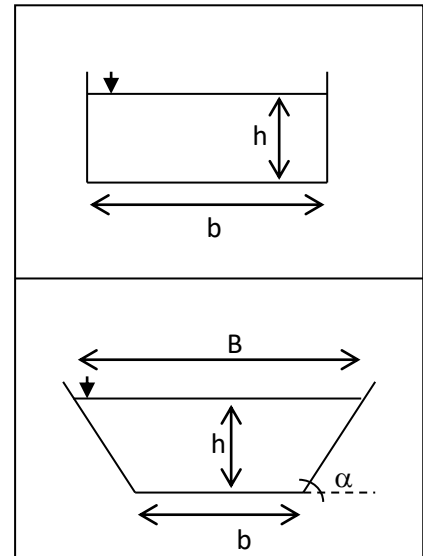


Figure VI.4- Sections des canaux

Remarque: les sections transversales les plus utilisées sont : trapézoïdale, triangulaire, rectangulaire et semis circulaire.

Si la section du canal donne une valeur minimum du périmètre mouillé (P_m) et un débit maximum (Q), donc cette section s'appelle: "Section hydraulique la plus avantageuse"

$$(S_m = 2h^2, P_m = 4h, R = \frac{S_m}{P_m} = h/2)$$

- **REGIME NON UNIFORME (PERMANANT VARIE)**

- a. **Définition :**

Lorsque les trajectoires des différents filets liquides s'écoulent dans un canal ne sont pas parallèles entre elle, on a en régime varié (la surface libre et le fond du canal ne sont pas parallèles). Ce type de mouvement se produit dans un canal dans la section transversale variée (comme les cours d'eau naturel).

On peut classer les écoulements variés en deux grandes catégories:

a/ Les écoulements graduellement variés dans lesquels les paramètres hydrauliques variés très progressivement d'une section à l'autre.

b/ Les écoulements brusquement variés, caractérisés par une variation plus rapide et parfois discontinue des phénomènes, (Chute, ressaut hydraulique...).

- b. **Notions principales des théorèmes des écoulements non uniformes :**

- * **Théorème de Bernoulli:**

On applique l'équation de Bernoulli entre les sections 1.1 et 2.2 (Figure.VI.6)

$$Z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + J_{1-2}$$

On introduit α pour tenir compte de l'inégale répartition des vitesses dans les sections transversales).

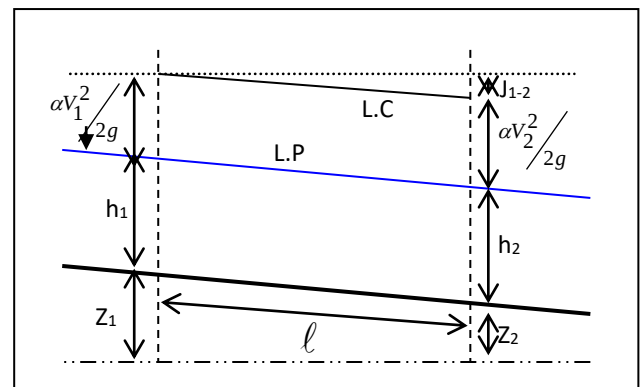


Figure VI.6- Ecoulement non uniforme dans un canal

$$H_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta H \Rightarrow dH + d\left(\alpha \frac{V^2}{2g}\right) + d\Delta H = 0 \dots \dots \text{VI.9}$$

On divise par $d\ell$, on obtient :

$$\frac{dH}{d\ell} + \frac{d}{d\ell}\left(\alpha \frac{V^2}{2g}\right) + \frac{d\Delta H}{d\ell} = 0 \dots \dots \text{VI.10}$$

$i_p = \frac{dH}{d\ell}$: Pente de la surface libre (pente piézométrique)

$i_p = \frac{d\Delta H}{d\ell}$: Pente hydraulique qui peut déterminer avec la formule de chezy: $I = \frac{V^2}{C^2 k}$

$\frac{dH}{d\ell} > 0$: Signifie que la profondeur croît le long du canal, l'écoulement est divergent retardé, (on observe des remous)

$\frac{dH}{d\ell} = 0$: Écoulement normal, ainsi uniforme $i=I$

$\frac{dH}{d\ell} < 0$: Représente une dépression, l'écoulement est accéléré convergent.

c. Énergie spécifique E_s :

Examinons une certaine section d'un canal, cette section est parcourue par un débit Q , à la profondeur de remplissage h , l'énergie spécifique est: $E_s = h + \frac{V^2}{2g}$

$$E_s = h + \frac{Q^2}{2gS^2}$$

d. Profondeur critique :

Supposons que dans l'équation (VI.11), le débit Q est constant et h variable, on peut écrire:

$$E_s = f(h) = E_p + E_c$$

Avec : E_p : énergie potentielle. $E_p = h$

$$E_c: \text{énergie cinétique. } E_c = \frac{Q^2}{2gS^2}$$

Construisons la courbe de variation de E_p , E_c , et E_s en fonction de h (Fig. VI.10)

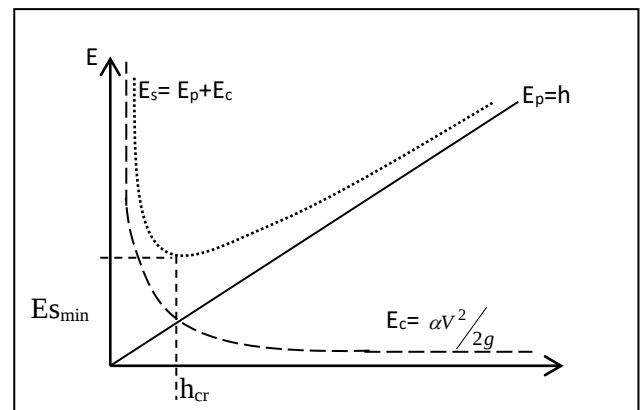


Figure VI.7- $E=f(h)$

$$1/ \text{ si } h \rightarrow 0, S \rightarrow 0 \rightarrow E_C \rightarrow \infty$$

$$2/ \text{ si } h \rightarrow \infty, S \rightarrow \infty \rightarrow E_C \rightarrow 0$$

La valeur de la profondeur h à laquelle l'énergie spécifique devient min s'appelle h_{cr} (profondeur critique).

Tous les éléments, qui sont en fonction de h_{cr} jouissant, (S_{cr} , P_{cr} ...)

Puisque h_{cr} correspond à l'énergie spécifique min donc:

→ **Détermination h_{cr} :**

*** Section rectangulaire :**

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{S_{cr}^3}{B} \Rightarrow h_{cr} = 3\sqrt{\frac{Q^2}{gb^2}} = 3\sqrt{\frac{q^2}{g}}$$

*** Section triangulaire :**

$$S_{cr} = \frac{1}{2}bh_{cr} \Rightarrow h_{cr} = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gm^2}}$$

*** Section trapézoïdale :**

On utilise la formule d'Agroskine:

$$h_{cr} = \left(1 - \frac{Z_r}{3} + 0,105Z_r^2\right)h_{cr1}$$

$$Z_r = \frac{mh_{cr1}}{b}$$

h_{cr1} , c'est la profondeur critique pour une section rectangulaire de largeur b .

En comparant la hauteur de l'écoulement non uniforme h avec la h_{cr} on déduit les types des écoulements suivants: Si $h > h_{cr} \Rightarrow$ Ecoulement fluvial

$h = h_{cr} \Rightarrow$ Ecoulement critique.

$h < h_{cr} \Rightarrow$ Ecoulement Torrentiel.

e. Paramètre cinétique :

Le terme $\frac{Q^2 B}{g S^3}$ s'appelle le paramètre cinétique, il est désigné par F_r et il s'appelle le nombre de Froude. A partir de ce nombre, en déduit les différents types d'écoulement:

$F_r < 1 \Rightarrow$ Ecoulement fluvial

$F_r = 1 \Rightarrow$ Ecoulement critique

$F_r > 1 \Rightarrow$ Ecoulement Torrentiel.

f. Equation fondamentale de l'écoulement non uniforme graduellement varié dans un lit prismatique:

Le but est de trouver la relation entre les profondeurs du courant dans les différentes sections. La relation suivante c'est l'équation fondamentale de l'écoulement non uniforme graduellement varié dans le cas d'un canal prismatique, cette équation nous donne la relation entre h et ℓ (ou la forme de la courbe de remous).

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{i - I}{1 - F_r^2}$$

• Ecoulement brusquement varié :

Les écoulements rapidement variés se rencontrent soit en cas de changements de géométrie brutaux en plan (convergents, divergents), soit dans le cas d'écoulements dont les lignes de courant deviennent très courbes (en profil).

a. Ressaut hydraulique :

Un ressaut est obtenu lorsqu'un écoulement torrentiel «rencontre» un écoulement fluvial. Le passage se fait avec une forte discontinuité du tirant d'eau, et une importante agitation qui dissipe une grande part de l'énergie acquise dans le tronçon torrentiel. L'observation montre de grands tourbillons, des remous ainsi que de nombreuses bulles d'air entraînées.

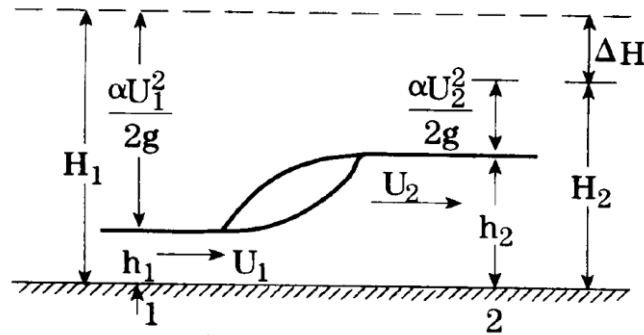


Figure V.8 - passage torrentiel – fluvial (ressaut hydraulique)

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguées du ressaut. La distance entre les sections 1 et 2 est appelée longueur du ressaut. La perte de charge est représentée par ΔH .

Les tirants d'eau conjugués.

$$h_2 = -\frac{y_1}{2} + y_1 \frac{\sqrt{1 + 8.F_1^2}}{2}$$

$$h_1 = -\frac{y_2}{2} + y_2 \frac{\sqrt{1 + 8.F_2^2}}{2}$$

b. Typologie et longueur du ressaut

D'après Lencastre, sont distingués cinq types de ressaut (figure VI.7).

- Le ressaut ondulé est obtenu pour des nombres de Froude inférieurs à 1,7. Seules quelques légères rides sont observées en surface.
- Le ressaut faible est obtenu pour des nombres de Froude compris entre 1,7 et 2,5. Des petits tourbillons ou rouleaux prennent naissance.
- Le ressaut oscillant apparaît pour des nombres de Froude compris entre 2,5 et 4,5. Des turbulences fortes se produisent non seulement en surface, mais aussi au fond et cela de manière irrégulière. Ces turbulences peuvent se propager loin à l'aval.
- Lorsque le nombre de Froude est compris entre 4,5 et 9, le ressaut est dit établi ou stationnaire. Il est bien localisé et efficace en terme de dissipation de l'énergie.
- Enfin, au-delà d'un nombre de Froude de 9, ce qui ne se rencontre pas en rivière, le ressaut est dit fort. De véritables paquets d'eau sont projetés par intermittence.

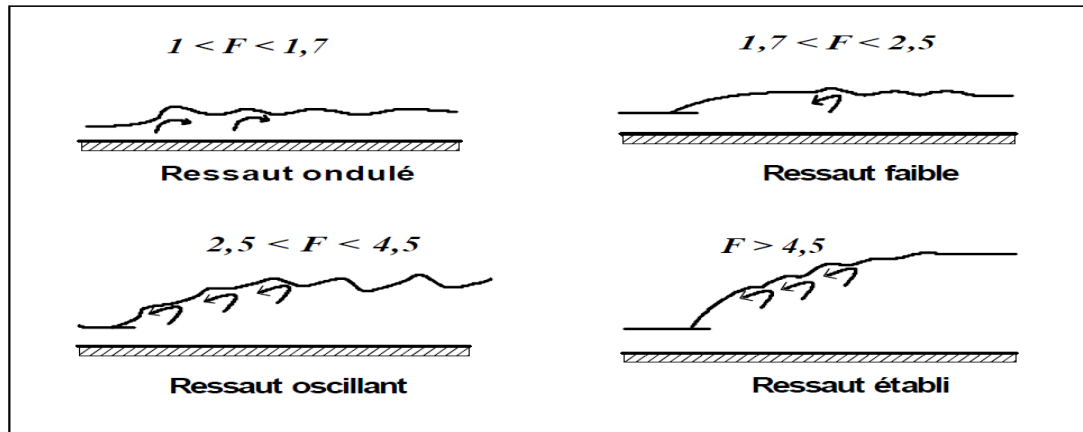


Figure VI.9- typologie des ressauts.

V.3 Les seuils et déversoirs

Définition :

Un déversoir est un orifice superficiel ouvert à sa partie supérieure et pratiqué dans une paroi généralement verticale.

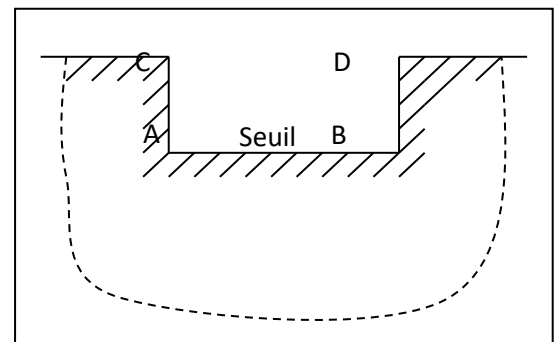


Figure V.10 : Déversoir rectangulaire

➤ Phénomène

- Le niveau supposé constant à l'amont, s'abaisse sensiblement au dessus du seuil.
- La hauteur H du niveau constant d'amont au dessus du seuil est la charge.
- A l'aval, la lame déversante ou nappe déversante peut présenter différentes formes, en rapport avec la charge et le niveau d'aval.

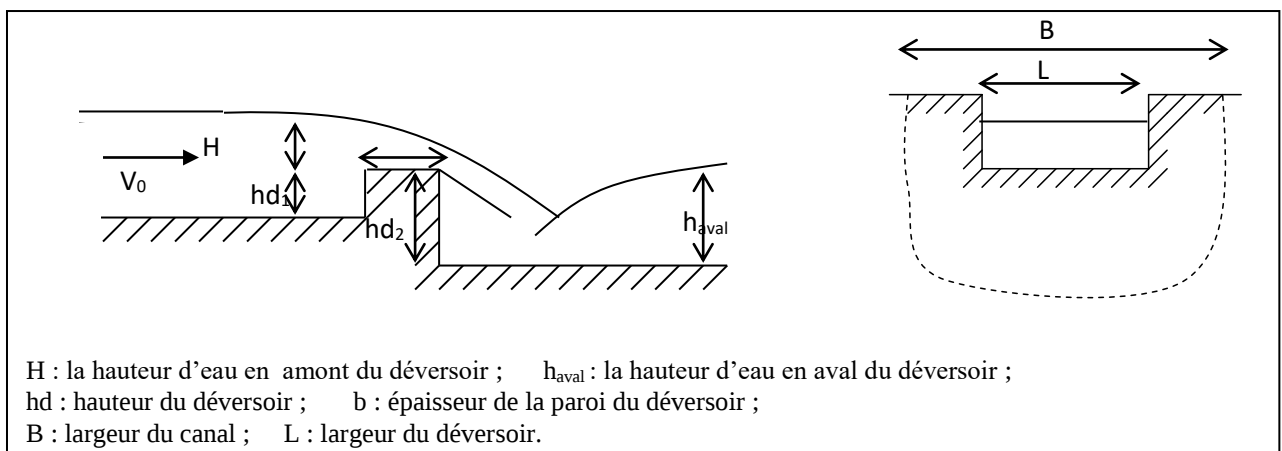


Figure V.11- Ecoulement au-dessus d'un déversoir

V. 3.2 Classification des déversoirs:

La classification des déversoirs est basée sur les caractéristiques du déversoir telle que:

- Profil (forme de la paroi)
- Dimension de la section transversale (contraction latérale, forme en élévation).
- Forme de la nappe déversante et la position du niveau aval.
- Forme de la paroi: $\rightarrow$ Si $b < 0,5 H \Rightarrow$ déversoir à mince paroi.
 $\rightarrow$ Si $2 H < b < 10 H \Rightarrow$ déversoir à seuil épais.
 $\rightarrow$ Si $0,5 H < b < 2 H \Rightarrow$ déversoir à seuil normal.

V.3.3 Equation générale des déversoirs:

Le débit dans le déversoir dépend de la longueur L du déversoir de la charge H , de la vitesse d'approche du courant V_0 et de l'accélération de la pesanteur g .

→ Pour un déversoir dénuyé (Fig. 7.12.a), le débit est donné par la formule suivante :

$$Q = m_0 L \sqrt{2g} . H_0^{3/2}$$

Où, m_0 : c'est un coefficient qui tient compte du type de déversoir et qui s'appelle coefficient de déversoir.

$$H_0 : \text{C'est la charge totale : } H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g} .$$