

Introduction :

Le débit est un élément de base dans la construction hydraulique d'où sa mesure demeure nécessaire même primordiale.

Actuellement les méthodes et les appareils qui permettent de mesurer le débit diffèrent, parmi les appareils qui sont utilisés pour la mesure du débit à l'air libre, un grand nombre sont des structures hydrauliques appartenant à la famille des déversoirs et des canaux.

Ces derniers utilisent la capacité du ressaut pour surélever la charge aval d'où leur nom jaugeur à ressaut, tandis que pour les déversoirs le principe est simple, ce sont ceux qui utilisent le libre déversement par-dessus une paroi verticale et pour le quel la charge aval est faible, et chacun de ces appareils présente ces propres avantages et ces inconvénients.

Ce premier chapitre de notre étude présentera une recherche bibliographique dans la quelle sont décrits quelques-uns des déversoirs les plus couramment utilisés.

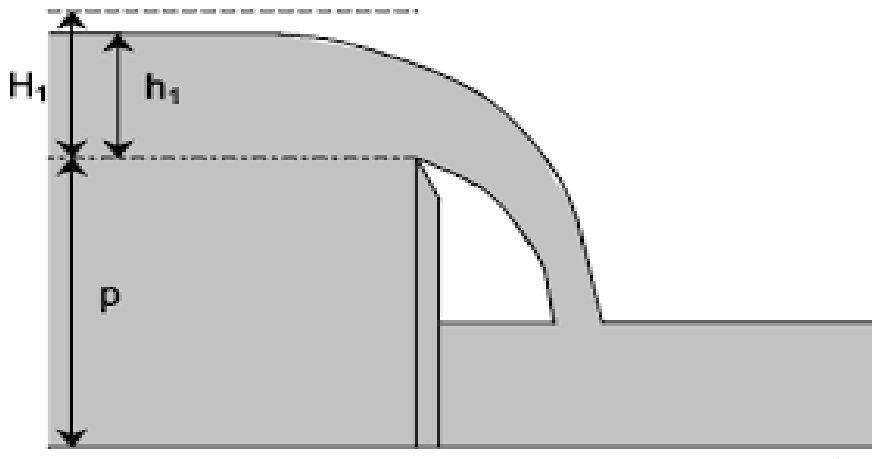


Figure II. 1: image d'un déversoir.

II-1- Définition : [8]

Le déversoir est un orifice incomplet ou encore tout ouvrage par-dessous lequel s'effectue un écoulement avec formation à l'aval d'une veine libre.

Le déversoir peut être à mince paroi ou à paroi épaisse. La nappe déversante peut être libre lorsque l'air peut circuler librement en dessous ou déprimée, adhérente dans le cas contraire.

Les déversoirs comptent parmi les plus simples et les plus anciens appareils de mesure du débit. Ce sont des structures hydrauliques formant un obstacle par exemple une paroi verticale disposée en travers de l'écoulement et comportant une ouverture ou une entaille de forme particulière, elle peut être rectangulaire triangulaire, trapézoïdale ou même circulaire, aussi elle peut être à paroi mince ou à paroi épaisse.

Le débit est déterminé à partir d'une simple lecture limnimétrique du plan d'eau amont au-dessus de l'arête du déversoir. Un déversoir peut être défini comme étant une structure construite en travers d'un conduit ouvert, pour mesurer la quantité de liquide qui s'écoule.

II-2- Rôle du déversoir :

Le déversoir remplit deux tâches importantes dans le fonctionnement du seuil. D'abord il concentre l'écoulement vers le centre du cours d'eau évitant ainsi l'affouillement des berges.

Puis, s'il a été choisi judicieusement, il permet également de créer une zone de courant lent en amont du seuil, limitant la vitesse d'écoulement à une vitesse inférieure à la vitesse maximale permise. Le déversoir évite donc de devoir protéger cette partie du cours d'eau.

II-3- type des déversoirs :**II-3-1- Déversoir à paroi épaisse :****Définition : [9]**

Un déversoir est dit à seuil épais lorsque la surélévation de la crête s'étale sur une assez grande distance l pour obtenir une surface libre horizontale est parallèle au seuil (Figure II.2). Pratiquement, on suppose que le déversoir est à seuil épais si $l > 3h$.

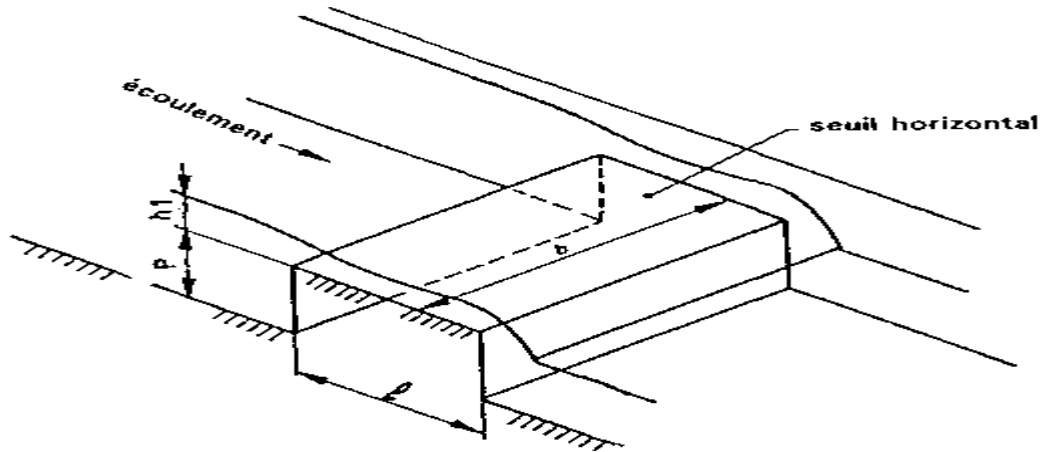


Figure II. 2 : Déversoir à paroi épaisse –Schéma de description-

Pour avoir une distribution hydrostatique des pressions et une perte d'énergie faible et il faut que la valeur de h/B soit comprise entre $0.08 \leq h/B \leq 0,50$.

Un régime critique s'établit au-dessus du seuil, de telle manière à ce que l'on obtient un écoulement dénoyé à l'aval du déversoir. L'équation de Bernoulli entre la section à l'amont du déversoir et la section de contrôle $H=ht$ est tel que :

$$Q = Sc \sqrt{2g(H - hc)} \quad (I.1)$$

Sc : est l'aire de la section de contrôle.

Afin de tenir compte de tous les effets secondaires on introduit deux coefficients. D'une part un coefficient de débit C_d , qui tient de la répartition non uniforme de la vitesse et un parallélisme non total des lignes de courant. Il est fonction de la forme du seuil et des conditions d'amenée. D'autre part un coefficient de vitesse C_v qui tient compte de l'effet de la hauteur cinématique qui est négligé (du fait qu'il est plus facile de mesurer la hauteur d'eau h que de mesurer la charge totale H). Ce qui revient à écrire :

$$Q = C_d C_v Sc \sqrt{2g(H - hc)} \quad (II.2)$$

C'est l'équation du débit pour les différents profils de déversoir à paroi épaisse.

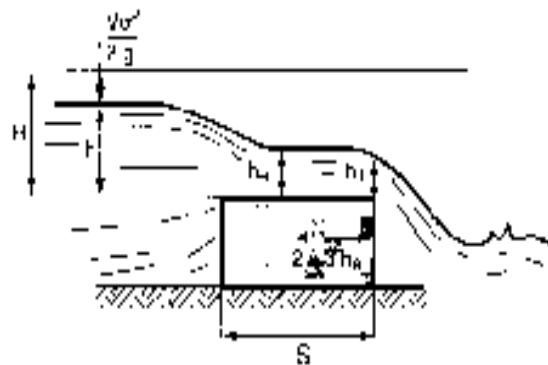


Fig. 5.5. Déversoir à seuil épais rectangulaire
(tiré de G. REMENIERAS).

Figure II. 3: Déversoir rectangulaire à paroi épaisse

[11]

II-3-2- Déversoir à paroi mince :

Un déversoir à paroi mince est une plaque de 3 à 6 mm (1/8 à 1/4 po) d'épaisseur ayant une bordure (arête) droite, ou une plaque épaisse ayant une bordure à angle de 45° servant à réduire l'épaisseur de l'arête aux dimensions précitées. Cette plaque est placée en travers de l'écoulement et force le liquide à passer par-dessus la plaque ou dans l'échancrure pratiquée dans celle-ci.

- La bordure par-dessus laquelle l'eau s'écoule s'appelle **l'arête**.
- La hauteur du déversoir entre l'arête et le fond du canal se nomme **la pelle**.
- La hauteur de l'écoulement d'eau par-dessus l'arête se nomme **la nappe**.
- L'espace d'air situé sous la nappe, du côté aval du déversoir, se nomme **la ventilation**.

Il est aussi le plus ancien car les premières études relèvent au 18ème siècle dû à (G.Poloni, 1717) qui donna l'équation de base du débit qui est donnée par :

$$Q = \frac{2}{3} \mu . B . h \sqrt{2gh} \quad (\text{II.3})$$

Où Q est le débit volume, B : la largeur du canal, μ coefficient du débit et g l'accélération de la pesanteur.

h : représente la hauteur de la lame d'eau au-dessus du déversoir et c'est de ce là que né la définition du coefficient du débit. Puisqu'il est plus facile de mesurer la hauteur d'eau h que de mesurer la charge totale H d'où il revient à négliger la vitesse d'approche on aura alors $h \approx H$ (en général dans cette zone la ligne de charge coïncide avec la surface libre).

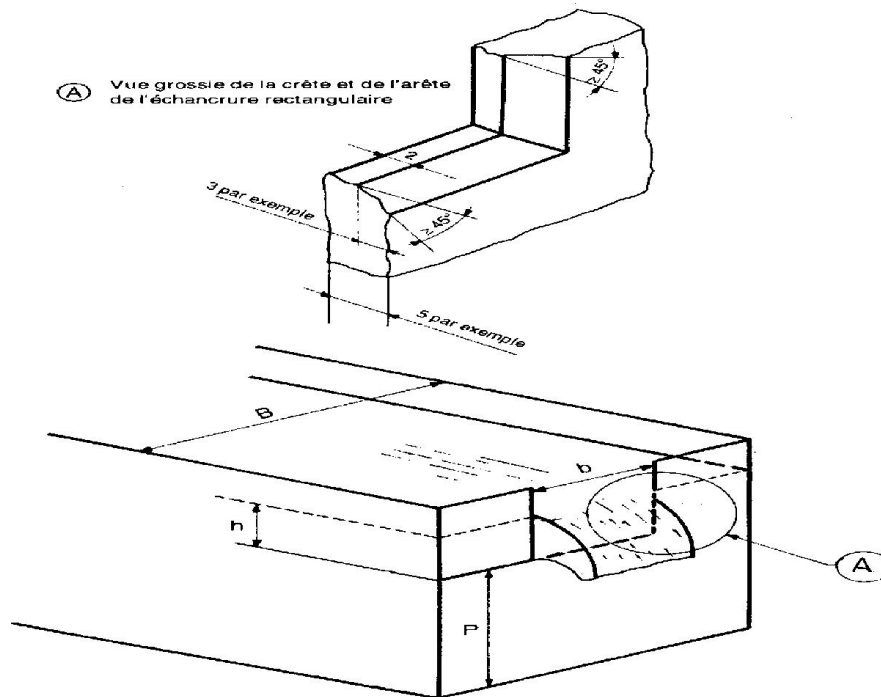
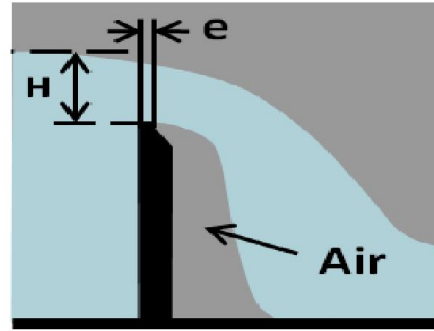
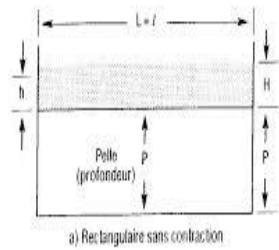


Figure II. 4 :- Déversoir - les différentes composantes d'un déversoir à paroi mince.

II-3-2-a- Déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale

Le déversoir rectangulaire est le plus classique, qui à été le mieux étudié, de part sa géométrie simple qui est représentée schématiquement par la figure (II. 5), d'où les multiples observations qui ont été effectuées ce qui à permis de donner des valeurs plus exactes du débit.

Déversoir rectangulaire

**Figure II. 5: Schéma de définition et détails du déversoir rectangulaire
à paroi mince sans contraction latérale
(e =1 à 2 mm).**

En admettant que le seuil est franchit par un écoulement en régime critique avec une charge totale H_c et de profondeur d'écoulement h_c , alors on peut écrire que :

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{2}{3} H_c$$

$$q = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{2gH_c^3} \quad (\text{II.4})$$

Où q est le débit unitaire $q = Q/B$

En admettant également en première approximation que H_c est égale à la hauteur h de déversement les relations (II.3) et (II.4) permettent d'écrire que :

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$$

Cependant les observations de Polony donnent $\mu=0,64$, ce qui permet de conclure un écart d'environ 11%. Cet écart a été attribué par (Boussinesq, 1817) à l'effet de la courbure des filets liquides franchissant l'arête du déversoir, cette courbure joue un rôle significatif et l'augmentation de la valeur du coefficient du débit est essentiellement due à son effet.

Les résultats de (Boussinesq, 1817) ont permis d'écrire que :

$$\mu = 0.651 \left(1 - 0.391 \frac{i}{\pi} \right) \quad (\text{II.5})$$

Où i désigne l'angle d'inclinaison du déversoir par rapport à la verticale comme l'indique la figure (II. 6).

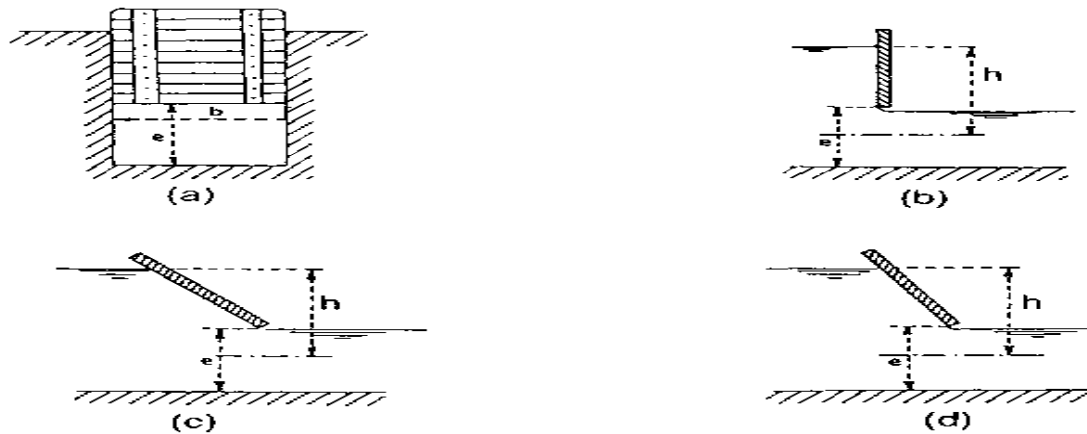


Figure II. 6: Déversoir en mince paroi inclinée d'un angle i par-rapport à la verticale. lame d'eau inférieure complètement aérée.

La relation (II.3) ne peut être appliquée que si $P/h \gg 1$.

Dans la pratique, le cas usuel d'un déversoir en mince paroi consiste en une plaque verticale dont la largeur est égale à celle amont et aval du canal dans le quel elle est insérée.

Plusieurs relations du coefficient du débit ont été proposées par le passé et dont les plus importantes sont regroupées dans le tableau (II.1).

<i>Auteur</i>	<i>Année</i>	<i>Coefficient de débit μ</i>	<i>Limite d'application</i>	<i>N=°</i>
Bazin	1888 1898	$\mu = 0.6075 \left(1 + \frac{0.074}{h} \right) \left[1 + 0.55 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$	$0,08m < h < 0,70m$ $B > 4h$ $0,2m < P < 2m$	(II.6)
Rehbock	1913 1929	$\mu = 0.6050 \left(1 + \frac{0.0019}{h} \right) \left(1 + 0.138 \frac{h}{p} \right)$	$h > 0,05m$	(II.7)
SIA	1924	$\mu = 0.615 \left(1 + \frac{0.001}{h} \right) \left[1 + 0.5 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$	$0,025m < h < 0,8m$ $P < 0,30m$ $h \leq p$	(II.8)
Kindsvater-Carter	1957	$\mu = 0.602 \left(1 + 0.125 \frac{h}{p} \right)$	$L \geq 0.15m ; h \geq 0.3m$ $h/p \leq 2$	(II.9)
Sarginson	1972 1973	$\mu = 0.613 \left(1 + \frac{2.33}{w} + 0.122 \frac{h}{p} \right)$		(II.10)

Tableau II. 1 : Coefficient de débit selon l'équation 1.1 selon quelques auteurs et leurs limites d'application.

Dans la relation (II.3) de **Sarginson**, le paramètre W représente le nombre de Weber tel que :

$W = \rho h^2 / \sigma$; où ρ est la masse volumique du liquide et σ est la tension superficielle exprimée en (Kg/m).

On peut également écrire que : $W = \rho g h^2 / \sigma$ On peut constater à partir du Tableau (II.1) que toute relations, à l'exception de la formule de Kindsvater-Carter, contiennent trois termes :

- Une constante dont la valeur moyenne est de l'ordre de 0,61
- Un terme qui tient compte de l'effet de la tension superficielle et proportionnel à $1/h$ où h est exprimé en mètre. Ce terme se trouve, à travers le nombre de Weber, dans la relation (II.10) de Sarginson.
- Un terme qui tient compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement à travers le rapport h/p . lorsque $h/p \ll 1$, la hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement est faible ($v^2/2g = 0$).

Le coefficient de débit μ de Kindsvater donné par la formule (II.9) se rapporte à la formule du débit suivante :

$$q = \mu \sqrt{g h e^3} \quad (\text{II.11})$$

$$h_e = h + 0.9$$

Où h_e représente la hauteur effective de la lame d'eau

La valeur 0,9 est une longueur déterminée expérimentalement pour tenir compte l'effet de la tension superficielle et de la viscosité.

La relation du débit unitaire la plus acceptée de nos jours est la deuxième version de (Rehbock, 1929) donnée par :

$$q = \mu \sqrt{2 g h e^3}$$

Avec :

$$\mu = 0.4023 + 0.0542 \frac{h_e}{p}$$

$$\text{et } h_e = h + 0.0011$$

Ce qui revient à écrire que :

$$q = 0.4023 \sqrt{2 g (h + 0.0011)^3} \left(1 + 0.135 \frac{h}{p} \right) \quad (\text{II.12})$$

Dans cette relation h s'exprime en mètre.

En principe cette relation est applicable pour toute la gamme de variation des paramètres notamment de la charge, mais il est préférable de prendre $h/P > 0,50$.

Cette formule est applicable au déversoir de type Rehbock dont la crête présente le profil de figure (II.6) ainsi que la nappe inférieure soit complètement aérée.

La précision obtenue sur la mesure de débit est de l'ordre de 0,10 à 0,20%.

Notons également la deuxième version de (Kindsvater-Carter, 1959) concernant le calcul du débit Q véhiculé par un canal.

En considérant le coefficient de débit donné par la formule (II.7) du tableau (II.1),

Kindsvater-Carter propose d'évaluer le débit Q par la relation :

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g\mu} (B - 0.001)(h + 0.001)^{3/2} \quad (\text{II.13})$$

Cette relation est applicable pour les considérations suivantes :

- Hauteur de pelle $P > 0,1\text{m}$
- Hauteur de la lame déversant $h_{\text{minimal}} > 0,08\text{m}$
- Hauteur relative $h/P < 0,25$

II-3-2-b- Déversoir rectangulaire à contraction latérale :

On dit qu'il y a contraction latérale lorsque la largeur B du canal est supérieure à la largeur b du déversoir, ce qui définit la valeur du taux de contraction $\beta = \frac{b}{B}$

Le cas le plus usuel du déversoir rectangulaire à crête mince avec contraction latérale est représenté par la figure (II.7)

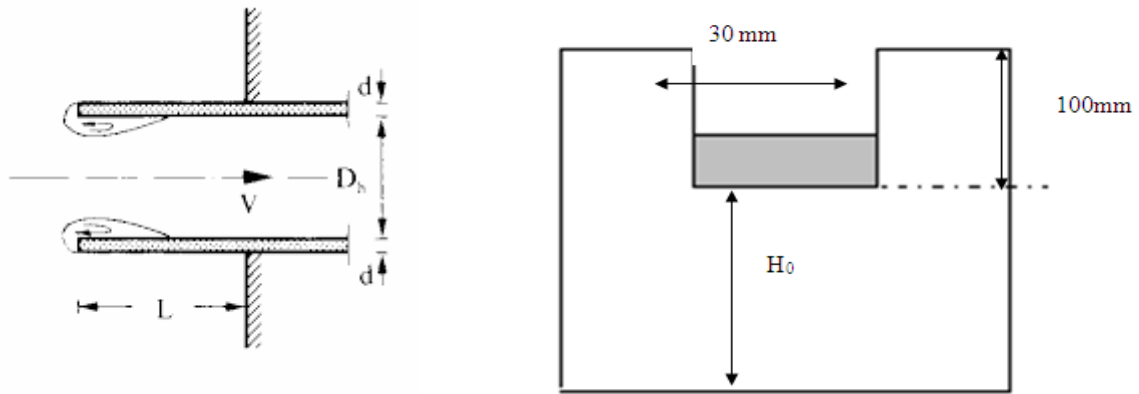


Figure II. 7: Déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction latérale.

Pour ce type de déversoir de très nombreux tests ont été effectués par (SIA, 1926). Ces tests ont montrés que le débit unitaire q pouvait être calculé en application de la relation (II.1).

- Pour un taux de contraction $0,30 < \beta < 1$,
- Une hauteur de pelle $P \geq 0,30\text{m}$;
- Une hauteur de la lame déversante $0,025B/b < h < 0,80\text{m}$, où $h \leq P$;

La relation du coefficient du débit μ s'écrit :

$$\mu = 0.578 \left[1 + 0.65\beta^2 + \frac{6.25 - 5.19\beta^2}{1000(h + 0.016)} \right] \left[1 + 0.5\beta^4 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right] \quad (\text{II.14})$$

Il est à noter que pour $\beta=1$ les relations (II.8) et (II.14) sont identiques.

Pour un déversoir vertical, à crête mince, et à nappe libre avec une contraction latérale (Hégly, 1921) proposa une formule pour le calcul du coefficient de débit μ qui s'écrit :

$$\mu = \left[0.405 + \frac{0.0027}{h} - 0.03(1 - \beta) \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{\beta h}{(h+p)} \right)^2 \right] \quad (\text{II.15})$$

Pour les limites d'application suivantes :

- La hauteur $0,10\text{m} < h < 0,60\text{m}$
- La largeur du déversoir $0,40\text{m} < b < 1,80\text{m}$
- La hauteur de pelle $0,40\text{m} < P < 0,80\text{m}$

$$- 0 < 1 - \beta < 0,90$$

D'autres formules ont été proposées par plusieurs chercheurs, mais ces formules convergentes dans leur ensemble vers la même valeur du débit unitaire calculé par application des relations que nous venant de citer.

Notons que toutes ces formules doivent être appliquées sous les conditions suivantes :

$$- B - b > 4h$$

$$- h/p \leq 0,50$$

$$- h/b \geq 0,50$$

$$- P \geq 0,30m$$

$$- \frac{0.025}{\beta} \geq h \geq 0,80m$$

$$- b \geq 0,30m$$

Si l'une de ces conditions n'est pas remplie la valeur calculée du débit peut être entachée d'une erreur significative.

II-3-2-c- Déversoir triangulaire à paroi mince :

II-3-2-c-1- Définition :

Le dispositif est représenté par une plaque verticale mince disposée en travers de l'écoulement dans un canal généralement de forme rectangulaire de largeur B, dont le profil de l'échancrure est un triangle d'angle d'ouverture θ .

Le déversoir est représenté schématiquement par la figure (II.8).

Déversoir triangulaire

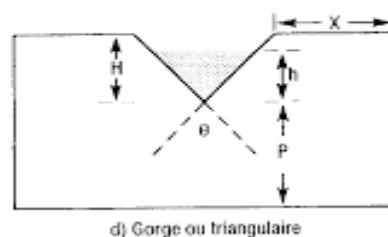


Figure II. 8: Déversoir triangulaire en mince paroi

-Schéma de définition-

Elle demeure la section la plus avantageuse pour la mesure des très faibles débits, de plus les valeurs calculées du débit seront données avec une précision raisonnable.

Thomson a donné la relation suivante pour le calcul du débit :

$$Q = \frac{8}{15} \mu h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh} \quad (\text{II.16})$$

Une autre approche, et, en admettant que le seuil est franchit par un écoulement en régime critique de charge totale H_c on aura $H_c = \frac{5}{4} h_c$ où h_c étant la profondeur critique de l'écoulement, et en tenant compte de la condition de criticité on aura :

$$h_c = \left(\frac{2Q^2}{gm^2} \right)^{\frac{1}{5}}, \text{ où } m \text{ est la tangente de l'angle } \frac{\theta}{2} \quad m = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}.$$

Donc la relation du débit s'écrit :

$$Q = \frac{16}{25} m \sqrt{\frac{2}{5} g H_c^5} \quad (\text{II.17})$$

En admettant en outre que la vitesse d'approche de l'écoulement est faible on peut écrire que $H_c = H = h$ d'où la relation (1.17) devient :

$$Q = \frac{16}{25} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{\frac{2}{5} g h^5} \quad (\text{II.18})$$

Ou bien :

$$Q = \frac{8}{15} \mu \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh^5} \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Donc : } \mu = \frac{6}{5\sqrt{5}} = 0,5366.$$

La contraction est dite pleine lorsque la hauteur relative $h/p \leq 0.40$; et que $p/B \leq 0.20$, dans ce cas le coefficient de débit μ ne dépend que de l'angle d'ouverture θ .

Le tableau (II.4) regroupe les valeurs de μ pour quelques valeurs de θ

θ	20	40	60	80	90	100
μ	0,597	0,582	0,577	0,577	0,578	0,580

Tableau II. 2: coefficient de débit μ de l'équation (II.17) en fonction de θ .

La figure ci-après représente la variation du coefficient de débit μ en fonction de l'angle d'ouverture de l'échancrure θ mentionné précédemment dans le tableau (II.4).

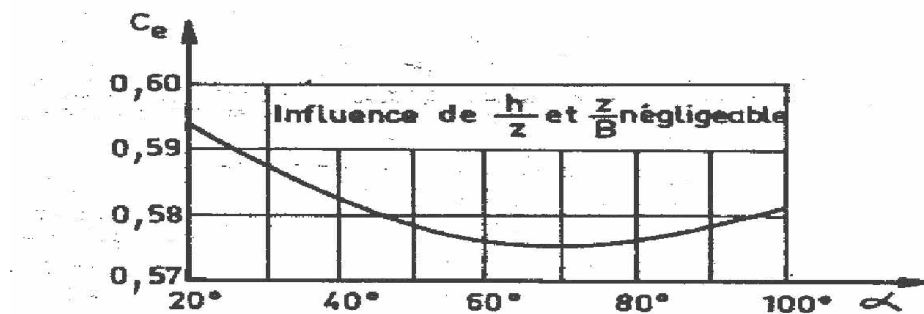


Fig. X.2.1.1.2.3 – Formule de Kindsvater

Figure II. 9: variation du coefficient de débit en fonction de l'angle de l'ouverture de l'échancrure d'un déversoir triangulaire à paroi mince pour une contraction pleine.

$$(h/z=h/p ; z/B= p/B).$$

D'après la figure on remarque que la courbe obtenue et en forme de cloche composée de deux branches une ascendante et l'autre descendante, et représente un minimum de θ et de μ , pour $\theta = 70^\circ$ $\mu = 0,577$.

Lorsque :

- La hauteur relative $\frac{h}{p} \leq 1,20$
- $\frac{B}{h} \leq 0,40$
- La hauteur de la lame d'eau $0,05 \leq h \leq 0,60m$
- La hauteur de pelle $P \geq 0,10m$
- La largeur du canal d'amenée $B \geq 0,60m$

La contraction est dite partielle. La vitesse d'approche ainsi que la largeur B du canal d'amenée, ont alors un effet très important sur le coefficient de débit. Pour illustrer cet effet

Kindsvater a effectué des essais sur un déversoir triangulaire a angle d'ouverture d'échancrure $\theta=90^\circ$.

La figure (II.9) représente pour un angle d'ouverture $\theta=90^\circ$ la variation du coefficient de débit en fonction de P/B et h/B .

Il est à noter que le canal d'amenée doit être de forme rectangulaire ou pouvant être assimilé comme tel.

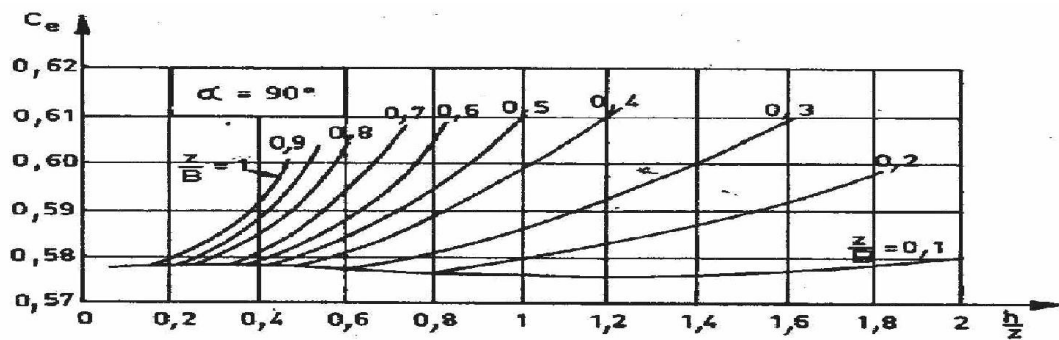


Fig. X.2.1.1.2.4 – Formule de Kindsvater

Figure II. 10: Valeurs du coefficient de débit pour $\theta=90^\circ$ en fonction d' h/P et P/B , selon Kindsvater

Kindsvater (1957) a introduit dans l'équation du débit une longueur qui tient compte de l'effet de la viscosité et de la tension superficielle, pour un liquide donné et dans une marge limitée de la température, alors l'équation (II.18) devient :

$$Q = \frac{8}{15} \mu \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2g(h + K_h)^{\frac{5}{2}}} \quad (\text{II.20})$$

K_h est fonction uniquement de l'angle d'ouverture de l'échancrure θ . Pour $\theta = 90^\circ$ et pour l'eau à température ordinaire on peut prendre $K_h = 0,85 \text{ mm}$.

La courbe de la figure (II.11) donne les valeurs de k_h en fonction de l'angle d'ouverture θ .

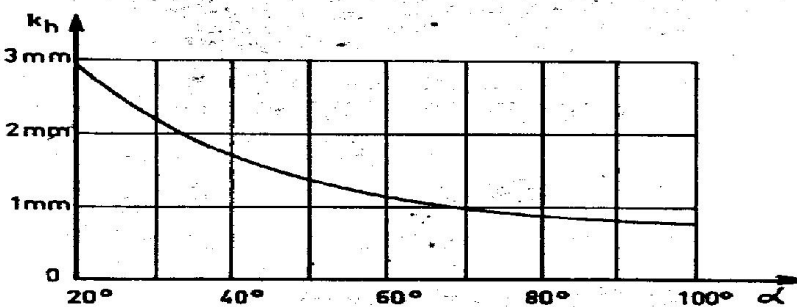


Fig. X.2.1.1.2.5 – Formule de Kindsvater

Figure II. 11: Valeurs de k_h en fonction de l'angle d'ouverture θ , selon

Kindsvater

D'autres formules ont été également proposées pour le calcul du débit ; on cite celle de (Cone, 1916) qui pour : $20^\circ < \theta < 90^\circ$ et $0,06\text{m} < h < 0,41\text{m}$, la relation du débit s'écrit comme suit :

$$Q = \left(0.3065 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} h^{\frac{5}{2}} \sqrt{2g} + 0.0031 h^{\frac{5}{2}} \sqrt{2g} \right) (3.28h)^{-\frac{0.0195}{0.7 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}} \quad (\text{II.21})$$

Il a aussi donné une forme simplifiée de la relation pour un angle d'ouverture de l'échancrure $\theta=90^\circ$, dans un déversoir triangulaire à crête verticale en mince paroi la relation (II.21) devient :

$$Q = 0.303 h^{-0.02} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh^5} \quad (\text{II.22})$$

Pour le calcul du coefficient de débit μ , (Héyndrickx, 1948) a proposé en une formule qui est donnée par :

$$\mu = (0.5775 + 0.214h^{-1.25}) \left(1 + \frac{h^2}{B^2(h+p)^2} \right) \quad (\text{II.23})$$

Le déversoir triangulaire à paroi mince a également fait l'objet d'investigation de la part de

(Lenz, 1943), qui s'est intéressé en particulier aux effets de la viscosité du liquide et de la tension superficielle sur le coefficient du débit μ .

De même (Ramponi, 1949) analyse les effets du canal d'amenée sur les caractéristiques de l'écoulement.

II-3-2-c-1- Caractéristiques propres à un déversoir à crête triangulaire :

Ce type de déversoir requiert quelques précautions d'installation. En effet, la largeur du canal d'amenée au déversoir influe sur la valeur des coefficients impliqués dans le calcul du débit transitant par le déversoir à crête triangulaire. La bissectrice de l'angle de l'échancrure du déversoir, verticale et perpendiculaire au fond, doit être équidistante des côtés du canal d'approche.

Deux types de configurations existent : le déversoir à crête triangulaire peut ainsi être « partiellement » ou « entièrement » contracté.

a) Déversoir à contraction complète :

Un déversoir est dit à « contraction complète » lorsque le lit et les bords du canal d'approche, en amont du déversoir, sont suffisamment éloignés des bords du déversoir pour obtenir un parallélisme longitudinal du profil des vitesses d'approche en amont du déversoir. Le déversoir est placé dans un canal dont l'amont est de forme non rectangulaire.

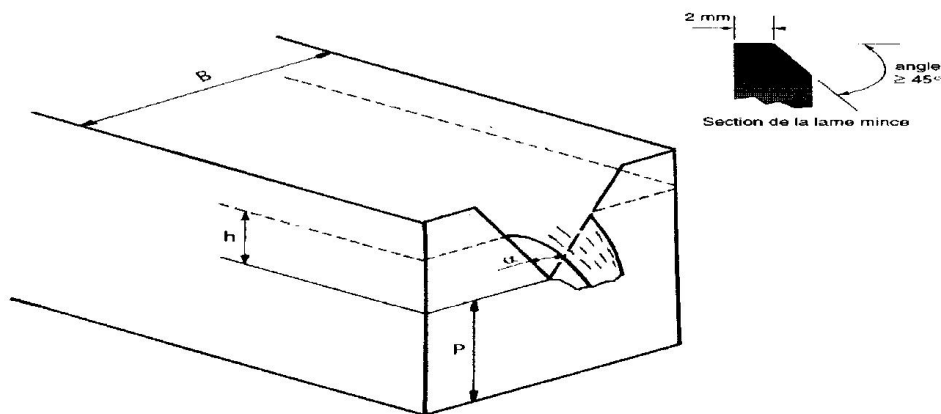


Figure II. 12: vue en perspective d'un déversoir triangulaire à contraction complète.

Les limites d'application des formules de débit pour cette configuration de déversoir peuvent être classées sous la forme du tableau suivant :

Déversoir à contraction complète
$25^{\circ} \leq \alpha \leq 100^{\circ}$
$h_1 / p \leq 0,4$
$h_1 / B \leq 0,2$
$0,05 \text{ m} < h_1 < 0,38 \text{ m}$
$p \geq 0,45 \text{ m}$
$B \geq 0,9 \text{ m}$

Tableau II. 3: limites d'application pour un déversoir triangulaire à contraction complèt.

b) Déversoir partiellement contracté :

Un déversoir est dit « partiellement contracté » lorsque le canal d'approche est trop proche pour que l'écoulement s'établisse avec des vitesses longitudinales parallèles aux bords du canal d'amenée et qu'il est placé dans un canal dont l'amont est de forme rectangulaire. Pour le déversoir partiellement contracté, il n'existe pas dans la littérature d'expression ni d'abaque du coefficient de débit autre que pour **l'angle = 90°**.

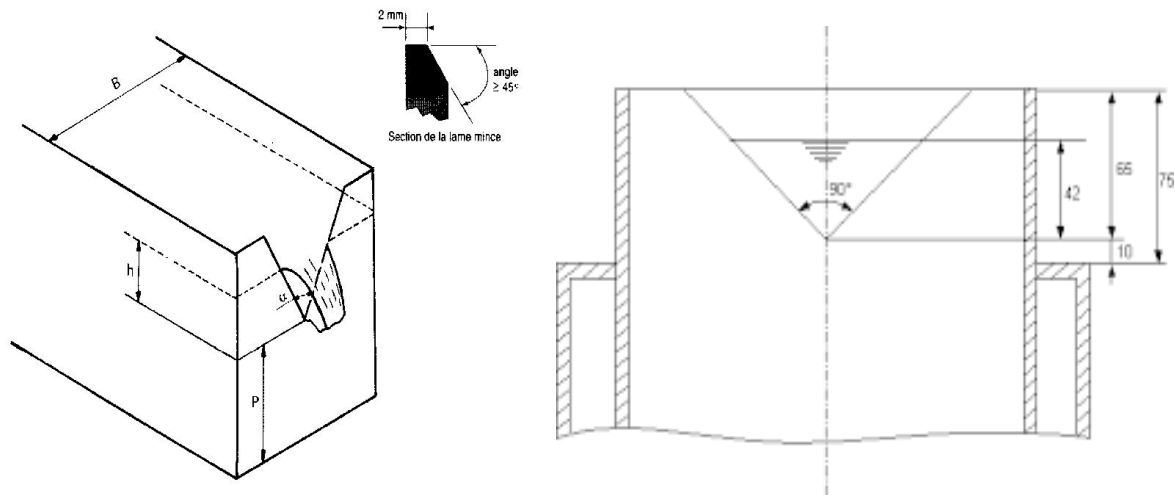


Figure II. 13: vue en perspective et schéma d'un déversoir triangulaire partiellement contracté.

Les limites d'application des formules de débit pour cette configuration de déversoir peuvent être classées sous la forme du tableau suivant :

Déversoir partiellement contracté
$\alpha=90^\circ$
$h_1 / p \leq 1,2$
$h_1 / B \leq 0,4$
$0,05 \text{ m} < h_1 < 0,6 \text{ m}$
$p \geq 0,1 \text{ m}$
$B \geq 0,6 \text{ m}$

Tableau II. 4: limites d'application pour un déversoir triangulaire partiellement contracté.

II.2.1.d. Déversoir trapézoïdal :

Dans ce type de déversoir la forme de l'échancrure est un trapèze isocèle envasé vers le haut, le débit s'écoulant au travers de cette section trapézoïdale peut être déterminé par une formule ne dépendant pas du coefficient de débit. Cependant, le type de déversoir le plus couramment utilisé (avec une forme trapézoïdale). La figure (II.7) montre schématiquement la forme du déversoir.

Déversoir trapézoïdal ou de Cipolletti

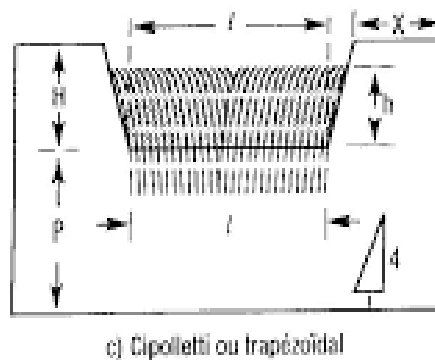


Figure II. 14: Déversoir trapézoïdal -Schéma de définition-

Le déversoir le plus fréquemment utilisé est celui de (Cipolletti, 1963), dont la crête est constituée par la plus petite base b et d'angle d'inclinaison θ tel que $\tan \theta = 1/4$, ce qui permet de compenser l'influence de contraction due aux joues par l'augmentation de la largeur de la surface libre de manière à conserver le plus possible un coefficient de débit μ constant pour une large gamme de la variation de la charge h .

La relation générale du débit pour un déversoir de type Cipolletti est donnée par :

$$q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2gh^3} \quad (\text{II.24})$$

Où q est le débit unitaire.

Lorsque :

- $0,06\text{m} < h < 0,60\text{m}$

- $h/P < 0,50$

- $P > 2h$ avec une valeur minimale de 0,30m

La valeur du coefficient de débit $\mu \approx 0,422$ d'où la forme simplifiée de la relation de Cipolletti qui s'écrit :

$$q = 1,86 b h^{3/2} \quad (\text{II.25})$$

Pour une valeur quelconque de l'angle d'inclinaison des joues du déversoir sur la verticale (Gourley et Crimp) ont donné la formule suivante pour le calcul du débit :

$$Q = 1,32 h^{2.47} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1,69 b^{1.02} h^{1.47} \quad (\text{II.26})$$

b : est la petite base du trapèze.

h : la hauteur d'écoulement

II-3- Chute brusque : [4]

1) soit un canal a faible pente $J_f < J_c$, ou horizontal, $J_f = 0$, débitant librement, en chute brusque, dans l'atmosphère. La forme de la surface libre a des branches M2 ou H2 respectivement.

L'énergie spécifique H_{sc} , et minimale au droit de la chute brusque ; là s'établit la hauteur critique h_c , représentant le tirant d'eau le plus faible possible pour un débit donné. L'existence de la section critique donne au débit sa valeur maximale pour une énergie spécifique donnée.

Pour que l'énergie spécifique H_s , diminue, il faut que la profondeur d'eau, h baisse.

1) Pour un canal de section rectangulaire, la profondeur critique est donnée par :

$$h_c = \frac{2}{3} H_{sc} \quad (\text{II.27})$$

et la vitesse moyenne correspondante par :

$$U_c^2 = g h_c \quad (\text{II.28})$$

Avec la définition du débit unitaire, $q = Uh$, on écrit :

$$q = h_c \sqrt{gh_c} = \sqrt{g \left(\frac{2}{3} H_{sc}\right)^3} \quad (\text{II.29})$$

D'où l'on obtient :

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (\text{II.30})$$

Les canaux de section rectangulaire sont traités dans la littérature (voir Ragaragu, 1981, chap.8).

- 1) Il faut cependant signaler que la profondeur critique, h_c , définie par l'éq. (II.23) n'est qu'approximative. Cette relation vaut seulement pour un écoulement à courant parallèle, ce qui n'est pas le cas au voisinage d'une chute brusque. En courbe (convexe), l'expérience (voir Rouse, 1938, p. 325 et Bauer et Graf, 1971) montre que la profondeur critique, h_c , apparaît en amont d'une chute brusque et que la profondeur au droit d'une telle chute est d'environ :

$$h_b = 0.72 h_c = 0.72 \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (\text{II.31})$$

Pour les canaux de section non rectangulaire à pente J_f , faible, le coefficient numérique dans l'équation (4.34) peut être pris à 0.72 près (voir Rajaratnam et al.1964).

II-4- Développement théorique :

Notons que l'objectif principal recherché par cette étude est de définir la localisation de la section de contrôle du déversoir étudié.

Ainsi nous présentons les différentes équations qui régissent l'écoulement et qui y transigent.

Nous établirons les expressions théoriques du débit ainsi que de la hauteur critique.

L'approche théorique tiendra compte également des différents paramètres susceptibles d'influencer le coefficient de débit et les paramètres géométriques, et l'effet de la vitesse d'approche.

II-4-1- Description de l'écoulement :

L'écoulement est de nature fluviale à l'amont, et la ligne d'eau est quasi horizontale, à l'approche immédiate de la contraction la ligne d'eau subit un léger abaissement, puis elle

diminue progressivement à l'intérieur même du dispositif jusqu'à atteindre une hauteur minimum inférieure à la hauteur critique. Cette hauteur minimale disparaît au fur et à mesure que le débit augmente.

Le régime qui règne à l'aval est de nature torrentielle. Entre les régimes fluviale à l'amont et torrentiel à l'aval la transition s'effectue par le passage à la section critique de hauteur h_c situé à une distance x à l'intérieur du dispositif ; Sur ces deux termes précédents se base notre expérience. Comme pour le cas du dispositif en mince paroi la ligne longitudinale du canal n'est pas affectée par l'écoulement. Le tracé du profil en long de l'écoulement montre la nature des régimes qui règnent d'amont en aval.

II-4-2- Hauteur relative de déversement :

Nous définissons la hauteur relative de déversement h_d^* comme étant le rapport entre la hauteur de déversement h_d et la profondeur critique h_c dans la section de contrôle à l'intérieur de la section rectangulaire du dispositif, soit $h_d^* = h_d/h_c$. Il est à noter que la hauteur relative h_d^* est supérieure à l'unité, puisque la hauteur de déversement h_d est supérieure à la profondeur critique h_c . Il est universellement connu que :

- la profondeur critique h_c d'un écoulement dans une section rectangulaire est telle que :

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} \quad (\text{II.32})$$

- la profondeur critique h_c d'un écoulement dans une section triangulaire est telle que :

$$h_c = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gm^2}} \quad (\text{II.33})$$

$$m = \tan \Theta/2.$$

- la profondeur critique h_c d'un écoulement dans une section trapézoïdale:

Pour la section trapézoïdale, il n'existe pas d'une solution strictement analytique de l'équation

$\frac{Q^2}{g} = \left(\frac{A^3}{T}\right)$, on peut utiliser une solution approximative proposée par *Agroskine*.

Tout d'abord on trouve les valeurs auxiliaires :

$$h_c = k \left(1 - \frac{n}{3} + 0,105(n)^2 \right) \quad (\text{II.34})$$

$$n = \frac{mk}{b} \quad ; \quad k = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} .$$

II-5- Le contrôle hydraulique : [10]

II-5-1 Définition du contrôle hydraulique :

On définit la section de contrôle comme étant le lieu où, pour toutes les conditions d'écoulement, le débit Q représente une fonction unique de la géométrie $A(h)$, de cette section. La condition d'écoulement uniforme ne peut être réalisée dans cette section car elle dépend de plus de la pente du radier J_s et de la rugosité K du canal.

Le point de contrôle $x = x_c$ correspond à l'endroit où la section de contrôle s'établit. Dans ce point, la fonction $Q(h)$ est unique de même que la fonction $H^*(h)$ ou H^* est la charge par rapport au radier, donc $H_* = H - z$.

Pour que $H^*(h)$ soit unique, cette fonction doit atteindre forcément un extremum, ce qui exige $dH^*/dh = 0$.

Pour simplifier les calculs, considérons un canal prismatique à section rectangulaire, dont le débit par unité de largeur est $q = Q/b$. la charge

$$H_* = h + \frac{q^2}{2gh^2} \quad (\text{II.34})$$

Ne dépend que la hauteur d'eau h . s'il s'agit d'une section de contrôle, il existe une valeur unique $h = h_c$ qui définit une valeur extrême de la charge $H^* = H_c^*$. cette dernière est obtenue par

$$dH^*/dh = 1 - \frac{q^2}{gh^3} = 1 - F^2 = 0. \quad (\text{II.35})$$

Par conséquent il existe une seule valeur extrême de la fonction $H^*(h)$, qui est s'établit pour l'écoulement critique, $F = 1$. Soit $H^* = H_c^*$ et $h = h_c$ les valeurs correspondantes dénommées

charge critique et hauteur critique (chap. 4). Pour déterminer si $F = 1$ correspond à un maximum ou à un minimum de la fonction $H^*(h)$, la dérivée seconde doit être analysée

$$d^2H^*/d^2h = \frac{3q^2}{gh^4} = \frac{3F^2}{h} \quad (\text{II.36})$$

Cette expression reste toujours positive, ce qui signifie que $H^*(h)$ atteint un minimum pour $F = 1$. Selon l'équation (5.12), il est égale à

$$H_{*c} = h_c [1 + q^2/(2ghc^3)] = h_c[1 + F^2/2] = (3/2) h_c \quad (\text{II.36})$$

La relation entre le débit critique q_c et la hauteur critique h_c est obtenu également à l'aide de l'équation (I.14) est s'écrit :

$$q_c = (g h_c^3)^{1/3} = g^{1/2}[(2/3) H_{*c}]^{3/2} \quad (\text{chap.4}) \quad (\text{II.37})$$

Après avoir trouver que l'écoulement est critique dans la section de contrôle, il faut encore déterminer la position du point critique $x = x_c$. On considère un écoulement potentiel avec une charge constante

$$H = z + h + \frac{q^2}{2gh^2} \quad (\text{II.38})$$

Pour un radier $z(x)$ continu, les deux premières dérivées de la charge par rapport à la coordonnée longitudinale x devient

$$H' = z' + h' + \left(1 - \frac{q^2}{gh^3}\right) = 0 \quad (\text{II.39})$$

$$H'' = z'' + h'' + \left(1 - \frac{q^2}{gh^3}\right) + \frac{3q^2 h'^2}{gh^4} = 0 \quad (\text{II.40})$$

Sachant que la section de contrôle exige $F = 1$, l'équation (I.20) indique que $z' = 0$. Il existe donc un extremum du radier au point de contrôle. Pour analyser si cet extremum correspond à un minium ou un maximum de la fonction du fond, l'équation (I.21) donne, au point de contrôle

$$H''(F = 1) = z''_c + \frac{3hc'^2}{hc} = 0 \quad (\text{II.41})$$

Cette équation fournit une relation entre la courbe du radier au point critique et la pente de la surface d'eau h' correspondante

$$h'_c = \pm (-h_c z''_c / 3)^{1/2}. \quad (\text{II.42})$$

Une solution réelle de cette équation n'existe que pour $z'' < 0$, correspondant à un maximum du profil du fond (figure suivante). De plus, il est facile de démontrer que $h'_c < 0$ caractérise la transition de l'écoulement fluvial ($F < 1$) à l'écoulement torrentiel ($F > 1$). Le cas $h'_c > 0$ correspond à la transition de l'écoulement.

Torrentiel à l'écoulement fluvial (ressaut hydraulique), ce dernier n'est cependant plus un écoulement potentiel.

Les calculs ci-dessus fournissent les informations suivantes :

Equation (II.39) : la condition critique $F = 1$ donne $h_c = (q^2/g)^{1/3}$;

Equation (II.38) : la charge critique est $H_{*c} = 3h_c/2$, donc $q_c = (8gH_{*c}^3/27)^{1/2}$,

Equation (II.42) : la pente critique de la surface libre devient $h'_c = -(-h_c z''_c/3)^{1/2}$,

Equation (II.39) : le lieu critique est $z'(x = x_c) = 0$ et l'équation exige la condition $z''_c < 0$.

Pour discuter le cas général pour lequel la géométrie du radier est $z = z(x)$, la géométrie de la section $A = A(x, h)$ et le débit varient avec x , on considère l'équation de Bernoulli

$$H = z + h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (\text{V.15})$$

Avec le gradient J_l du à des pertes locales (élargissement ou rétrécissement de la section, réduction ou augmentation locale du débit), la pente de la ligne de charge $H' = dH/dx$ est égale à :

$$H' = -(J_f + J_l) \quad (\text{V.16})$$

Le point de contrôle s'établit à l'endroit où le nombre de **Froude** est égal à l'unité. La dérivée première de l'équation (V.15), combinée avec l'équation (V.16), donne avec $J_s = -z'$

$$h' \left[1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial h} \right] + \left[\frac{QQ'}{gA^2} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} - J_s + J_f + J_l \right] = 0. \quad (\text{V.17})$$

Pour que $F^2 = Q^2 (\partial A / \partial h) / (gA^3) = 1$ selon l'équation (5.3), les termes entre crochets doivent simultanément s'annuler.

La discussion générale de toutes les possibilités d'écoulement étant trop longue et difficile (Hager 1985b, Henderson 1966), les considérations suivantes se limiteront à un tronçon de canal restreint ou s'établit un écoulement local pour lequel la somme $J_s - J_f - J_l = 0$.

Pour un canal prismatique ($\partial A / \partial x = 0$) le point de contrôle se trouve alors à l'endroit ou le changement du débit (chap.9 et 10).

Pour un *canal non prismatique* à débit constant, le point de contrôle est défini par $\partial A / \partial x = 0$, donc pour la section de surface extrême dans le sens longitudinal. Pour le canal rectangulaire le point de contrôle se situe donc à l'endroit ou la largeur B atteint une valeur extrême. Un calcul analogue à celui effectué ci-dessus pour l'écoulement d'un canal à radier courbe entraîne que le point de contrôle se trouve à l'endroit ou la largeur du canal est *minimale* (Hager 1985b). Les ouvrages dont la cote du radier présente un maximum local $z' = 0$, $z'' < 0$ sont connus sous le nom de *déversoir*. les ouvrages pour lesquels la largeur n surface est caractérisée par $B' = 0$, $B'' > 0$ sont connus sous le nom de *canaux de type Venturi*. Grâce à la relation unique qui existe entre la charge critique et le débit, ces deux installations sont souvent utilisées comme *structures de mesure de débit*. Des indications à ce sujet sont présentées par Bos (1976) et Hager (1986).

Considérons encore une fois le déversoir à crête arrondie. Pour un écoulement potentiel, la ligne de charge $H(x)$ reste horizontale. La condition critique est satisfaite à la crête du déversoir ou $z' = 0$ et $z'' < 0$. Écoulement critique veut dire que la charge spécifique $H^* = H - z$ devient minimale par rapport à la hauteur d'eau h . cette figure dans laquelle $H^*(x)$ est aussi représenté, permet de constater que le minimum se trouve exactement au lieu critique. Cette section correspond donc bien à une *section de contrôle*.

Comme cela a déjà été constaté dans la figure (5.4), la hauteur d'eau change considérablement autour du point critique $x = x_c$. L'effet de la pente de frottement peut donc être considéré comme négligeable et l'hypothèse d'un écoulement potentiel, admise ci-dessus, est pratiquement satisfaite. Par conséquent, une section de contrôle dans un canal prismatique se trouve à l'endroit d'un *changement de pente du radier* où l'écoulement fluvial devient torrentiel. Elle constitue donc le point de départ pour le calcul des courbes de remous à l'amont et à l'aval.

Conclusion :

Au cours de ce second chapitre nous avons donné dans un premier temps les différentes caractéristiques géométriques des déversoirs, nous avons indiqué qu'ils présentent globalement les mêmes caractéristiques géométriques, mais à l'encontre de la première catégorie la seconde à un seuil plus large ç à dire qu'il s'étend sur une longueur L à l'intérieur du canal d'amenée, Puis dans un second temps, nous sommes intéressés à l'établissement des relations théoriques exprimant la loi hauteur critique et l'expression de la section de contrôle en exprimant les relations régissant l'écoulement et influencent le coefficient de débit pour chacun des dispositifs étudiés.

Pour le dispositif en mince paroi étudiés la relation exprimant le débit unitaire et donnée par la relation (II.3), nous avons pu constater que la relation exprimée comporte deux termes du coefficient de débit m_1 et m_2 . Nous avons aussi développé les formules qui concernent le contrôle hydraulique qui est l'objectif de notre étude.

