

CHAPITRE I

DEFINITIONS ET CARACTERISTIQUES

Dans un écoulement à surface libre, le liquide s'écoule au contact de l'atmosphère. La **surface libre** est la surface de séparation entre l'eau et l'atmosphère. En tout point de cette surface, la pression égale la pression atmosphérique.

Dans la nature, l'exemple typique d'un écoulement surface libre est celui des rivières. En milieu urbain, l'écoulement dans une conduite d'égout pluvial et sanitaire doit normalement être surface libre.

Une différence importante entre l'écoulement en charge et un écoulement à surface libre provient de la géométrie de l'écoulement. Pour une conduite sous pression, l'écoulement occupe toute la section de la conduite qui est la plupart du temps circulaire. La section d'écoulement « A », qui ne dépend généralement que du diamètre D, se calcule alors par une relation simple ($A = \pi D^2/4$). Pour un écoulement à surface libre, la géométrie de la section peut par contre être très diversifiée (circulaire, rectangulaire, trapézioidale, ovale, triangulaire ou de forme quelconque). Dans ces cas, l'écoulement est décrit par de nouvelles propriétés géométriques dont le calcul de la forme de la section et du degré de remplissage de la conduite.

L'écoulement à surface libre présente de nombreuses applications. Pour évaluer une conduite d'égout existante, l'ingénieur doit vérifier si l'écoulement se fait encore à surface libre malgré une augmentation éventuelle du débit à la suite de l'urbanisation ou de la rugosité de la conduite due au vieillissement. Pour une conduite projetée, l'ingénieur doit trouver la dimension optimale qui permet la circulation de l'eau à surface libre tout en gardant le projet économiquement rentable. Dans le cas des canaux et des rivières, l'ingénieur peut être intéressé aussi bien à connaître la vitesse d'écoulement pour protéger les berges contre l'érosion et contre le transport des sédiments qu'à déterminer le rehaussement du niveau d'eau produit en amont d'un barrage existant ou en projet de construction.

1. DÉFINITIONS

De nombreux termes sont utilisés pour désigner les structures dans lesquelles l'eau s'écoule.

Voici les principaux termes et les définitions que le dictionnaire Larousse en donne :

Cours d'eau : tout chenal dans lequel s'écoule un flux d'eau continu ou temporaire. Il est un terme général pour désigner un fleuve, une rivière, un ruisseau, un torrent, un oued.

Canal : un chenal artificiel creusé par l'homme et utilisé soit pour la navigation ou le flottage, soit pour l'irrigation ou l'assèchement de certaines régions. Les canaux suivent en général de longues lignes droites.

Il existe un grand nombre de mots pour désigner les différents types de cours d'eau.

Ruisseau : petit cours d'eau, de faible largeur et de longueur limitée, alimentée par des sources d'eau naturelles, souvent affluent d'un étang, d'un lac ou d'une rivière. Les ruisseaux se trouvent à la tête des bassins versants.

Rivière : cours d'eau moyennement important, à écoulement continu ou intermittent, suivant un tracé défini et se jetant dans un autre cours d'eau, un lac, une mer. Abondant, et particulièrement celui qui se jette dans un fleuve.

Fleuve : cours d'eau important, long et au débit élevé, comptant de nombreux affluents et se jetant dans la mer.

Oued : terme d'origine arabe désignant un cours d'eau temporaire dans les régions arides ou semi--arides. Son écoulement dépend des précipitations et il peut rester à sec pendant de très longues périodes.

Torrent : cours d'eau au débit rapide et régulier, situé sur une pente plus ou moins prononcée. Les torrents se retrouvent sur des terrains accidentés ou en montagne. Ce terme est utilisé principalement pour désigner les cours d'eau de montagne avec un lit rocheux et encaissé.

Fossé : fosse creusé en long dans le sol servant à l'écoulement des eaux, à la séparation des terrains (ex. fossé de voie publique ou privée, fossé mitoyen, fossé de drainage).

Émissaire : canal d'évacuation des eaux de drainage.

2. CLASSIFICATION DES ECOULEMENTS

Les écoulements à surface libre, comme les écoulements en charge, peuvent être permanents ou non permanents. Dans un écoulement permanent, toutes les propriétés de l'écoulement, en particulier le débit, sont constantes dans le temps. En fait, un tel écoulement n'existe pas en

pratique. Cependant, l'hypothèse de la permanence de l'écoulement est souvent retenue dans les conditions suivantes :

- 1- Par souci de simplification, l'ingénieur se place volontairement dans ce contexte idéal dans l'étape de conception ou réhabilitation ;
- 2- Dans certains cas, les propriétés de l'écoulement varient lentement de telle sorte que l'hypothèse de permanence est acceptable.

L'écoulement à surface libre supposé permanent, peut être uniforme, variant graduellement ou variant brusquement.

Dans un écoulement uniforme, la profondeur et la vitesse d'écoulement restent constantes sur une longue distance le long de l'écoulement. Il faut alors que toutes les propriétés géométriques et hydrauliques pertinentes restent constantes le long de l'écoulement (pente, rugosité, largeur...). Il s'agit, là encore, d'un écoulement idéal qui, en toute rigueur, n'existe pas en pratique. L'hypothèse de l'écoulement uniforme est cependant souvent retenue soit par approximation soit dans un contexte de design.

Dans un écoulement variant graduellement, la profondeur et la vitesse d'écoulement varient graduellement le long de l'écoulement. Le cas typique est l'exhaussement du niveau d'eau en amont d'une retenue. L'ingénieur est alors intéressé à connaître l'effet d'un niveau d'exploitation donné de la retenue sur l'inondation des terres en amont.

Dans l'écoulement variant brusquement, la vitesse et le niveau varient d'une manière sensible et brusque sur une courte distance. L'exemple typique est celui du ressaut hydraulique qui se produit au passage d'un écoulement rapide à un écoulement lent dans le canal de fuite d'une centrale hydroélectrique.

Finalement, un écoulement uniforme ou variant graduellement peut encore être caractérisé selon son régime : il peut être fluvial, critique ou torrentiel.

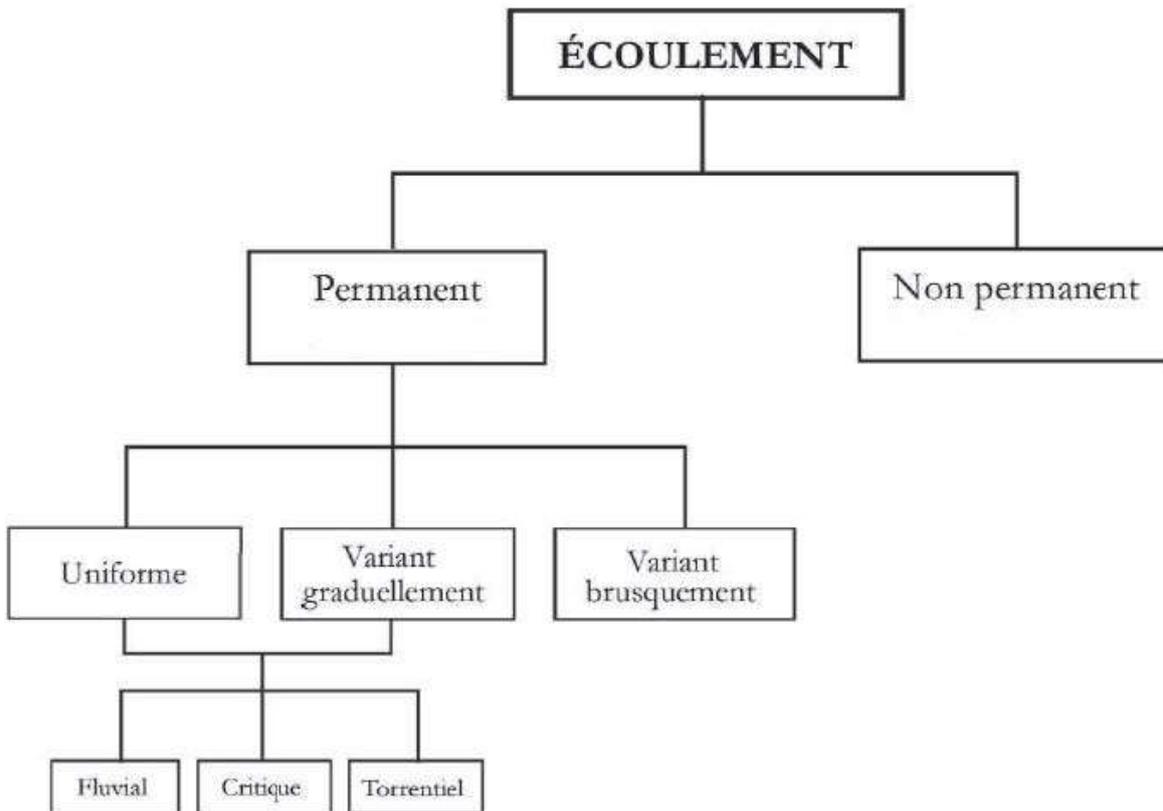


Figure 1.1 Classification des écoulements

3. COURS D'EAU - VUE TRANSVERSALE

Lit du cours d'eau

Le niveau d'eau et l'espace occupé par le cours d'eau varie en fonction de son débit. Un cours d'eau analysée selon sa coupe transversale (figure 1.2) présente une section principale occupée par les écoulements normaux (appelé lit mineur) et une plaine d'inondation occupée lorsque le cours d'eau est en crue.

Les principaux termes sont :

Lit : désigne tout l'espace occupé, en permanence ou temporairement, par un cours d'eau.

Lit mineur : lit du cours d'eau en écoulement normal.

Lit majeur : lit qu'occupe le cours d'eau lors des crues, incluant les zones inondées.

Lit d'étiage ou chenal d'étiage : partie du cours d'eau occupé lors des étiages.

Plaine d'inondation : zone de terrain inondée lors du chenal du cours d'eau lorsque le cours d'eau est en crue.

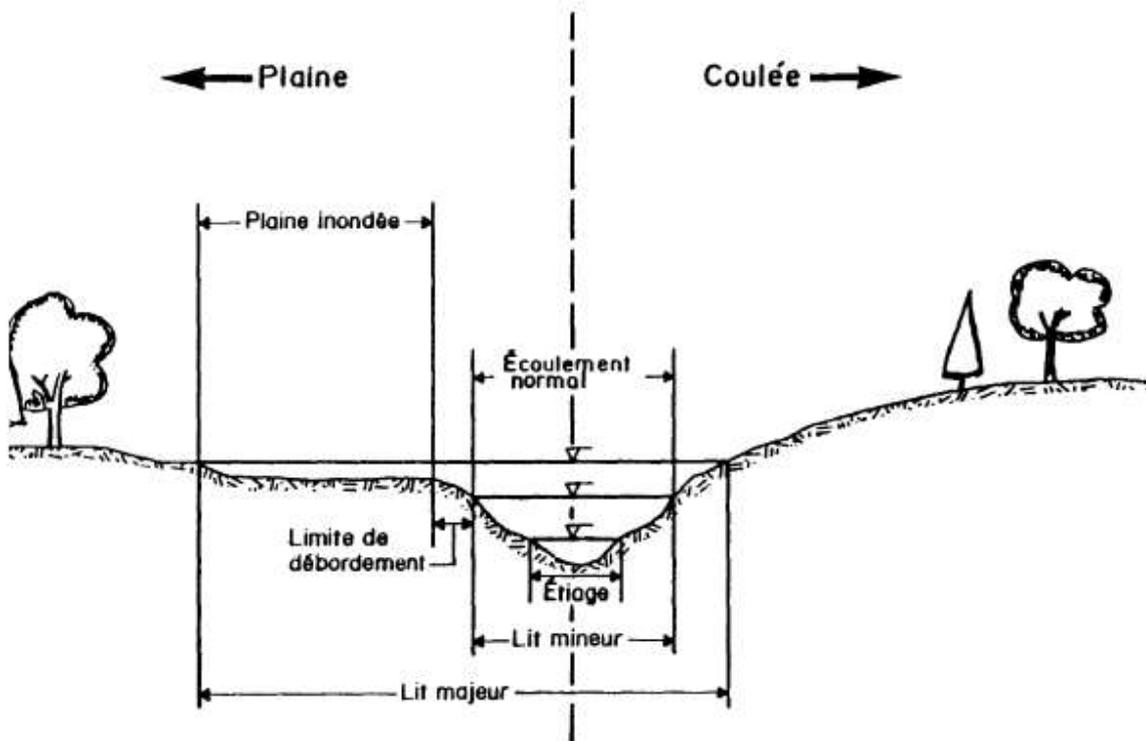


Figure 1.2 Coupe transversale d'un cours d'eau.

4. CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

Avant de présenter les lois de l'hydraulique, la connaissance des caractéristiques géométriques se rapportant aux canaux et aux cours d'eau s'impose. Voici les principales caractéristiques utiles (Figure 1.3) :

Section « A » : Section normale à la direction de l'écoulement et au travers de laquelle l'eau s'écoule.

Périmètre mouillé « P » : Longueur de la ligne de contact entre le canal et l'eau dans un plan normal à la direction de l'écoulement.

Rayon hydraulique « Rh » : Rapport entre la section d'écoulement "A" et le périmètre mouillé "P".

$$Rh = \frac{A}{P} \quad [1.1]$$

Profondeur d'écoulement ou hauteur d'eau « y » : Épaisseur d'eau dans le cours d'eau au-dessus du fond.

Pente des talus « z:l » : La pente d'un talus est le déplacement horizontal pour une élévation unitaire du talus. Chaque talus peut avoir sa pente propre.

Largeur au fond ou largeur au plafond « b » : Largeur du cours d'eau au bas de la section.

Largeur de surface ou largeur au miroir « t » : Largeur de la surface libre de l'eau dans le canal.

Largeur du canal ou largeur d'ouverture « T » : Largeur du canal d'une rive à l'autre.

Revanche « yr » : Hauteur libre considérée au-dessus du plan d'eau lors du design ou différence entre la profondeur du cours d'eau "d" et la profondeur d'écoulement.

Profondeur hydraulique « D » : Rapport entre la section d'écoulement et la largeur de la surface libre de l'eau.

$$D = \frac{A}{t} \quad [1.2]$$

Pente d'un canal « S₀ » : On définit la pente d'un canal comme étant la tangente de l'angle d'inclinaison du lit par rapport à l'horizontale. Comme cet angle est généralement très petit, la pente est, en pratique, numériquement égale à l'angle donnée en radians.

Canal prismatique : est un canal dont la pente et la géométrie de la section restant constantes dans la direction longitudinale du canal. Lorsqu'une de ces conditions n'est pas respectée, le canal est dit non prismatique.

Le tableau 1.1 présente les caractéristiques géométriques des canaux prismatiques les plus fréquents en pratique.

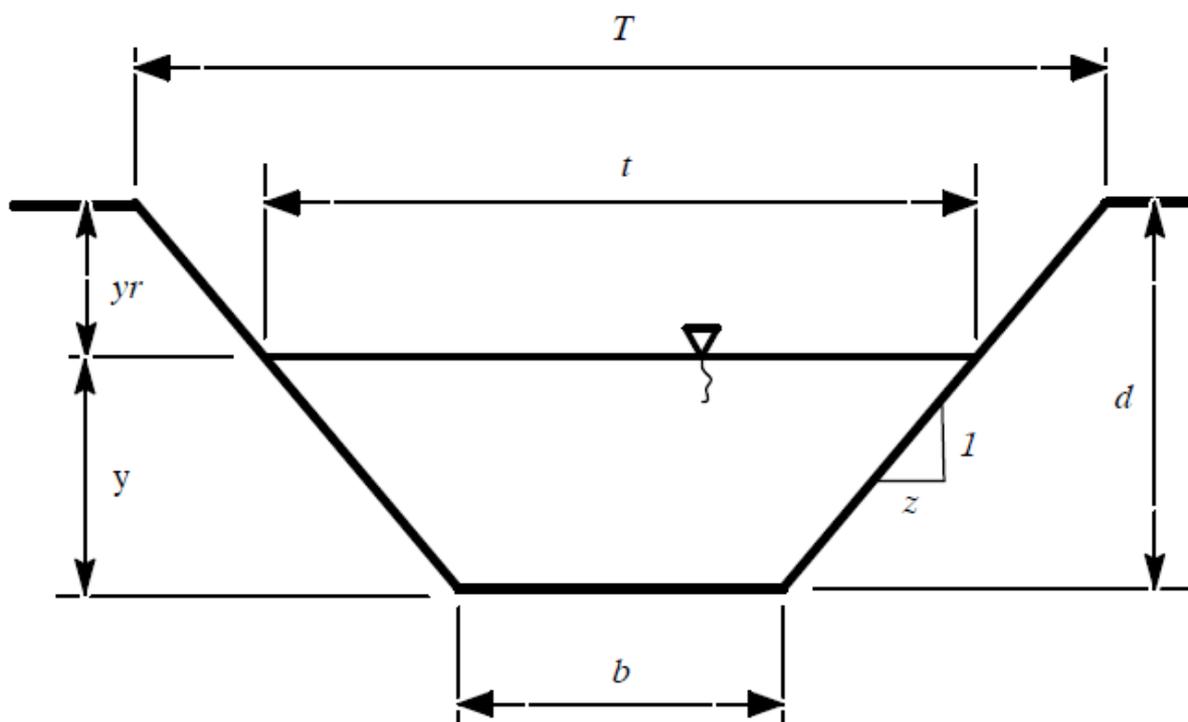
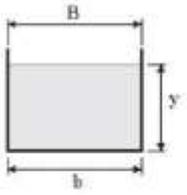
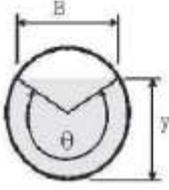
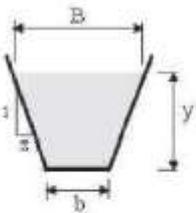
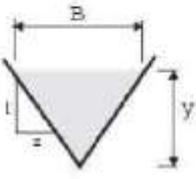


Figure 1.3 Canal trapézoïdal et définition des termes.

Tableau 1.1 Propriétés géométriques des sections courantes

Forme de la section	Section mouillée A	Périmètre mouillé P	Rayon Hydraulique R_{Hf}	Largeur B
<p>rectangulaire</p> 	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
<p>circulaire</p> 	$\frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta)$	$\frac{\theta D}{2}$	$\frac{D}{4} \left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta} \right)$	$D \sin \frac{\theta}{2}$
<p>trapezoidale</p> 	$(b+zy)y$	$b + 2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
<p>triangulaire</p> 	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$

5. VITESSE ET PRESSIONS DANS UNE SECTION D'ÉCOULEMENT

1.1 Répartition des vitesses

D'une manière générale, la vitesse d'écoulement est maximale au point le plus éloigné des parois où la condition d'adhérence dicte une vitesse nulle. Ainsi pour un écoulement dans une conduite circulaire pleine, la vitesse est maximale au centre de la conduite. Dans un écoulement à surface libre, la présence d'une surface en contact avec l'air modifie cette situation. L'air produit une résistance forte différente de celle des parois solides sur l'écoulement. Pour un écoulement à surface libre, le point où la vitesse est maximale se trouve généralement en-dessous de la surface libre.

Les courbes qui représentent les points d'égale vitesse dans la section transversale sont appelées isotaches. La figure 2.1 montre les courbes isotaches pour les sections courantes.

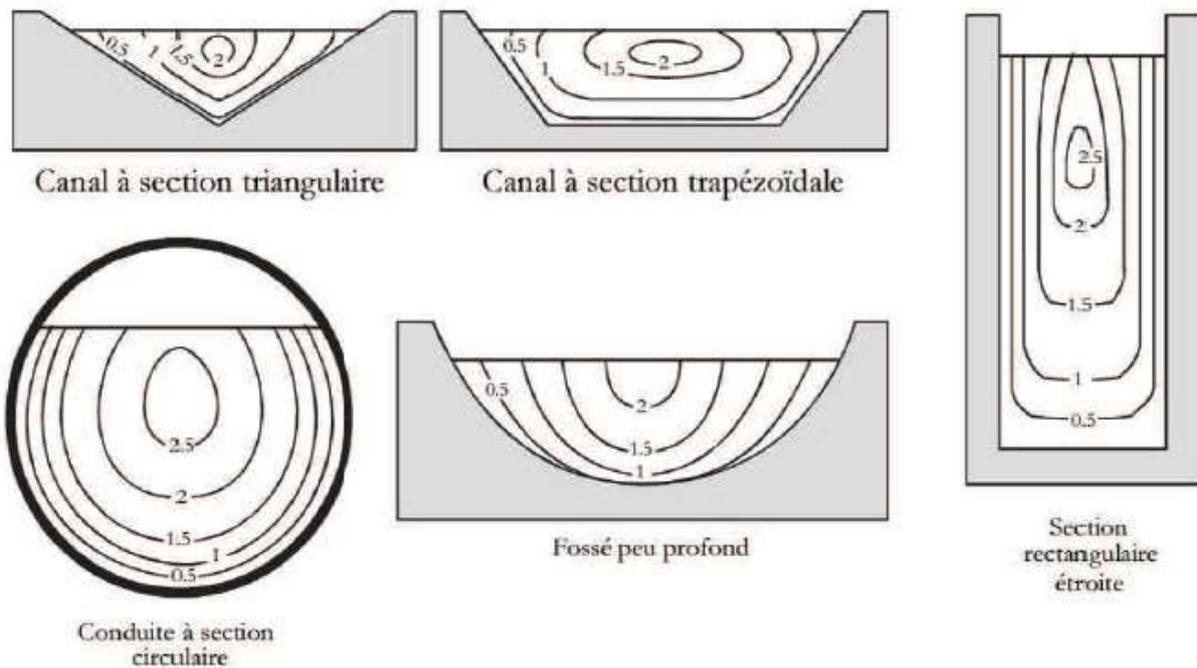


Figure 1.4 Répartition de la vitesse dans une section

En tout état de cause, on ignore volontairement en pratique cette variation de vitesse dans la section transversale pour travailler avec la vitesse moyenne :

$$V_{\text{moy}} = \frac{\int_A v dA}{A} = \frac{Q}{A}$$

Où Q est le débit d'écoulement,

A est la section mouillée

Quand le débit est déterminé par mesure de la vitesse à différentes profondeurs, son calcul se fait l'aide de la formule suivante :

$$Q = \int v dA = \sum_{i=1}^n V_i \cdot A_i$$

6. REPARTION DES PRESSIONS

En hydrostatique, la pression à une profondeur h se calcule par la relation :

$$P_{\text{absolue}} = \rho gh + P_{\text{atm}}$$

Pour un écoulement en charge, la loi de l'hydrostatique s'applique encore dans la direction perpendiculaire l'écoulement tant qu'il n'y a pas de changement de direction :

$$P_2 = P_1 + \rho gh$$

Considérons un écoulement dans un canal de profondeur y dont le fond est incliné à un angle θ par rapport à l'horizontale. Ecrivons le bilan des forces s'exerçant sur un élément prismatique de surface de base dA et de hauteur y .

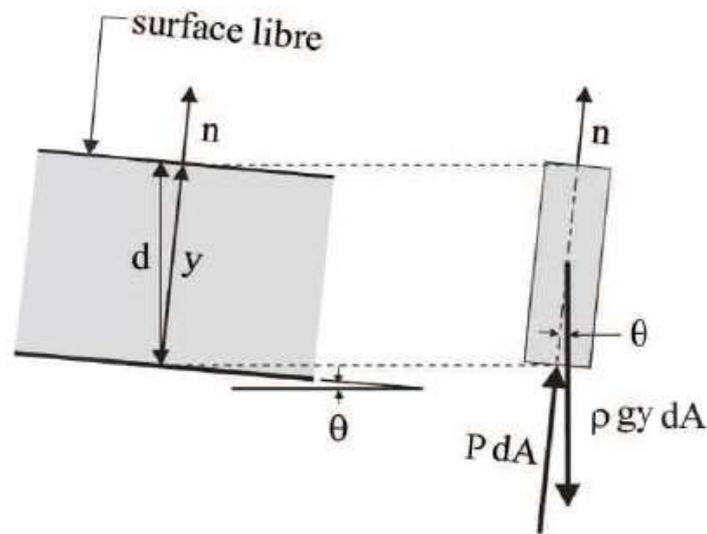


Figure 1.5 Élément de fluide sous une surface libre

En l'absence de changement de direction dans l'écoulement, il n'y a pas d'accélération dans la direction normale à l'écoulement, si bien que la composante des forces de gravité et la force de pression le long de l'axe donnent :

$$P dA = \rho g y dA \cos \theta$$

$$\text{Soit } P = \rho g y \cos \theta$$

Comme $y = d \cos \theta$, on obtient : $P = \rho g y \cos^2 \theta$

Aussi bien les rivières naturelles que les conduites d'égout en milieu urbain ont généralement des pentes nettement inférieures à 10%, si bien qu'on écrit : $P = \rho g y = \rho g d$

7. EQUATION D'ENERGIE POUR LES ECOULMENTS A SURFACE LIBRE

3.1 Formulation générale

Comme pour les écoulements en charge, l'équation de conservation d'énergie peut s'écrire pour les écoulements à surface libre comme suit :

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + J$$

où α est le coefficient de correction qui tient compte de la non-uniformité de la vitesse dans une section données (comme généralement $1,04 < \alpha < 1,14$, on suppose souvent $\alpha = 1$).

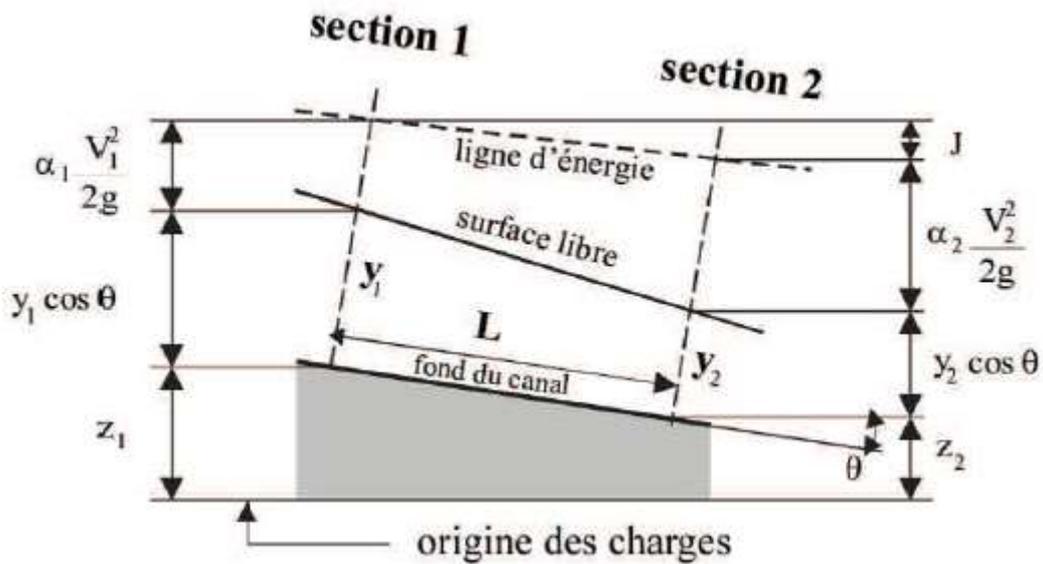


Figure 1.6 Hauteur de charge pour les écoulements à surface libre

8. ÉQUATION DE CONTINUITÉ

L'équation de continuité exprime que la masse de liquide sortant d'une section 2 est égale à la masse de liquide entrant dans une section amont 1 pendant le même intervalle de temps Δt . D'autre part, le liquide est supposé homogène et incompressible ($\gamma_w = \text{constante}$). Il y a donc aussi continuité du volume.

Donc le volume entrant $Q_1 \cdot \Delta t$ est égal au volume sortant $Q_2 \cdot \Delta t \Rightarrow Q_1 = Q_2$. En écoulement permanent (uniforme ou non), le débit se propage en restant constant.