



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A.
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Hydraulique des écoulements à ciel ouvert

Résumé du cours

Destiné aux étudiants de première année master Aménagement Hydro-agricole

Par : Dr. Nacira CHOURGHAL

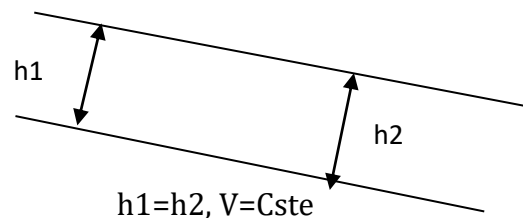
I. Écoulement uniforme dans les canaux à ciel ouvert

I.1 Introduction

- ✓ Les écoulements à ciel ouvert ou à surface libre comporte la particularité de comporter une surface libre en contact avec l'air.
- ✓ La surface libre est soumise à la pression atmosphérique et sa forme ainsi que les dimensions de la masse liquide sont susceptible de varier.

Le régime d'écoulement dans les canaux à ciel ouvert est dit « **uniforme** » si la pente longitudinale et la section transversale sont constantes tout le long de la masse liquide

I.2 Formule générale de l'écoulement



Dans un écoulement à surface libre en régime uniforme, la perte de charge par mètre ou pente hydraulique de l'écoulement j est égale à la pente géométrique.

- ✓ Si A est la section mouillée du canal
- ✓ B , le périmètre mouillé du canal
- ✓ R , le rayon hydraulique avec : $R=A/B$

$$V = C\sqrt{Ri} \text{ , et donc } Q = CA\sqrt{Ri}$$

Avec V la vitesse d'écoulement (m/s) et Q , le débit d'écoulement (m³/s)

I.3 Formules usuelles de calcul du « Coefficient de Chezy C »

a/ Formule de Bazin :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\mu}{\sqrt{R}}}$$

b/ Formule de Pavlovsky

$$C = \frac{1}{\mu} R^\gamma$$

μ , rugosité du canal

$$y = 2.5 \sqrt{\mu} - 0.13 - 0.75 \sqrt{R} [\sqrt{\mu} - 0.1]$$

c/ Formule de Manning (la plus utilisée)

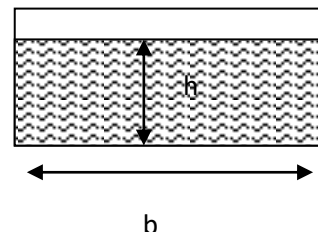
$$C = \frac{1}{\mu} R^{\frac{1}{6}}$$

I.4 Eléments hydrauliques de la section droite

a/ Section rectangulaire

$$A = bh$$

$$B = b + 2h$$

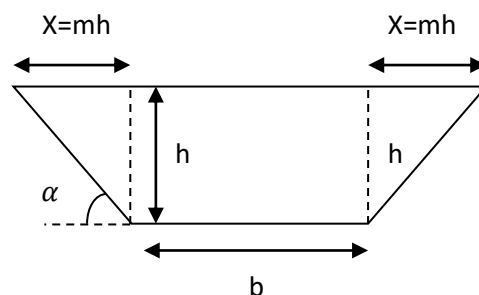


b/ Section trapézoïdale :

$$A = (b + mh)h$$

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

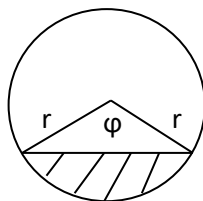
$$m = \cotg \alpha$$



c/ Section circulaire

$$A = \frac{r^2}{2} (\varphi - \sin \varphi)$$

$$B = r\varphi$$



I.5 Section composée

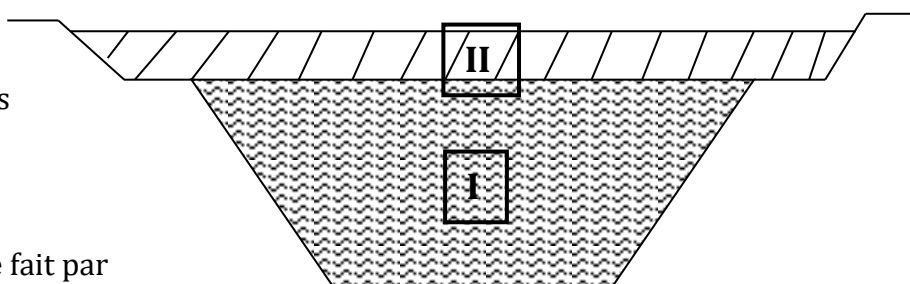
La section composée est une section du canal composé de plusieurs tronçons de différentes formes.

Le calcul du débit d'eau dans le canal se fait par

la formule de Grantz :

$$Q = QI + QII$$

Avec :



- ✓ $QI = CI AI \sqrt{RI i}$
- ✓ $QII = CII AII \sqrt{RII i}$
- ✓ $Q = QI + QII$

I.5 Section hétérogène

Une paroi est appelée hétérogène quand les parois du canal sont caractérisés par différentes rugosités.

$$Q = C A \sqrt{RI i}$$

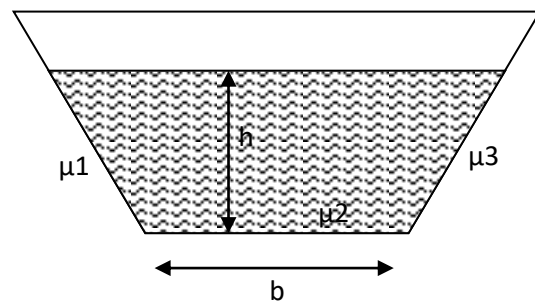
Avec :

$$C = \frac{1}{\mu e} R^{\frac{1}{6}}$$

μe étant la rugosité équivalente :

$$\mu e = \sqrt{\frac{\sum \beta_i \mu_i}{\sum \beta_i}}$$

$\beta_i = \beta_1, \beta_2, \dots$



I.7 Section de meilleure productivité hydraulique ou section hydrauliquement optimale

a/ Section rectangulaire

B_{opt} (rapport d'optimalité) ⇒ b/h=2

b/ Section trapézoïdal

$$B_{opt} \Rightarrow \frac{B}{h} = 2 \left[-m + \sqrt{1 + m^2} \right]$$

I.8 Vitesses admissibles du courant d'eau ou vitesses limites

Pour qu'il n'y est ni envasement ni érosion du canal la vitesse du courant d'eau dans le canal ne doit pas dépasser une valeur maximale appelée « vitesse admissible maximale » et ne doit pas être inférieure à une vitesse limite minimale appelée « vitesse admissible minimale ».

a/ Vitesse admissible maximale

Déterminée par voies expérimentale au laboratoire pour différents types de sol et différents types de parois des canaux.

b/ Vitesse admissible minimale

$$V(ad) \min = \left[\frac{\rho U_0 \sqrt{U_m}}{0.22 \sqrt{R i}} \right]^{3/2}$$

ρ : Concentration des alluvions dans l'eau (kg/m³)

R : Rayon hydraulique (m)

i : Pente géométrique du canal

U₀ : Vitesse conventionnelle (m/s)

U_m : Vitesse moyenne de chute des sédiments (m/s)

Avec :

$$U_m = \frac{\sum P_i U_i}{100}$$

P_i : % de la fraction des particules d'alluvions

U_i : Vitesse de chute des sédiments dans l'eau de la fraction

$$U_i = \frac{U(d_1) + U(d_2) + \sqrt{U(d_1) U(d_2)}}{3}$$

U(d₁) et U(d₂) sont les vitesses de chute des sédiments dans l'eau correspondant au diamètre des particules solide de la fraction P_i

U₀ est déterminée comme suit :

- ✓ Si 0.002 < U_m < 0.008, U₀ = U_m
- ✓ Si 0.0004 < U_m < 0.002, U₀ = 0.002 m/s

II. Écoulement non uniforme dans les canaux à ciel ouvert

II.1 Introduction

On appelle un écoulement non uniforme ou varié un écoulement dans lequel les profondeurs et les vitesses varient le long de la section d'écoulement.

II.1 Equation générale de l'écoulement non uniforme

a/ Equation générale

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{C^2 A^2 R} + \frac{Q^2}{g A^3} \frac{\partial A}{\partial l}}{1 - \frac{Q^2}{g A^3}}$$

b/ Pour un canal prismatique

$$Q = C A \sqrt{R i}$$

II.2 Energie spécifique de section

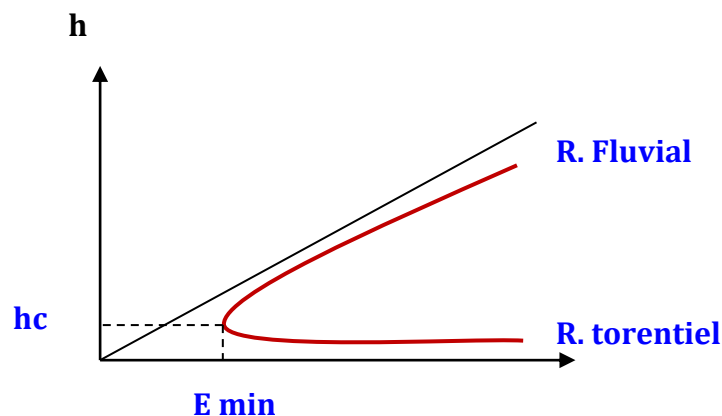
$$E(h) = h + \frac{v^2}{2g} = E_p + E_c$$

E_p : Energie potentielle

E_c : Energie cinétique

II.3 Profondeur critique-Régime fluvial- Régime torrentiel

La profondeur du courant d'eau correspondant à l'énergie minimale de la section droite est appelée « hauteur critique »



Quand h augmente $\Rightarrow E_p \nearrow$ et $E_c \searrow$ et inversement

On peut noter que :

✓ $h > h_c \Rightarrow$ le régime est fluvial

- ✓ $h=hc \Rightarrow$ le régime est transitoire
- ✓ $h < hc \Rightarrow$ le régime est torrentiel

II.4 Détermination de la profondeur critique

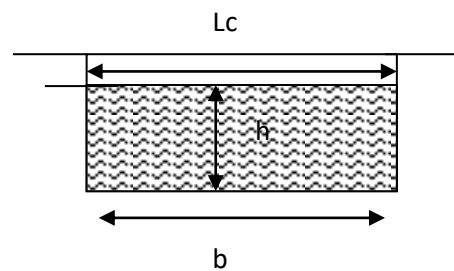
La profondeur critique de l'écoulement est déterminée en minimisant la fonction $E(h)$:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{Ac^3}{Lc}$$

Ac et Lc sont la surface mouillée et la largeur spécifique de la section d'écoulement critique

a/ Cas d'une section rectangulaire

$$hc = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g b^2}}$$



b/ Cas d'une section trapézoïdal

La section est soumise à une empirique

$$hc = k \left[1 - \frac{S}{3} + 0.105 S^2 \right]$$

Avec :

$$k = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g b^2}} \quad \text{et} \quad S = \frac{mk}{b}$$

c/ Pente critique

C'est la pente pour laquelle $hc=hn$ c'est-à-dire :

$$Q = Cn An \sqrt{Rn i} = Q = Cc Ac \sqrt{Rc ic}$$

Elle est déterminée comme suit :

$$i = \frac{g Ac}{Lc Cc^2 Rc}$$

$$\text{Et donc } i = \frac{f(hc)}{f(hn)} ic$$

Conclusions :

- ✓ $hn > hc \Rightarrow i < ic$

✓ $h_n = h_c \Rightarrow i = i_c$

✓ $h_n < h_c \Rightarrow i > i_c$

II.4 Paramètre de cinétisme du courant d'eau- Nombre de Froude

$$\frac{Q^2 L}{g A^3} = \frac{E_c}{E_p}$$

Ce rapport est appelé nombre de Froude, et caractérise l'étape énergétique du courant d'eau, autrement dit :

✓ $h > h_c \Rightarrow E_p > E_c \Rightarrow Fr < 1$ et le régime est fluvial

✓ $h = h_c \Rightarrow E_p = E_c \Rightarrow Fr = 1$ et le régime est transitoire

✓ $h < h_c \Rightarrow E_p < E_c \Rightarrow Fr > 1$ et le régime est torrentiel

II.5 Etude de la forme de la surface libre dans les canaux à ciel ouvert en écoulement non uniforme

Tableau récapitulatif de la forme de la surface libre dans les canaux à ciel ouvert en écoulement non uniforme

$i > 0$	$i = 0$	$i < 0$
<p> $h > h_n > h_c$ $h_n > h > h_c$ $h_n > h_c > h$ $ic > i$ </p>	<p> $h > h_c$ $h > h_c$ $i = 0$ </p>	<p> $h > h_c$ $h > h_c$ $i < 0$ </p>
<p> $h > h_c > h_n$ $h_c > h > h_n$ $h > h_n > h_c$ $i > ic$ </p>		
<p> $h > h_n = h_c$ $h_n = h_c > h$ $i = ic$ </p>		