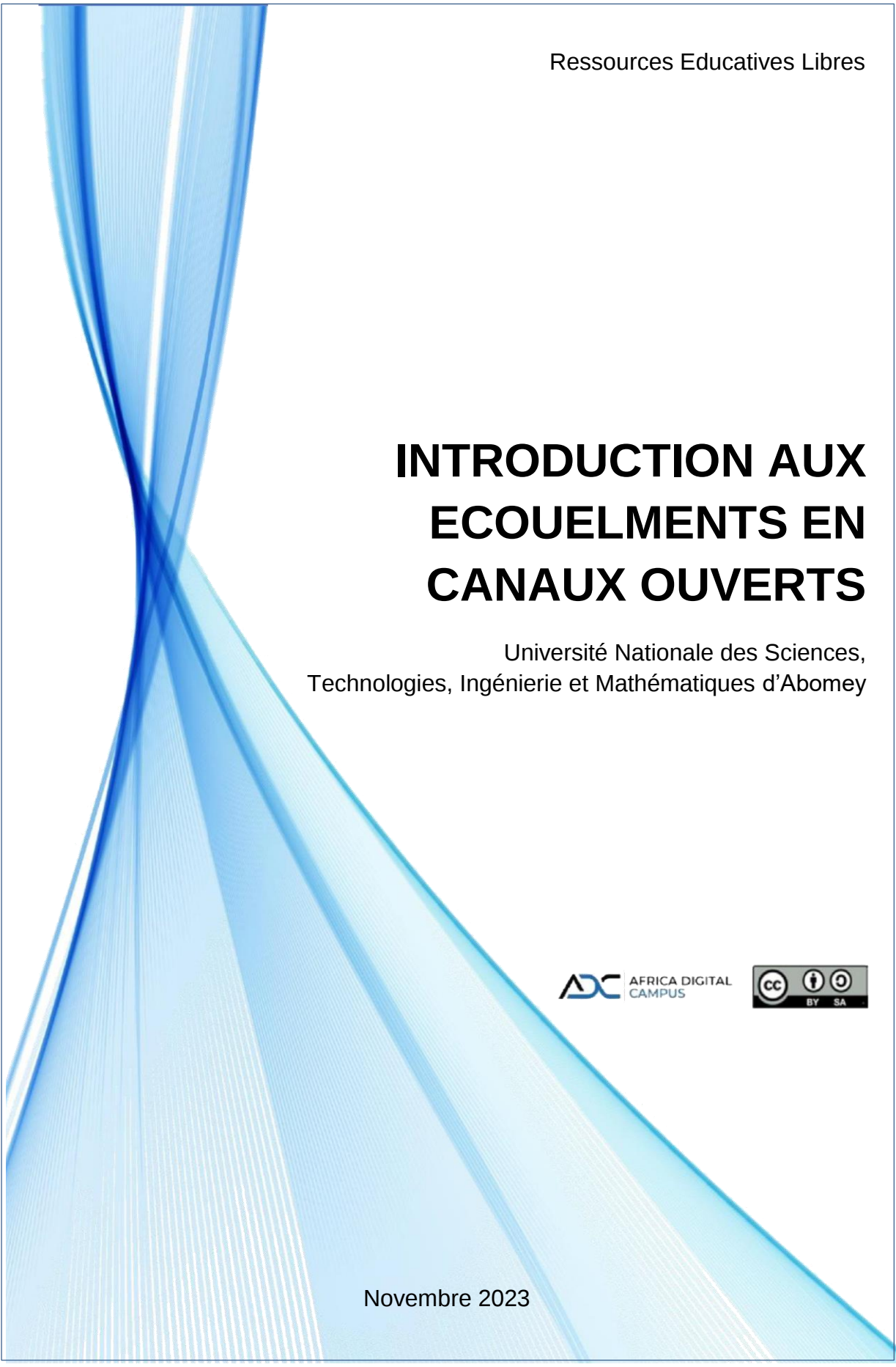




Ressources Educatives Libres

INTRODUCTION AUX ECOUELEMENTS EN CANAUX OUVERTS

Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey



Novembre 2023

Chapitre 5

ÉCOULEMENT EN CANAUX OUVERTS

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous pencherons , sur l'écoulement uniforme . Il est en particulier consacré à la démonstration de l'équation de base de l'écoulement uniforme (équation de Chézy) et à l 'introduction de différentes formules de rugosité qui permettront de modéliser le frottement sur les parois.

5.1.1 Généralité

L'hydraulique à surface libre se distingue de l'hydraulique en charge par l'existence d'une surface libre, c'est-à-dire d'une surface où l'écoulement est en contact direct avec l'atmosphère : le gradient de pression ne peut plus être le moteur de l'écoulement, c'est la gravité qui devient l'agent moteur. Le domaine d'application est large :

- cours d'eau naturels : rivières, fleuves, etc. ;
- canaux de navigation, d'irrigation, etc. ;
- systèmes d'évacuation : réseaux d'assainissement pluvial ;
- aménagements : retenues d'eau, usines de production d'électricité, ports, etc.

Une caractéristique de la plupart de ces écoulements est la suivante : la hauteur d'écoulement ainsi que la largeur sont généralement petites par rapport à la longueur d' écoulement. On parle d' écoulement filaire.

5.1.2 Un peu de vocabulaire et des notations

- Bief : tronçon homogène en termes de pente moyenne et de section d'écoulement (on emploie parfois aussi le mot bisse, notamment dans le Valais, mais le contexte est un peu différent) ;
- type de cours deau : il existe plusieurs classifications. Selon Bernard (1927), une distinction des cours d'eau peut se faire en fonction de la pente s_0 en pourcentage :
 - $s_0 < 3$ on parle de rivière ;
 - $3 < s_0 < 6$ on parle de rivière torrentielle ;
 - $s_0 > 6$ on parle de torrent.
- périmètre mouillé p : longueur de la surface d'écoulement en contact avec le lit (fond + berges), c'est-à-dire le périmètre de la section d'écoulement auquel on retranche la largeur au miroir B .

- section d'écoulement (ou section mouillée) s : partie de la section du canal limitée par les parois et la surface libre ;
- largeur au miroir B : largeur de la section d'écoulement au niveau de la surface libre ;
- hauteur d'écoulement : hauteur moyenne d'eau, par définition c'est $h = S/B$;
- hauteur normale h_n : c'est la hauteur d'un écoulement permanent uniforme dans un bief. La hauteur normale est fonction du débit Q , de la rugosité C , et de la pente moyenne s_0 ;
- tirant d'eau : profondeur maximale d'une section d'écoulement ;
- rayon hydraulique : c'est une longueur caractéristique définie par $R_H = R = S/P$. Pour un écoulement dans un canal rectangulaire infiniment large ($B \gg h$), le rayon hydraulique correspond à la hauteur d'écoulement h ;
- débit Q : flux d'eau par unité de temps à travers la surface d'écoulement ;
- coefficient de rugosité : coefficient traduisant la rugosité des parois (coefficient de Chézy noté C ou de Manning-Strickler noté K) ;
- lit mineur : lit occupé ordinairement par un cours d'eau par opposition au lit majeur qui correspond à l'emprise maximale historique d'un cours d'eau ou à la plaine inondable. On parle aussi de niveau des plus hautes eaux (PHE) pour désigner la cote maximale atteinte par la surface libre d'un cours d'eau ;
- la berge ou rive est le talus qui sépare le lit mineur du lit majeur. Lorsque la berge est couverte par la végétation, on parle de ripisylve.

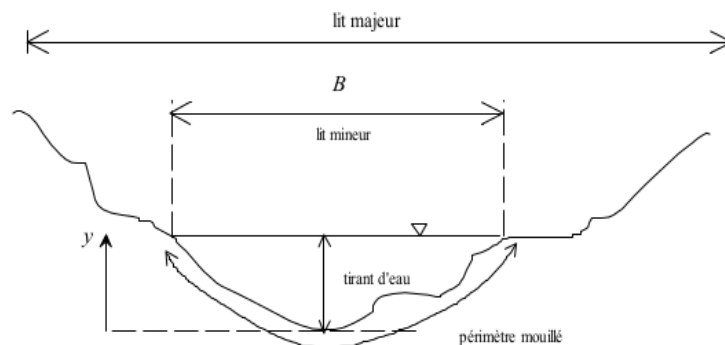


FIGURE 5.1 – coupe d'une rivière.

5.2 Hypothèses de l'écoulement uniforme

Dans un canal de pente constante et de section transversale invariable (canal cylindrique ou prismatique), l'écoulement est uniforme si :

1. la profondeur (maximale ou moyenne), la section mouillée , la vitesse moyenne restent constantes d'une section à une autre du canal
2. la ligne de charge, la surface libre et le fond du canal sont parallèles.

L'hypothèse de la constance des vitesses concerne bien l'égalité des vitesses moyennes d'une section à l'autre, mais dans une section la vitesse n'est pas obligatoirement constante d'un point à un autre. Souvent, on suppose que la distribution des vitesses est la même d'une section à l'autre, ou alors on néglige les effets de cette distribution.

L'écoulement uniforme peut être laminaire ou turbulent : seul ce dernier cas est d'utilisation courant pour l'ingénieur.

L'écoulement uniforme au sens stricte est très rare, mais certains écoulements dans des canaux artificiels peuvent être considérés comme tels. Par exemple, dans un canal artificiel de section et pente constantes et à condition de se placer suffisamment loin de toute singularité, l'écoulement qui se présente est à peu près uniforme. C'est souvent le cas dans les canaux d'irrigation.

Même dans le cas des rivières naturelles (non strictement prismatique), on peut utiliser de manière approximative certains résultats du mouvement uniforme, quand la ligne d'eau est sensiblement parallèle au fond.

Enfin, comme nous le verrons, l'écoulement uniforme constitue toujours le régime de référence, même pour les autres types d'écoulement.

5.3 Formule de Chézy

La formule de Chézy est la formule historique à laquelle la plupart des auteurs font référence, mais à laquelle les praticiens préfèrent des variantes plus précises ou mieux documentées.

Le principe de base de la formule repose sur un équilibre des forces en présence. Supposons un bief élémentaire de longueur Δs dans lequel l'écoulement est uniforme.

Passons en revue les forces pouvant s'exercer sur l'eau du volume de contrôle de longueur Δs . Nous avons :

1. les forces de gravité (le poids propre du liquide) à cause de la gravité qui est le moteur du mouvement
2. Les forces de pression sur les faces du volume de contrôle :
 - (a) Les pressions sur les faces latérales sont les seules forces transversales s'exerçant sur le volume de contrôle, et elles ne correspondent à aucun mouvement. Elles sont donc en équilibre entre elles et n'interviennent pas dans la dynamique du système.
 - (b) la pression atmosphérique à la surface de l'eau et la pression au fond qui se compensent.
 - (c) les pressions s'exerçant sur les faces amont et aval du volume de contrôle se compensent car l'aire sur laquelle s'exerce la pression à l'amont est exactement la même que l'aire à l'aval, vu les hypothèses de l'écoulement.
3. les forces de résistances dues au frottement le long des parois.

On conclut que les forces en considération sont : les forces de gravité et la résistance de frottement.

Le théorème de Newton nous apprend que la résultante des forces conduit à une accélération de la masse du liquide :

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{V}}{dt}. \quad (5.1)$$

Pour un écoulement uniforme le liquide ne subit aucune accélération.

Expression de la norme de la force de gravité F_G .

$$F_G = \bar{\omega} A \Delta s. \quad (5.2)$$

Où $\bar{\omega}$ est le poids volumique, A l'aire de la section et Δs l'élémentaire de longueur du bief.

Seule la composante longitudinale de la force de gravité doit être prise en compte. On définit la pente de fond s_0 :

$$s_0 = \sin \theta, \quad (5.3)$$

ce qui permet d'écrire la composante longitudinale sous la forme :

$$F_{Gl} = \bar{\omega} A \Delta s s_0 = \bar{\omega} A \Delta s \sin \theta. \quad (5.4)$$

Expression de la norme de la force de frottement F_R .

Elle s'exerce sur toute la longueur du périmètre mouillé P :

$$F_R = \tau P \Delta s. \quad (5.5)$$

Où τ est la contrainte de frottement par unité de surface. Pour un régime turbulent, cette contrainte est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne de l'écoulement :

$$\tau = kV^2 \quad (5.6)$$

si bien que la force de frottement s'écrit :

$$F_R = \tau P \Delta s = kV^2 P \Delta s. \quad (5.7)$$

L'équilibre entre la force de gravité dans le sens de l'écoulement et la force de frottement, opposée à l'écoulement s'écrit :

$$kV^2 P \Delta s = \bar{\omega} A \Delta s \sin \theta. \quad (5.8)$$

Le rayon hydraulique étant défini, par le rapport de l'aire mouillée au périmètre mouillé :

$$R = \frac{A}{P} \quad (5.9)$$

on peut donc déduire la formule de Chézy :

$$V = \sqrt{\frac{\bar{\omega}}{k}} \sqrt{R s_0} = C \sqrt{R s_0} \quad (5.10)$$

où $C = \sqrt{\frac{\bar{\omega}}{k}}$ est le coefficient de Chézy, qui dépend de la rugosité des parois. Il varie de $20m^{1/2}s^{-1}$ pour les rivières très irrégulières à $80m^{1/2}s^{-1}$ pour les canaux aux parois très lisses

5.4 Formule de Chézy et Coefficient de Bazin

En résumé, par équilibre des forces de gravité et de frottement sur les parois, nous sommes arrivés à la formule de Chézy (où C est le coefficient de Chézy)

$$\boxed{V = C \sqrt{R s_0}} \quad (5.11)$$

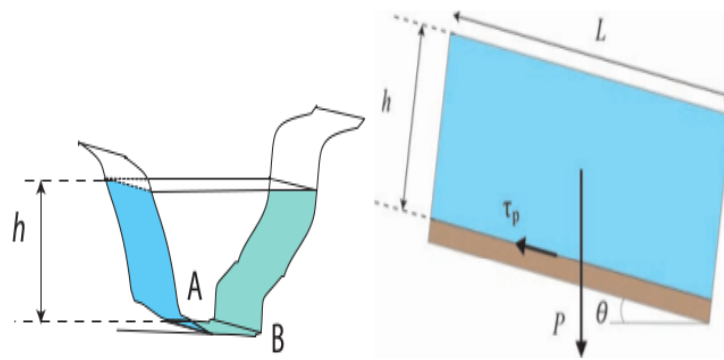


FIGURE 5.2 – équilibre d’une tranche de fluide. La hauteur h est ici le tirant d’eau puisqu’elle correspond à la hauteur maximale d’eau dans le cours d’eau.

5.4.1 Coefficient de bazin

la formule de Chézy est souvent prise comme référence dans les traités d’hydraulique, mais elle n’est pas utilisée par les praticiens, et cela pour deux raisons :

- le coefficient de Chézy n’a pas été étudié systématiquement du point de vue pratique,
- ce coefficient s’est avéré dépendre également, du rayon hydraulique : pour les canaux plus petits, où R est plus petit également, la vitesse moyenne diminue plus que ne l’annonce la formule de Chézy, parce que plus la section est petite, plus l’influence des parois semble prépondérante.

Les ingénieurs se sont attachés à trouver une expression de C qui tienne compte de cette dépendance à R . Une formule assez utilisée dans le monde francophone est celle de Bazin qui présente C comme une fonction de la rugosité et du rayon hydraulique R . la formule, de bazin en unités métriques ;

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \quad [m^{1/2}s^{-1}] \quad (5.12)$$

Dans cette formule, m est un coefficient de rugosité qui dépend de la nature de la paroi. Bazin suggère six catégories de parois qui permettent de se faire une idée de la valeur à adopter pour m .

Nature des parois	$m(m^{1/2})$
Parois très unies (ciment, bois raboté)	0.06
Parois unies (planches, briques, pierresde taille ...)	0.16
parois en maçonnerie de moellons	0.46
Parois de nature mixte (section en terre, très irrégulières)	0.85
Canaux en terre dans les conditions ordinaires	1.30
Canaux en terre, avec fond de galets, parois herbéss	1.75

La formule de Chézy, avec le coefficient de Chézy calculé à partir de la formule de Bazin, est utilisée essentiellement dans les pays latins et en france, en particulier. Cependant pour les calculs pratiques, les formules qui suivent sont plus répandus et souvent d’un usage plus simple.

5.5 Formule de Manning

Manning propose quant à lui une autre formule pour lier le coefficient de rugosité C au rayon hydraulique, de façon plus simple que la formule de Bazin.

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}. \quad (5.13)$$

Dans cette formule, la valeur de n dépend de la rugosité de la paroi. Cette formulation plus simple de C permet d'écrire la formule de Chézy de la manière monôme

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} s_0^{1/2}, \quad (5.14)$$

ce qui rend la formule de Manning souvent plus facile à utiliser dans les calculs. De plus, les tableaux des valeurs de n que l'on peut trouver dans la littérature sont extrêmement complets et détaillées, si bien que l'utilisation de cette formule est très répandue non seulement dans le monde anglo-saxon (Etats-Unis, Canada, Royaume-Uni) où elle a vu le jour, mais dans la plupart des pays. Bien que la formule soit d'origine irlandaise, n est exprimé en unités métriques ($m^{1/2}s^{-1}$).

5.6 Notion de déservoir

Les déservoirs sont des ouvrages aux formes variées : déservoir à paroi mince pour mesurer un débit (plaque mince verticale), barrage-déservoir (barrage au fil de l'eau avec évacuation du trop plein), déservoir mobile (vanne à clapet, vanne à batardeaux, etc.) qui permet d'ajuster la pelle, et déservoir à seuil épais (ouvrage souvent profilé). Un seuil permet de contrôler un débit. Si le seuil est suffisamment épais, la hauteur d'écoulement au niveau de la crête du seuil est nécessairement égale à la hauteur critique, c'est-à-dire

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \quad (5.15)$$

avec $q = \frac{Q}{B}$ le débit par unité de largeur à l'amont du seuil.