

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et Hydraulique

Référence :...../ 2018



جامعة محمد خيضر  
بسكرة

جامعة محمد خيضر - بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية والري

المرجع: ...../ 2018

## Mémoire de Master

2<sup>ème</sup> année

Option : Ouvrages Hydrauliques

THEME

Etude du choix de l'emplacement des  
hydroliennes dans un canal à section  
constante

**Etudiant:**

•Bahaz Abdelhak

**Encadreur:**

•Pr : Ouamane Ahmed

PROMOTION : 2018

## Résumé

L'objectif principal de cette étude est de vérifier l'impact de l'emplacement des hydroliennes sur l'écoulement dans un canal. Pour ce faire, une étude expérimentale a été nécessaire. D'une manière générale l'hydrolienne peut être considérée comme un obstacle à l'écoulement provoquant une perte d'énergie plus au moins significative. A cet effet, l'expérimentation a concerné à la fois le nombre d'hydroliennes alignées à travers l'écoulement et le nombre de lignes.

Les résultats obtenus de cette étude ont montré que l'effet de l'installation des hydroliennes à travers l'écoulement n'engendre qu'une fraction de perte d'énergie, par conséquent, on peut dire que c'est préférable d'augmenter le nombre d'hydrolienne pour avoir une production plus grande de l'énergie électrique avec une faible perte d'énergie hydraulique.

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو التحقق من تأثير موقع التوربينات على الجريان عند وضعهم في قنوات مائية. لتحقيق هذا الهدف ينبغي اجراء دراسة تجريبية.

على العموم يمكن ان تعتبر التوربينات حاجز على للجريان يولد ضياع طاقة تكاد تكون ذات معنا. لهذا الغرض شملت الدراسة التجريبية في الوقت ذاته دراسة تأثير عدد التوربينات وعدد الخطوط المكونة منها.

النتائج المحصلة من هذه الدراسة أظهرت لنا اننا تأثير التوربينات ضعيف ولا يادي الا لضياع كمية قليلة من الحمولة. لهذا نستطيع القول انه من المستحسن رفع عدد التوربينات من اجل وليد أكبر قدر ممكن من الطاقة الكهربائية مع ضياع نسبة قليلة من الطاقة المائية.

# *Remerciement*

*Au terme de cette étude, je tiens à remercier mon promoteur Monsieur OUAMANE Ahmed pour son aide appréciable, son soutien et ses conseils fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail.*

*Je remercie également tous mes professeurs et docteurs particulièrement, M<sup>r</sup> : BOUZIANE Mohamed Toufik, madame Charhabil Sonya, M<sup>r</sup> : Yazid loghraichi et ADILE LAIADHI et BENAÏSSA Sahraoui pour l'aide précieuse, qu'ils m'ont apportée durant l'élaboration de ce modeste travail.*

*Aussi, je me permets d'exprimer tout mon respect aux membres de jury qui me feront l'honneur d'apprécier notre travail.*

*Je remercie encore tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'élaboration et de département d'hydraulique de cette étude.*

*Merci pour tous*

## *∞ Dédicace ∞*

*Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect*

*Ma mère Fatima et Mon père Ismain qui a beaucoup sacrifiée pour  
moi et pour l'affection qu'elle ma toujours portée.*

*Mes frères et mes sœurs et ma femme et mon petit Amir Islam et  
toute la famille Bahaz.*

*A toutes mes amis Mrazga Yacine ,Chabira zaher ,Nawri ,*

*Mouadh*

*Mes amis de l'université Biskra et tous ceux qui ont contribué de  
prés ou de loin à ma formation.*

## Sommaire

*Introduction générale.....1*

### **Première Partie**

#### **Etude bibliographique**

*I-1. Introduction .....2*

*I-2. Généralités sur les hydroliennes .....3*

*I-2-1. Définition.....3*

*I-2.2 Composition d'une hydrolienne.....4*

*I-2.3 Principe de fonctionnement des hydroliennes.....5*

*I-2-4. Différents types d'hydroliennes.....5*

*I-2-4-1 Classification suivant la technologie.....5*

*I-2-4-2 Classification suivant le mode de récupération.....8*

*I-3- Avantages et inconvénients respectifs.....8*

*I-3-1 - Avantages.....8*

*I-3-2- Inconvénients..... 9*

*I-4- Comparaison entre les hydrolienne et les éoliennes.....9*

*I-5- Hydrolienne et ouvrages hydroélectriques..... 11*

*I-6- Perspectives prometteuses pour les hydroliennes.....12*

*I-7- Puissance exploitable par les hydroliennes.....13*

*I-8- Orientation et le Profil de l'écoulement.....15*

*I-8-1- Profil de vitesse.....16*

*I-9- Hydroliennes et cours d'eau.....17*

*I-9-1- Les canaux hydrauliques.....17*

*I-9-2- Les fleuves et rivières.....18*

<i>II-9-3- Les estuaires.....</i>	<i>18</i>
<i>II-10- Perte de charge engendrée par une hydrolienne.....</i>	<i>19</i>
<i>I-11 Conclusion.....</i>	<i>22</i>

## ***Deuxième Partie***

### ***Etude Théorique***

#### **Chapitre II : Ecoulement dans les canaux a section constant**

<i>II-1. INTRODUCTION.....</i>	<i>23</i>
<i>II-2 DEFINITIONS ESSENTIELLES .....</i>	<i>23</i>
<i>II-1-1 MASSE VOLUMIQUE DE L'EAU.....</i>	<i>23</i>
<i>II-1-2 POIDS VOLUMIQUE DE L'EAU.....</i>	<i>23</i>
<i>II-1-3 DEBIT DE L'ECOULEMENT.....</i>	<i>24</i>
<i>II-1-4 VITESSE EN UN POINT DE L'ECOULEMENT.....</i>	<i>24</i>
<i>II-1-5 VITESSE MOYENNE.....</i>	<i>24</i>
<i>II-1-6 LIGNE DE COURANT.....</i>	<i>24</i>
<i>II-1-7 TUBE DE COURANT.....</i>	<i>24</i>
<i>II-1-8 PRESSION HYDROSTATIQUE EN UN POINT.....</i>	<i>24</i>
<i>II-1-9 CHARGE HYDRAULIQUE EN UN POINT D'UN LIQUIDE EN MOUVEMENT.....</i>	<i>25</i>
<i>II-1-10 CHARGE MOYENNE DANS UNE SECTION.....</i>	<i>25</i>
<i>II-1-11 LIGNE PIEZOMETRIQUE.....</i>	<i>25</i>
<i>II-1-12 LIGNE DE CHARGE MOYENNE.....</i>	<i>26</i>
<i>II-1-13 CHARGE SPECIFIQUE.....</i>	<i>26</i>

<b>II-1-14</b>	<b>POUSSEE SUR UNE PAROI DU CANAL.....</b>	<b>27</b>
<b>II-1-15</b>	<b>FROTTEMENT SUR UNE PAROI DU CANAL.....</b>	<b>27</b>
<b>II-2</b>	<b>LES DIFFERENTS TYPES DE CANAUX.....</b>	<b>27</b>
<b>II- 2-1-</b>	<b>DEFINITION.....</b>	<b>27</b>
<b>II -2-2-</b>	<b>CANAUX NATURELS.....</b>	<b>28</b>
<b>II -2-3-</b>	<b>CANAUX ARTIFICIELS.....</b>	<b>28</b>
<b>II -2-4-</b>	<b>GEOMETRIE DES CANAUX.....</b>	<b>28</b>
<b>II-2-5-</b>	<b>ECOULEMENT DANS LES CANAUX.....</b>	<b>29</b>
<b>II-2-6-</b>	<b>DISTRIBUTION DES VITESSES DANS UN CANAL.....</b>	<b>29</b>
<b>II-3-</b>	<b>GENERALITES SUR LES ECOULEMENTS.....</b>	<b>29</b>
<b>II-3-1-</b>	<b>ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE.....</b>	<b>29</b>
<b>II-3-1-1-</b>	<b>VARIABILITE DANS LE TEMPS.....</b>	<b>29</b>
<b>II-3-1-2-</b>	<b>VARIABILITE DANS L'ESPACE.....</b>	<b>30</b>
<b>II-3-1-3-</b>	<b>LES DIFFERENTS TYPES D'ECOULEMENT.....</b>	<b>31</b>
<b>II-4-</b>	<b>LES DIFFERENTS REGIMES D'ECOULEMENT.....</b>	<b>31</b>
<b>II-4-1-</b>	<b>REGIME PERMANENT.....</b>	<b>31</b>
<b>II-4-2-</b>	<b>REGIME TRANSITOIRE .....</b>	<b>31</b>
<b>II-5-</b>	<b>EQUATIONS DE REGIMES D'ECOULEMENT .....</b>	<b>31</b>
<b>II-5-1-</b>	<b>NOMBRE DE FROUDE .....</b>	<b>31</b>
<b>II-6-</b>	<b>EQUATIONS DE L'HYDRAULIQUE FLUVIALE.....</b>	<b>32</b>
<b>II-6-1-</b>	<b>EQUATION DE CONTINUITE.....</b>	<b>32</b>
<b>II-6-2-</b>	<b>EQUATION DE BERNOULLI .....</b>	<b>33</b>
<b>II-7-</b>	<b>ECOULEMENTS PERMANENTS UNIFORMES.....</b>	<b>34</b>
<b>II-7-1-</b>	<b>DEFINITION.....</b>	<b>34</b>

<b>II-7-2- EQUATIONS DE L'ECOULEMENT UNIFORME.....</b>	<b>35</b>
<b>II-7-2-1 FORMULES EMPIRIQUES.....</b>	<b>35</b>
<b>II-7-2-1-1-FORMULE DE CHEZY.....</b>	<b>35</b>
<b>II-7-2-1-2-FORMULE DE MANNING.....</b>	<b>36</b>
<b>II-7-2-1-3-FORMULE DE DARCY –WEISBACH.....</b>	<b>37</b>
<b>II-7-2-2-1- HAUTEUR NORMALE, PENTE CRITIQUE.....</b>	<b>37</b>
<b>II-8- ECOULEMENTS PERMANENTS NON UNIFORMES.....</b>	<b>38</b>
<b>II-8 -1- DEFINITION.....</b>	<b>38</b>
<b>II-8-2- ECOULEMENT BRUSQUEMENT VARIE.....</b>	<b>38</b>
<b>II-8-2-1- LE RESSAUT HYDRAULIQUE.....</b>	<b>39</b>
<b>II-8-3- ECOULEMENT GRADUELLEMENT VARIE.....</b>	<b>39</b>
<b>II-8-3-1- DEFINITION.....</b>	<b>39</b>
<b>II-8-3-2- EQUATION SIMPLIFIEE DE SAINT VENANT.....</b>	<b>40</b>
<b>II-8-3-3- FORME DE LA SURFACE D'EAU.....</b>	<b>42</b>
<b>II-8-3-4- CANAUX A PENTE FAIBLE.....</b>	<b>43</b>
<b>II-8-3-5 CANAUX A PENTE FORTE.....</b>	<b>44</b>
<b>II-8-3-6- CANAUX A PENTE CRITIQUE.....</b>	<b>46</b>
<b>II-8-3-7- CANAUX HORIZONTAUX.....</b>	<b>47</b>
<b>II-8-3-8- CANAUX A CONTRE PENTE.....</b>	<b>48</b>
<b>II-9- THEORIE DE CALCUL DE LA PERTE DE CHARGE DANS UN CANAL A</b>	
<b>ECOULEMENT A SURFACE LIBRE.....</b>	<b>49</b>
<b>II-9-1- FORMULES DE PERTE DE CHARGE.....</b>	<b>49</b>
<b>II-9-2- PERTE DE CHARGE DANS LES CANAUX.....</b>	<b>50</b>
<b>II-10- CONCLUSION.....</b>	<b>52</b>

## La troisième partie

### *Etude expérimentale*

<b>III-1 Introduction</b> .....	53
<b>III-2 Présentation du modèle d'expérimentation</b> .....	54
<b>III-3 Description du modèle d'hydrolienne</b> .....	55
<b>III.4 Instrumentation de mesure</b> .....	55
<b>III.4.1 Mesure des profondeurs d'eau dans le canal</b> .....	56
<b>III.4.2 Mesure des débits qui transitent par le canal</b> .....	56
<b>III-5. Protocole expérimental</b> .....	57
<b>III.6 Description de l'installation expérimentale</b> .....	58
<b>III-6-1. Choix de la disposition expérimentale</b> .....	58
<b>III-6-1-1. Caractéristiques géométriques et hydrauliques du prototype</b> .....	58
<b>III-6-1-2. Caractéristiques géométriques et hydrauliques du modèle réduit</b> .....	59
<b>III-6-1-2. Choix de l'emplacement de hydroliennes</b> .....	59
<b>III-6. Résultats des essais</b> .....	61
<b>III-6-1. Traitement des résultats</b> .....	61
<b>III-7. Conclusion</b> .....	66
<b>Conclusion générale</b> .....	67



*Liste des figures*

*Première Partie*

**Etude bibliographique**

Figure I01 : Composants d'un générateur hydrolienne (tpehydroliennes2011).....	04
Figure I.02 : <b>Hydroliennes à écoulement libre</b> (Mamadou DANSOKO 2014) .....	06
Figure I.03 : <b>Hydroliennes à axe vertical</b> (Mamadou DANSOKO 2014).....	06
Figure I.04 : <b>Hydrolienne à aile battante ou oscillante</b> (Mamadou DANSOKO 2014).....	07
Figure I. 05 : <b>Effet Venturi</b> (Mamadou DANSOKO 2014).....	08
Figure. I.06 : <b>Eolienne Enercon E126, b) hydrolienne Hammerfest Storm à flux axial</b> <b>De même puissance</b> (MAÎTRE Thierry 2015).....	10
Figure I .07 : <b>Schéma du principe de turbinage par hydrolienne</b> .....	14
Figure I .08 : <b>Relation entre la vitesse du courant et la puissance électrique pour une</b> <b>Hydrolienne de 200 kW</b> .....	14
Figure I.09 : <b>Vue en plongée d'une hydrolienne alignée (a) et d'désalignée (b) avec</b> <b>L'écoulement. Dans le cas présent, l'angle de lacet <math>\xi = 30^\circ</math></b> .....	16
Figure I.10 : <b>Schéma d'un profil de vitesse en loi de puissance tel que retrouve sur un site</b> <b>Hydrolienne</b> .....	16
Figure I.11 : <b>Schéma de principe de l'impact d'une tour d'hydroliennes sur la ligne d'eau</b> <b>(T.Jaquier)</b> .....	20

## Deuxième partie

### Etude Théorique

Figure -II-1 : <i>Pression en un point <math>p = \gamma w. \Delta z</math></i> .....	25
Figure II.2 : <i>Ligne piézométrique</i> .....	26
Figure II.3 : <i>Ligne de charge et ligne piézométrique</i> .....	26
Figure II.4 : <i>Charge spécifique (<math>\beta</math> est ici suppose égal à 1)</i> .....	26
Figure II.5 : <i>Forces appliquées par l'eau sur les parois (L'une perpendiculaire, l'autre tangentielle)</i> .....	27
Figure II.6 : <i>Distribution des vitesses dans un canal</i> .....	29
Figure II.7 : <i>Écoulement permanent et non-permanent</i> .....	30
Figure II.8 : <i>Schéma des écoulements permanents, uniformes variés</i> .....	30
Figure II. 9: <i>Relation charge spécifique-tirant d'eau. (Dégoutte)</i> .....	32
Figure II-10: <i>Écoulement uniforme et permanent</i> .....	34
Figure II.11 : <i>Schéma des écoulements permanents, uniformes et non uniforme     <i>Dans un canal</i></i> .....	35
Figure II.12 : <i>ressaut hydraulique</i> .....	39
Figure II.13: <i>Écoulement non uniforme</i> .....	40
Figure II.14 : <i>Branche M1 (courbe remous d'exhaussement)</i> .....	43
Figure II.15 : <i>Branche M2 (courbe remous d'abaissement)</i> .....	44
Figure II.16 : <i>Branche M3 (courbe remous d'abaissement)</i> .....	44
Figure II.17 : <i>Branche S1 (Courbe remous d'exhaussement)</i> .....	45
Figure II.18 : <i>Branche S2 (courbe remous d'abaissement)</i> .....	45

Figure II.19 : <b>Branche S3 (Courbe remous d'exhaussement)</b> .....	46
Figure II.20 : <b>Branche C1 (courbe remous d'exhaussement)</b> .....	46
Figure II.21 : <b>Branche C3 (Courbe remous d'exhaussement)</b> .....	47
Figure II.22 : <b>Branche H2 (courbe remous d'abaissement)</b> .....	47
Figure II.23 : <b>Branche H3 (courbe remous d'exhaussement)</b> .....	48
Figure II.24 : <b>Branche A2 (courbe remous d'abaissement)</b> .....	48
Figure II.25 : <b>Branche A3 (courbe remous d'exhaussement)</b> .....	48
Figure II.26. : <b>Diagramme d'énergie pour un écoulement non-uniforme</b> .....	50

## La troisième partie

### *Etude expérimentale*

Figure III.1 : modèle des hydroliennes testé .....	53
Figure III. 2 : Vue d'ensemble de la station expérimentale.....	54
Figure III.3 : Schéma de la station d'expérimentation.....	54
Figure III.4 : Schéma type d'un modèle de l'hydrolienne conçue.....	55
Figure III.5 : Capteur de niveau PROSONIC T.....	56
Figure III.6 : Principe de mesure du débit par le débitmètre.....	57
Figure III.7 : Enregistreur du débitmètre ultrason (Prosonic Flow 3W).....	57
Figure III.8 : Schéma de description de l'installation expérimentale.....	58
Figure III.9 : Schémas des différentes variantes de disposition des hydroliennes.....	60/61
Figure III.10 : Schéma de calcul de la charge totale dans le canal.....	61
Figure III.11 : Modèle avec 7 hydroliennes.....	63
Figure III.12 : Modèle avec 14 hydroliennes.....	63
Figure III.13 : Modèle avec 21 hydroliennes.....	64

Figure III.14 : Modèle avec 28 hydroliennes.....	64
Figure III.14 : Modèle avec 35 hydroliennes.....	64
Figure III.16 : Perte de charge en fonction du nombre de ligne d'hydroliennes.....	65
Figure III.17 : Perte de charge en fonction du nombre de ligne d'hydroliennes .....	65

***Liste des Tableaux***

Tableau III-1. Résultats des essais obtenus pour une ligne de sept hydroliennes .....	62
Tableau III-2. Résultats des essais obtenus pour deux lignes de sept hydroliennes Chacune, soit 14 Hydroliennes.....	62
Tableau III-3. Résultats des essais obtenus pour trois lignes de sept hydroliennes Chacune, soit 21 Hydroliennes.....	62
Tableau III-4. Résultats des essais obtenus pour quatre lignes de sept hydroliennes Chacune, soit 28 Hydroliennes.....	62
Tableau III-5. Résultats des essais obtenus pour cinq lignes de sept hydroliennes Chacune, soit 35 Hydroliennes .....	63
Tableau III-6. Tableau récapitulatif de la perte de charge en fonction du nombre d'hydroliennes.....	64

## **INTRODUCTION GENERALE**

La demande en énergie prendra de l'ampleur pendant les prochaines années à cause du développement économique et de l'amélioration du niveau de vie de la population mondiale. Cependant, les ressources d'énergie deviennent insuffisantes et en déclin. Ceci représente un défi de grande importance pour les années à venir.

Une grande partie de la production mondiale d'énergie est d'origine fossile. D'une part, la consommation excessive du stock de ressources naturelles réduira les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et d'autre part, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Les énergies renouvelables représentent une solution durable et propre. Ces énergies, telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse, l'énergie hydroélectrique, l'énergie marémotrice et l'énergie hydrolienne, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergie fossile et nucléaire.

L'énergie hydrolienne est une solution qui se base sur le principe d'exploitation de l'écoulement de l'eau en mer ou le long d'un cours d'eau naturel ou artificiel qui possède un écoulement permanent. Une hydrolienne est une turbine immergée qui utilise l'énergie des courants pour produire de l'électricité. A l'instar des éoliennes qui captent l'énergie cinétique des vents dans l'air, les hydroliennes exploitent les fortes vitesses des courants pour produire de l'énergie électrique. Une hydrolienne utilise donc l'énergie d'écoulement de l'eau qui est une énergie inépuisable, prédictible, et non polluante, à l'image du vent avec les éoliennes.

La présente étude essaie d'évaluer le taux d'énergie consommé par les hydroliennes en fonction de leur disposition le long et à travers le cours d'eau. Elle ne prétend d'aucune manière de parler de la transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique, mais de quantifier l'énergie hydraulique consommée par les hydroliennes. Le taux de consommation d'énergie par les hydroliennes peut être déterminé par le principe de perte de charge entre deux sections, l'une en amont et l'autre en aval du champ d'hydroliennes.

Pour se faire ce travail a été scindé en trois chapitres, le premier se rapporte à l'exposé d'un état de connaissance sur les hydroliennes, qui représente une introduction générale à la turbine marémotrice. Le second chapitre décrit la théorie de l'écoulement à surface libre et le troisième chapitre se rapporte à une étude expérimentale sur modèle réduit

## ***I-1. Introduction***

Avec la montée du prix des carburants fossiles et les changements climatiques, les sociétés modernes se tournent inévitablement vers les énergies renouvelables pour répondre à leurs besoins énergétiques sans cesse croissants. Parmi celles-ci se trouvent notamment les énergies hydro électrique, éolienne et solaire. Toutefois, dans Ces dernière décennie, une nouvelle ressource s'est illustrée comme alternative intéressante, baptisée énergie hydrolienne.

Tout comme les éoliennes qui capturent l'énergie du vent, les hydroliennes produisent de l'électricité à l'aide de l'énergie cinétique contenue dans le courant des rivières ou les marées. Toutefois, une des grandes distinctions entre les énergies éolienne et hydrolienne se situe au niveau de la densité énergétique. Effectivement, puisque la densité de l'eau est approximativement 800 fois plus important que celle de l'air, une hydrolienne sera significativement plus petites qu'une éolienne pour une même puissance produite, et ce, malgré une vitesse d'écoulement typiquement, inférieure.

Les hydroliennes se différencient par leur site d'installation, ainsi, on distingue les hydrolienne marines et les hydroliennes fluviales. Cette étude se rapporte aux hydroliennes installées dans les cours d'eau naturels tel que les fleuves et artificiel tel que les canaux artificiels. Installé les hydroliennes juxtaposées et fixées par leurs bases inférieures à un ancrage ou par leur base supérieure à une barge flottante.

La méthode d'installation côte à côte des hydrolienne se caractérise par des avantages différents en fonction de l'environnement qui sera adopté, ce qui explique l'installation des bases inférieures à l'ancre ou à la base au chaland supérieur flottant. Les bonnes positions des hydroliennes et les séparations séparées les unes des autres peuvent conduire à une exploitation rationnelle des gisements. Cette méthode est caractérisée par des structures légères et flexibles, qui améliorent l'installation et la maintenance.

Dans ce contexte, les hydroliennes peuvent être considérées comme faisant partie des plans de développement des énergies durables et renouvelables. Cependant, de nombreux obstacles économiques ou politiques, tels que le suivi technique et le financement, retardent le passage à l'étape industrielle en raison des problèmes liés au milieu marin et à la technologie utilisée, soulevant des questions sur les avantages et les caractéristiques des hydroliennes et leur viabilité à long terme. Dans la première partie de la thèse, nous menons une étude

d'introduction sur les avantages des hydroliennes dans plusieurs aspects tels que leur fonctionnement, leur capacité et leur puissance ... etc.

## ***I-2. Généralités sur les hydroliennes***

### ***I-2-1. Définition***

Une hydrolienne est un capteur d'énergie cinétique des courants de marée qui permet de produire l'énergie électrique via un alternateur. Son concept progresse très rapidement vue la grande similarité qu'elle présente avec la technologie éolienne. (Ben El Ghali 2008)

Malgré cette grande similarité, les caractéristiques de l'environnement marin font que sa constitution diffère un peu de celle de l'éolienne. À ce jour, plusieurs technologies ont vu le jour et suivant les contraintes (possibilité de navigation au-dessus, profondeur, nature du fond...) liées à un site d'implantation, une technologie peut être mieux adaptée que d'autres. (Mamadou Dansoko 2014)

Une hydrolienne est une turbine sous-marine (ou subaquatique, ou posée sur l'eau et à demi immergée) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur. Une hydrolienne est une machine qui doit répondre aux critères suivants :

- Se maintenir en place et résister aux forces hydrodynamiques du courant
- Turbiner au mieux le flux d'eau du flot et du jusant pour produire de l'énergie mécanique
- Transformer l'énergie mécanique en énergie électrique
- Exporter la production électrique vers le réseau à terre
- Ne nécessiter qu'un minimum de maintenance
- Gêner au minimum la navigation et le milieu vivant
- Produire une énergie à un coût acceptable (2004 J.F. Daviau – H. Majastre –F. Guena – J.Ruer)

L'exploitation de l'énergie hydraulique des courants repose le plus souvent sur des turbines (turbines à axe horizontal ou vertical), mais des projets de convertisseurs plus singuliers voient également le jour.

La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie cinétique d'un courant d'eau en énergie mécanique, qui est quant à elle transformée en énergie électrique par un alternateur. (Gdf suez 2013)

## ***I-2.2 Composition d'une hydrolienne***

Généralement, une hydrolienne est composée de :

### La turbine

Portant plusieurs pales (deux à dix), elle capte l'énergie cinétique et se met en rotation sous l'effet des courants.

### Le générateur

Il est composé de :

*Le rotor*, c'est l'axe sur lequel sont fixées les pales. Il est conçu de manière à tourner toujours dans le même sens.

*L'alternateur*, c'est le générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique fournie par la turbine au rotor en énergie électrique.

*Le flotteur*, c'est un élément réglable permettant d'obtenir un meilleur rendement.

*Le stabilisateur*, c'est le système qui permet à l'hydrolienne d'extraire l'énergie dans les deux sens.

Ces éléments constitutifs de l'hydrolienne sont illustrés sur la figure ci-dessous. (Mamadou Dansoko 2014)

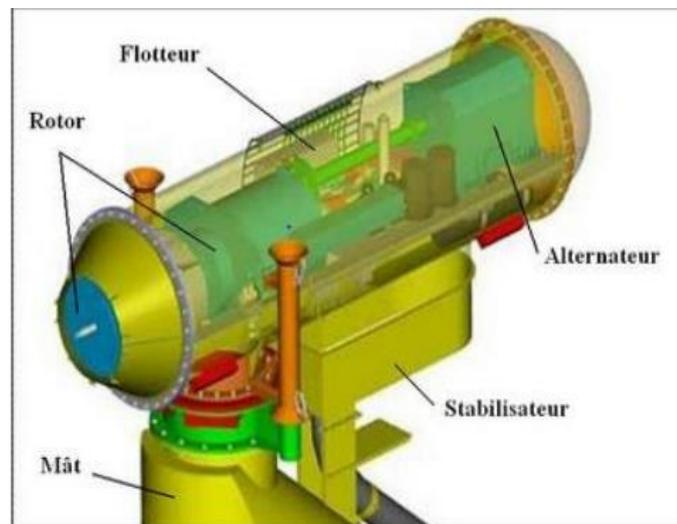


Figure .I.1 Composants d'un générateur hydrolienne (tpehydroliennes2011)

## ***I-2.3. Principe de fonctionnement des hydroliennes***

Les turbines marémotrices sont spéciales et ne nécessitent aucun travail important pour les installer, elles mènent à l'endroit où elles seront placées, elles restent stables et résistent à la puissance des courants marins. Les plumes sont orientées vers les courants marins. Grâce à la puissance des courants océaniques et à l'énergie cinétique de l'eau, les pales du rotor déplacent et déplacent le rotor. L'interaction des aimants électriques rotatifs et des

fichiers de cuivre fixes va générer un courant mécanique et ensuite être envoyé au générateur. Ce dernier le transformera en courant électrique. Ce courant est ensuite transféré à la centrale marémotrice, située sur la rive la plus proche, qui sera élevée pour être éliminée par des lignes à haute tension (M Adeline 2018)

#### ***I-2-4. Différents types d'hydroliennes***

Il existe différents types de turbines marémotrices qui peuvent être comptées selon la méthode d'installation. Ou en fonction de la façon dont ils travaillent. C'est ce que nous allons discuter. Selon la technologie et la méthode d'extraction, nous pouvons classer les hydroliennes en deux catégories principales

##### ***I-2-4-1 Classification suivant la technologie***

Tout comme les éoliennes, les hydroliennes peuvent être à axe horizontal ou vertical. Cependant, d'autres technologies ont été développées afin de mieux extraire l'énergie marine de certains sites. Suivant la technologie et le mode d'immersion, ces hydroliennes peuvent être classées comme suit :

###### *a- Hydroliennes à écoulement libre*

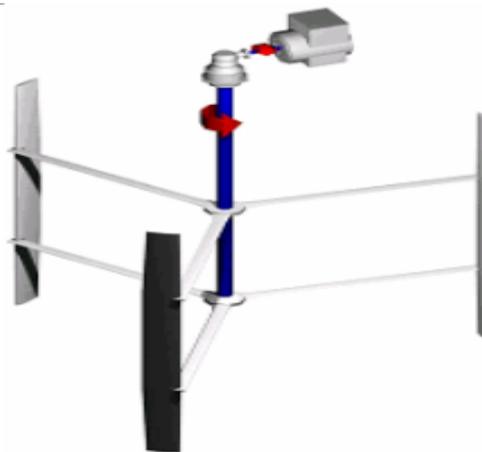
Les hydroliennes à écoulement libre se sont des hélices entraînées par les forces de portance dont l'axe de rotation est parallèle au flux incident (figure 1-2). Ces turbines sont dites aussi horizontales, comme leur axe de rotation. Ce type d'hydrolienne est le plus répandu car elle provient de la transposition pour les courants des éoliennes classiques. La turbine doit être perpendiculaire à la direction de l'écoulement pour atteindre un rendement optimal. Si la direction du courant est variable, un système d'orientation doit être utilisé pour améliorer la performance de la turbine. La vitesse de rotation des pales est réglée de telle manière à optimiser l'énergie produite en fonction de la vitesse du courant incident. Une génératrice récupère directement le couple fourni par l'axe de rotation de la turbine. (T. Jaquier, 2011)



**Figure I-2- Hydroliennes à écoulement libre** (Mamadou DANSOKO 2014)

*b- Hydroliennes à axe vertical*

La turbine ou l'hydrolienne à axe vertical est composée de pales entraînées par les forces de portance autour d'un axe de rotation perpendiculaire au flux incident (figure 1-3), ces turbines sont dites aussi verticales lorsque l'axe de rotation se trouve perpendiculaire au sol. Les turbines à axe vertical sont moins nombreuses, à cause des problèmes mécaniques vibratoires observées lors des essais des premières éoliennes de ce type. Cependant, l'avantage de ce type de turbine est leur insensibilité au sens de l'écoulement, ce qui ne contraint pas d'orienter la turbine suivant les changements de direction de l'écoulement. Comme pour les turbines à écoulement libre, la vitesse de rotation est contrôlée en fonction de la vitesse du courant incident pour maximiser la performance. La puissance récupérée sur l'arbre est convertie directement par une génératrice, qui peut être partagée par plusieurs turbines empilées. (T. Jaquier, 2011)



**Figure I-3-Hydroliennes à axe vertical** (Mamadou DANSOKO 2014)

*c-Hydrolienne à aile battante ou oscillante*

La technologie à aile battante (Fig. 1-4) est généralement un trépied fixé sur le fond marin dont les pales font face aux courants. Les oscillations du bras entraînent le pompage du fluide pour générer de l'énergie électrique. Le principal avantage de ce système est l'absence quasi-totale du risque de cavitation dû à la forme des pales. Le pompage du fluide alimente un moteur hydraulique qui est couplé au générateur électrique, par conséquent, l'inconvénient d'un tel système est qu'en plus du générateur il faut obligatoirement un moteur hydraulique. (Mamadou DANSOKO 2014)



**Figure –I .4. Hydrolienne à aile battante ou oscillante** (Mamadou DANSOKO 2014)

*d-Hydrolienne utilisant des roues à aubes flottantes*

Les hydroliennes utilisant une roue à aubes flottantes sont très proches de la forme conventionnelle des moulins à eaux. À mi immergées, elles sont équipées d'un cylindre étanche qui tourne sous l'effet des courants. Ce mouvement entraîne un générateur électrique qui peut être placé soit sur le côté soit à l'intérieur du cylindre. L'atout principal de cette hydrolienne est sa simplicité, son faible coût et sa facilité de maintenance par rapport aux hydroliennes totalement immergées. Le mouvement des eaux de surface est lié en partie au vent, ce qui fait que cette forme d'énergie est aléatoire et son intégration au réseau devient plus délicate que celle des hydroliennes totalement immergées. De plus cette technologie est moins acceptée car elle gêne la navigation et la pêche et présente des risques en cas de coupure des amarres. (Mamadou Dansoko 2014)

## **II-2-4-2 Classification suivant le mode de récupération**

### *a- Mode libre*

La turbine est placée dans l'environnement marin, et récupère son énergie cinétique sans l'intervention d'aucun autre dispositif. C'est le cas des technologies citées dans la première classification.

### *b- Mode canalisé Turbines L'effet Venturi*

Ces hydroliennes exploitent l'énergie marine suivant « l'effet venturi », c'est-à-dire l'accélération d'un fluide dans une conduite dont le diamètre se rétrécit (lunarenergy.co.uk Mai 2010). Ainsi une petite turbine peut être utilisée pour produire une quantité plus grande d'énergie. Les prototypes déjà installés utilisent une turbine hydrolienne à axe horizontale. Ce concept a déjà été utilisé pour la propulsion des navires. Certains prototypes sont capables de fonctionner bi directionnellement et disposent d'un système permettant de faire sortir la turbine de la conduite, minimisant ainsi les difficultés d'entretien

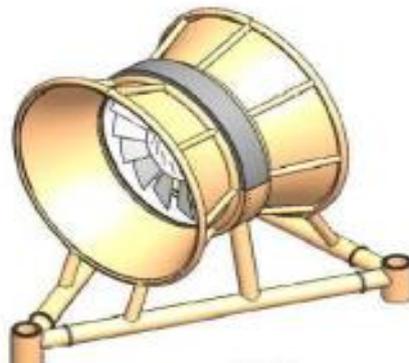


Figure –I.5. Effet Venturi (Mamadou DANSOKO 2014)

## **I-3-Avantages et inconvénients respectifs**

### **I-3-1- Avantages**

- *Disponibilité continue.*

Les courants marins se déplacent de façon incessante tout au long de la journée, ce qui permet de fournir une capacité constante de production d'électricité

- *Pas de pollution*

En tirant parti des seuls courants marins, l'énergie hydrolienne ne crée pas d'émissions de gaz à effet de serre ou de polluants pour l'eau. En outre, elle ne génère pas de bruit ni de nuisance particulière.

- *Énergie renouvelable*

Aucune ressource matérielle n'est utilisée ou modifiée dans la production de l'énergie hydrolienne, ce qui en fait une forme d'énergie inépuisable.

- *Impact visuel minimal*

En général, les dispositifs du système sont complètement immergés dans l'eau, bien au large. Cela réduit la défiguration du paysage qui a été associée aux éoliennes offshore.

- *Rendement*

L'énergie hydrolienne convertit environ 80% de l'énergie cinétique en électricité, par opposition au charbon et au pétrole qui ne convertissent que 30% de l'énergie qu'ils contiennent.

***I-3-2- Inconvénients***

- *Pannes et entretien du dispositif*

De fortes tempêtes océaniques ainsi que la corrosion de l'eau salée, mais également la présence d'algues « encroûtant es » autour des hélices, tout cela peut endommager les appareils. Des travaux de maintenance sous l'eau doivent être effectués de façon régulière.

- *Impact sur la vie marine*

Certains poissons pourraient être blessés par les lames des turbines ouvertes. La fixation au sol des hydroliennes pourrait également perturber l'habitat de différentes plantes et vies sous-marines.

- *Coûts initiaux élevés*

Le temps d'amortissement des coûts d'installation des hydroliennes et des lignes électriques sous-marines pourrait s'avérer très long. Un investissement prohibitif qui dissuadera plus d'une entreprise. (Serge Baillargeon 2015)

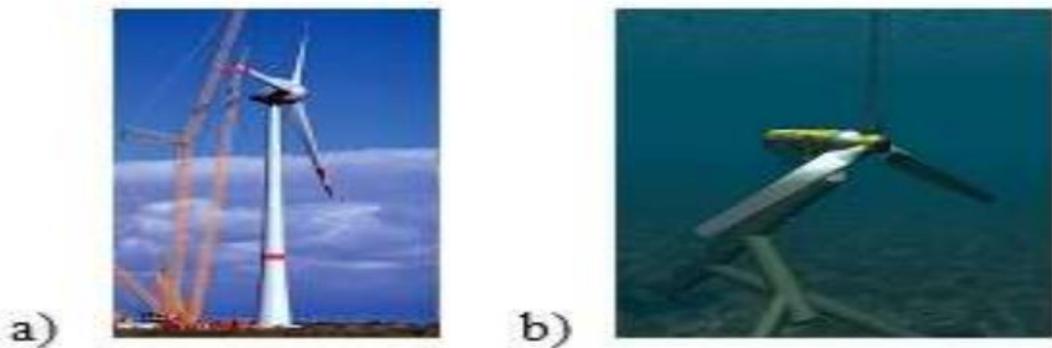
***I-4 -Comparaison entre les hydrolienne et les éoliennes***

L'utilisation des turbines dans l'eau plutôt que dans l'air a un effet sur le design et le régime de fonctionnement. La différence vient du changement de masse volumique et de viscosité dynamique, ainsi que les plages de vitesse typiques dans lesquelles fonctionnent ces systèmes. La performance d'un convertisseur hydro- ou aéro-cinétique est généralement défini comme un rapport entre la puissance réelle récupérée par le système mécanique et le flux de puissance cinétique passant par la surface égale à la section apparente de la turbine.

Pour deux designs de turbine, l'un dans l'air, l'autre dans l'eau, pour une envergure égale et pour une même performance, le rapport entre les puissances extraites est

$$\frac{P_{\text{eau}}}{P_{\text{air}}} = \frac{U_{\text{eau}} \rho_{\text{eau}}^3}{U_{\text{air}} \rho_{\text{air}}^3} \approx 8 \dots\dots\dots \text{I-1}$$

A puissance équivalente, on peut également envisager une surface de la turbine 8 fois plus petite, c'est à dire un rayon  $\approx 3$  fois plus petit. Au niveau logistique de fabrication, de transport, et de coût des matériaux cet avantage est très important. La force de trainée subie par la machine est proportionnelle au flux d'énergie cinétique, est donc environ 40 fois plus importante dans l'eau. Les forces centrifuges vues par les pales sont proportionnelles (Guillaume mercier 2006)



**Figure -I.6. Eolienne Enercon E126, b) hydrolienne Hammerfest Storm à flux axial de même puissance**

(MAÎTRE Thierry 2015).

Dans le cadre d'une exploitation éolienne, les turbines à flux transverse sont souvent associées à trois inconvénients qui leur ont fait préférer les turbines à flux axial, actuellement répandues pour les parcs à grande puissance, à la fois sur les sites terrestres et off-shore. Ainsi, les turbines à flux transverse historiquement mises en œuvre dans un contexte d'exploitation éolienne ne sont pas auto-démarrant, mécaniquement fragiles car soumises à de fortes vibrations, et enfin leur rendement est plus faible que les turbines à flux axial. Aucun de ces désavantages ne subsiste lors d'un fonctionnement hydrolienne. Pour éliminer les deux premiers, il est possible d'empiler des turbines déphasées et/ou de donner aux pales un dessin approprié qui assure notamment l'auto démarre conjointement à l'uniformisation du couple. Alliée à cette dernière propriété, l'immersion dans l'eau diminue drastiquement les amplitudes des vibrations à cause de l'augmentation importante de l'amortissement structurel. Concernant le rendement, les développements réalisés récemment sur les turbines à flux

transverse ont permis de rattraper le retard et d'obtenir des performances comparables à celles des turbines à flux axial. (T. Jaquier, 2011)

### ***I-5- Hydrolienne et ouvrages hydroélectriques***

Les installations hydroélectriques utilisées dans la plupart des pays du monde, telles que les barrages, nécessitent de grands travaux de génie civil, ce qui les rend très coûteux, représentant parfois 90% du coût total de l'installation. Ces barrages sont généralement équipés de centrales hydroélectriques ou de stations fluviales. Le rôle des centrales hydroélectriques est de produire de l'électricité en grandes quantités à faible coût à long terme. Cependant, il y a quelques obstacles que nous pouvons rencontrer après la construction de centrales hydroélectriques, vous devriez savoir :

#### ***- Impacts de la construction hydraulique sur l'environnement***

La construction d'une centrale hydraulique peut avoir un effet indésirable pour l'environnement dans lequel elle est implantée. En effet, construire un barrage en plein milieu d'un cours d'eau nécessite une intervention humaine importante qui trouble l'écosystème naturel. Par ailleurs, la centrale hydraulique nécessite de construire des réseaux de lignes électriques à proximité de la production. Ces constructions peuvent avoir un impact au niveau du paysage et du coût global de l'installation, intégrant les nouvelles routes à construire et les poteaux de soutien des fils électriques. (Adeline .M. 2017)

#### ***- Risque du manque d'eau***

Le sous-jacent de l'énergie hydraulique étant l'eau, il est clair qu'une éventuelle sécheresse peut avoir des impacts fortement négatifs sur l'ensemble de la production. Ainsi, même si cette énergie est particulièrement maîtrisable, il n'en demeure pas moins que le risque de sécheresse est peu planifiable et que ce dernier peut engendrer un arrêt total de la production d'énergie et perturber de manière importante le réseau énergétique du pays.(Adeline.M. 2017)

#### ***- Disponibilité de site***

L'énergie hydraulique se base sur la nécessité d'avoir du relief pour que l'intensité de l'eau soit importante. De fait, cette production d'énergie nécessite de se situer sur des reliefs de type montagneux où les cours d'eau peuvent avoir des chutes importantes et où les courants maritimes sont particulièrement forts. La plupart des endroits exploitables par l'énergie hydraulique ont déjà été équipés. La possibilité d'augmenter de manière forte la part de

l'énergie hydraulique dans le mix énergétique mondial est donc peu probable dans les années à venir, limitant ainsi le potentiel de cette énergie propre. (Adeline .M. 2017)

Dans un contexte de demande croissante et de raréfaction des énergies fossiles, la terre ne pouvant plus répondre à tous nos besoins, l'exploitation des courants marins offre un potentiel en adéquation avec les nouveaux objectifs de développement durable et de transfert d'énergie. (Pierre Marnier 2016)

L'énergie marémotrice suggère les débuts d'une production stable et prévisible de l'énergie hydraulique, à la fois dans la marée montante, à travers une turbine réversible. La technologie est prometteuse compte tenu du faible coût environnemental (absence d'émissions de CO<sub>2</sub>), de la meilleure performance de ses installations (plus rentable que les éoliennes par exemple) et de la production plus stable et plus stable. Ici, la régularité des courants et des marées est comparée aux énergies renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne, qui ont été largement développées aujourd'hui, mais qui restent confrontées aux aléas climatiques et aux contraintes technologiques liées au stockage de l'électricité. (Pierre Marnier 2016)

D'autre part, si les coûts d'investissement et d'exploitation associés au milieu marin sont plus élevés, l'impact environnemental des turbines sera minime (Pierre Marnier 2016)

Ainsi, nous pouvons dire que le hydroliennes n'est pas une grande centrale hydroélectrique

Mais cela nous fournit une énergie énorme et renouvelable et une concurrence pour les installations hydrauliques traditionnelles.

### ***1-6-Perspectives prometteuses pour les hydroliennes***

Le déplacement des masses d'eau dû aux marées, aux vents, aux différences de températures peut être exploité pour produire de l'électricité. Le principe : l'énergie cinétique des courants marins est captée par une hydrolienne, avant d'être transformée en énergie électrique via un alternateur. Constituée de grandes hélices, l'hydrolienne peut être placée horizontalement ou verticalement sous l'eau (fixée sur le fond de la mer par 20 ou 40 m de fond ou suspendue à une structure flottante), entre deux eaux ou encore à la surface.

Si les courants marins sont 4 à 5 fois moins rapides que le vent, la puissance électrique d'une hydrolienne est beaucoup plus importante que celle des éoliennes de même dimension : la densité de l'eau de mer est 800 fois plus élevée que celle de l'air. Les hydroliennes sont donc nettement moins imposantes que les éoliennes terrestres.

L'intérêt de cette technologie est double : les courants marins sont importants et leurs mouvements sont prévisibles. La production d'électricité à partir de cette ressource peut donc être estimée avec précision. La grande fluctuation des courants marins destine néanmoins l'électricité produite à de la "semi-base" (fonctionne entre 3 .000 et 5.000 heures par an)

### ***I-7- Puissance exploitable par les hydroliennes***

L'énergie produite par une hydrolienne est aisément prédictible. La formule simplifiée suivante donne une idée de la puissance approximative d'une hydrolienne, sans distinction de ses qualités techniques

$$P_{fluide} = 50\pi \times D^2 \times V^3 \quad \text{ou} \quad P_{fluide} = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{I-2})$$

Avec :

$P_{fluide}$  : Puissance du fluide.

$\rho$ : masse volumique du fluide.

S : Section égale au maître couple d'une hydrolienne en l'absence de celle-ci

D : est le diamètre du rotor

V : la vitesse du courant en m/s.

La puissance de l'hydrolienne est une fraction de l'énergie cinétique:

$$P = C_p \cdot E \quad (\text{I-3})$$

avec

$C_p$  : coefficient de performance de l'hydrolienne

On obtient :

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{I-4})$$

Le coefficient de performance  $C_p$  dépend de la qualité de réalisation du capteur d'énergie, par exemple le rotor de l'hydrolienne. On démontre (théorie de Betz) que dans une profondeur d'eau infinie,  $C_p$  est égal au maximum à la limite de Betz :  $16/27 = 0,59$ . Cette théorie est fréquemment utilisée pour les éoliennes. Sans prétendre expliquer ici cette théorie, il suffit de considérer que le fluide qui entre dans le rotor d'un côté, doit en ressortir de l'autre

côté. Le fluide sortant possède une vitesse non nulle, donc une énergie cinétique résiduelle qui n'a pas été soustraite par le rotor.

En fait, dans le cas des hydroliennes, la profondeur d'eau n'est pas infinie, si bien que la théorie doit être révisée. La théorie détaillée sort du cadre de cette présentation. Les rotors réels des hydroliennes ont un  $C_p$  voisin de 0,40 à 0,45. (Jacques Ruer - Mars 2016)

La loi de Betz montre que le rendement théorique maximum d'une éolienne ou d'une hydrolienne est égal à 60% de l'énergie cinétique du fluide qui les traverse. En raison de la masse volumique de l'eau 850 fois supérieure à celle de l'air, les hydroliennes sont donc 3 à 4 fois plus compactes que les éoliennes.

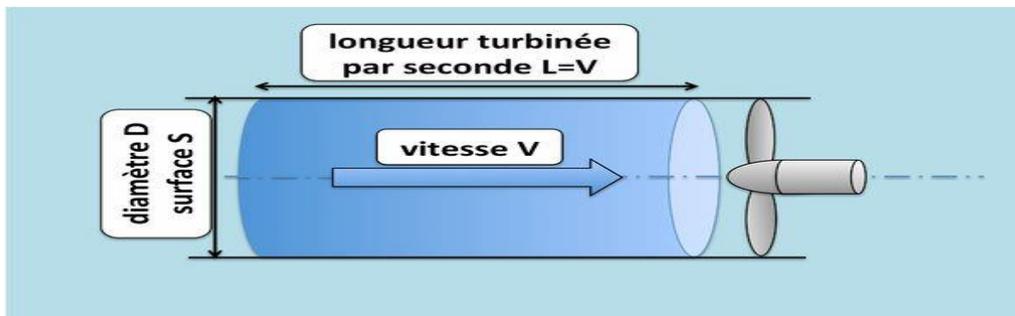


Figure -I.7. Schéma du principe de turbinage par hydrolienne

La figure 1-8 montre la relation entre la vitesse du courant et la puissance électrique pour une hydrolienne de 200 kW. Lorsque le courant est plus rapide que la vitesse nominale prise en compte pour le dimensionnement de la machine, la puissance est bridée à la valeur maximale. Ceci résulte du fait que le raccordement électrique est prévu pour une puissance donnée, qu'il n'est pas possible dépasser. (Jacques Ruer - Mars 2016)

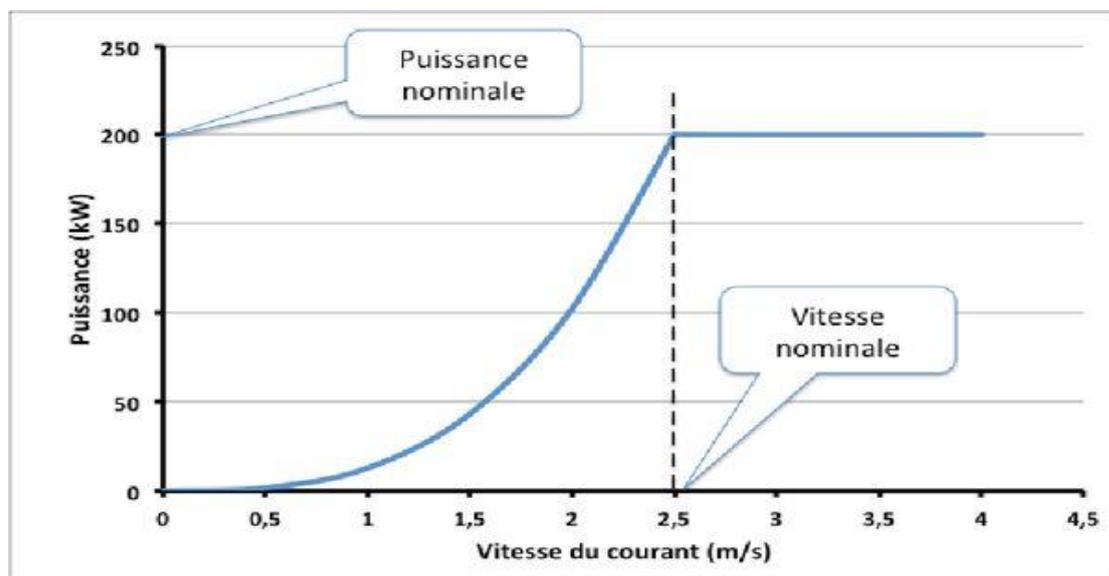


Figure -I.8. Relation entre la vitesse du courant et la puissance électrique pour une hydrolienne de 200 kW

Le fait que la puissance soit proportionnelle au cube de la vitesse du courant entraîne beaucoup de conséquences dans la conception des hydroliennes et la sélection des sites propices à l'exploitation de cette forme d'énergie. (Jacques Ruer - Mars 2016)

Imaginons pour fixer les idées, qu'on désire obtenir une puissance électrique de 200 kW grâce à une hydrolienne. Le tableau suivant indique en fonction de la vitesse maximale du courant sur divers sites potentiels le diamètre du rotor. (Jacques Ruer - Mars 2016)

Un autre paramètre qui peut influencer sur le rendement de l'hydrolienne correspond à la distance du sommet de l'hydrolienne avec la surface libre. Une partie du flux contourne la machine par le dessus en gonflant localement la surface libre. Ce phénomène constitue une perte de puissance pour l'hydrolienne et peut être limité en respectant une certaine distance avec la surface, de l'ordre du demi-mètre. (T. Jaquier, 2011)

### ***1-8- Orientation et le Profil de l'écoulement***

Pour extraire efficacement l'énergie d'un courant, une hydrolienne doit être alignée avec celui-ci. Si ce n'est pas le cas, on dit alors que la turbine forme un angle de lacet  $\zeta$  (Déviation d'angle) avec l'écoulement tel qu'illustre à la Figure, ce qui diminuera ses performances. De plus, cet angle avec le courant engendre un déséquilibre au niveau de l'extraction de l'énergie. Le chargement hydrodynamique est alors affecté.

Toutefois, la ressource hydrolienne possède l'avantage d'avoir une direction n'altère relativement constante par rapport au vent. En effet, à moins d'une modification du lit d'un cours d'eau, le courant d'une rivière s'écoulera en moyenne dans la même direction et suivra les méandres de son canal.

Pour ce qui est des marées, il y a certainement un changement marqué du régime entre le flux (marée montante ou *flood Tide*) et le reflux (marée descendante ou marée montante), mais ceux-ci peuvent malgré tout, mais ces deux composants peuvent rester dans deux directions principales relativement stables.

De plus les marées sont généralement symétriques, ce qui implique que les axes du flux et du reflux sont souvent confondus. Ceci signifie que l'hydrolienne peut être simplement renversée entre deux marées en pivotant uniquement les pales ou les ailes de 180°. Pour ces raisons, les hydroliennes sont fréquemment conçues sans mécanisme d'alignement afin de diminuer leur coût et d'augmenter leur fiabilité. Les hydroliennes sont alors unidirectionnelles en rivière et bidirectionnelles dans les courants de marée. (Christian Perron, 2015)

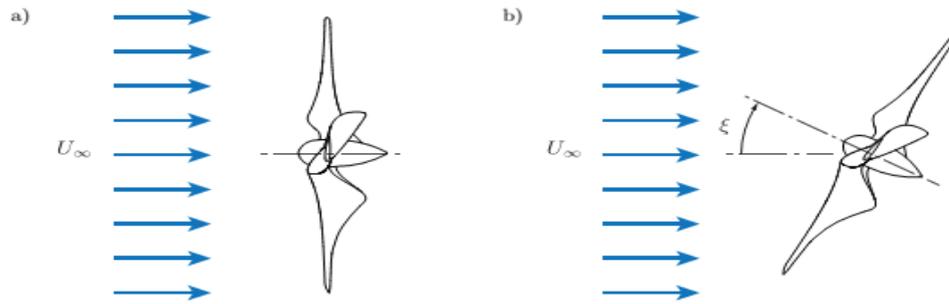


Figure –I.9. Vue en plongée d’une hydrolienne alignée (a) et d’*d*ésalignée (b) avec l’écoulement. Dans le cas présent, l’angle de lacet  $\xi = 30^\circ$ .

### I-8.1. Profil de vitesse

Au sein d’un courant marin, il est admis que la vitesse du courant n’est pas uniforme et varie à travers la hauteur du canal. Ceci est principalement dû à la présence du fond marin qui exerce un cisaillement sur l’écoulement. Il en résulte que la vitesse est minimum en profondeur et atteint un maximum près de la surface de l’eau. Un profil de vitesse cisaille est ainsi présent et en pratique, celui-ci est typiquement approxime par une loi en puissance telle que :

$$U(y) = U_0 \left( \frac{y}{y_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (I-5)$$

Ou  $U$  est la vitesse de l’écoulement,  $y$  est la hauteur par rapport au fond,  $n$  est le coefficient du profil et  $U_0$  est la vitesse de référence à la hauteur  $y_0$ . Des exemples de profil de vitesse en loi de puissance sont d’ailleurs illustres à la Figure 1-10. (Christian Perron, 2015)

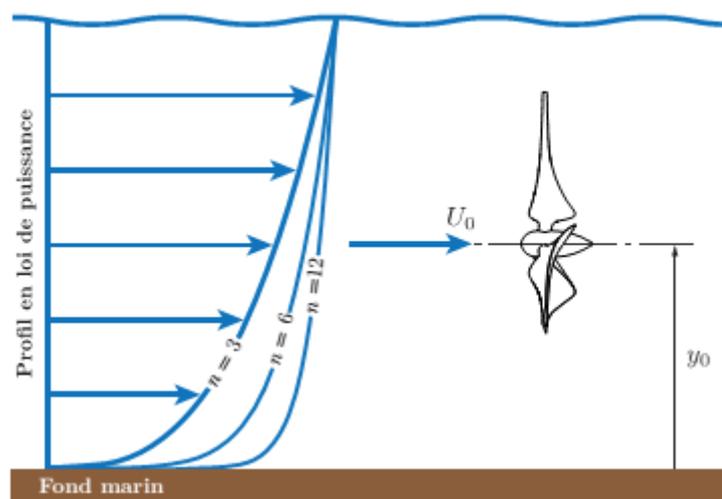


Figure –I.10. Schéma d’un profil de vitesse en loi de puissance tel que retrouve sur un site hydrolienne.

## ***1-9- Hydroliennes et cours d'eau***

### ***1-9-1- Les canaux hydrauliques***

Canal hydraulique pédagogique à surface libre à pente variable de 5 mètres de longueur permettant d'étudier les principes sur les écoulements uniformes dans un canal à surface libre avec possibilité de faire varier la pente du canal, d'étudier les ressauts hydrauliques et les écoulements au dessus d'un déversoir à seuil épais. De nombreux accessoires sont disponibles pour être utilisés avec le canal.

Les canaux hydrauliques représentent un choix idéal pour l'implantation des hydroliennes, ils constituent une ressource potentielle importante pour les hydroliennes.

- Les canaux étant pour la plupart des ouvrages bétonnés à géométrie simple, constante et de faible envergure, on y trouve souvent des vitesses d'écoulement régulières et importantes (typiquement de 1 à 3,5 m/s).
- L'accès et donc l'installation sont facilités grâce à la section régulière et la proximité des berges et des postes de raccordement électrique.
- Les canaux sont souvent utilisés par des exploitants hydroélectriques possédant déjà le droit d'eau et le savoir-faire nécessaire à l'exploitation et à la maintenance des systèmes.
- Les canaux sont généralement équipés de grilles, constituant ainsi des zones abritées des transports solides et des corps flottants. Cela permet d'éviter la mise en place de protections contre les débris et de réduire la fréquence de nettoyage des machines. (T. Jaquier, 2011)
- Enfin, les longues distances parcourues par certains canaux (plusieurs dizaines de kilomètres) permettent d'imaginer la mise en place de multiples sections d'exploitation, et donc d'un grand nombre d'hydroliennes.

Les canaux d'amenée des ouvrages hydrauliques, utilisés pour acheminer l'eau sur des distances importantes, sont particulièrement adaptés à l'installation d'hydroliennes. Les longueurs rencontrées sont de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres avec des écoulements quasiment uniformes pour chaque cycle d'exploitation. Néanmoins, des précautions doivent être prises pour maîtriser l'impact et ne pas perturber le fonctionnement des centrales avoisinantes. (T. Jaquier, 2011)

Les canaux de fuite ou de restitution, en aval des usines d'exploitation, ont généralement des longueurs plus petites que les canaux d'amenée mais peuvent présenter dans certains cas des vitesses d'écoulement importantes permettant d'implanter des hydroliennes.

Les canaux d'irrigation ont des sections relativement modestes mais peuvent présenter des vitesses d'écoulement et des longueurs intéressantes pour placer des petites hydroliennes. Ils présentent l'avantage d'avoir un débit garanti une bonne période de l'année. (T. Jaquier, 2011)

### ***I-9.2. Les fleuves et rivières***

Les conditions nécessaires pour installer des hydroliennes en fleuves et rivières sont une vitesse supérieure à 1,5 m/s et une lame d'eau supérieure à un mètre. Pour bénéficier de l'effet de série (production d'énergie significative et réduction des coûts de fabrication), l'objectif est d'installer des parcs de plusieurs machines, parfois plusieurs centaines de machines et par conséquent de privilégier les fleuves et rivières avec des sections et débits importants. Pour quantifier le débit, l'analyse des modules est une bonne approximation. Le module correspond au débit moyen inter annuel, c'est à dire à la synthèse des débits moyens annuels d'un cours d'eau sur une période de référence, typiquement une dizaine d'année. Pour les hydroliennes, les fleuves et rivières avec des débits supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/s sont considérés comme les plus intéressants.

Bien entendu, même si les grands fleuves semblent être les plus intéressants, de nombreux cours d'eau avec des débits inférieurs à 100 m<sup>3</sup>/s sont compatibles avec l'installation d'hydroliennes.

C'est le cas notamment lorsque le lit mineur se rétrécit suffisamment à certains endroits pour créer de la vitesse et un tirant d'eau supérieur à un mètre. (T. Jaquier, 2011)

### ***I-9.3. Les estuaires***

Les estuaires représentent une variante très intéressante pour les hydroliennes car les puissants flux, combinant les écoulements fluviaux et les courants de marée, ainsi que les grandes sections traversées, permettent d'installer des parcs très conséquents.

Un estuaire est constitué par une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant. (D.W. Pritchard, 1967). Il est intéressant de remarquer que dans cette définition le mot « marée » n'apparaît pas, alors que c'est pourtant elle qui est le moteur principal de son fonctionnement. C'est l'énergie introduite par la marée qui façonne l'intérieur de l'estuaire le rendant évasé. En effet, dans tous les estuaires qui n'ont pas été aménagés par l'homme, la section mouillée croît d'une façon exponentielle de l'amont vers l'aval. (T. Jaquier, 2011)

Le comportement hydrodynamique des estuaires résulte donc de la superposition de deux types de phénomènes, les débits des affluents et la marée. A la force du fleuve s'oppose ou se conjugue, au cours de la marée, la puissance du flot ou du jusant. Au cours du cycle lunaire (28 jours), l'amplitude de la marée, caractérisée par son coefficient, varie fortement; il en résulte une alternance de vives eaux et de mortes eaux. Des écarts importants peuvent exister entre la crue et l'étiage, particulièrement dans les cours d'eau qui ont été peu aménagés par des barrages. En vives eaux, l'amplitude maximale aux embouchures varie entre 5 et 7 mètres selon l'estuaire considéré. (T. Jaquier, 2011)

C'est la pénétration de la marée dynamique qui fixe la limite amont de l'estuaire. La marée parcourt de grandes distances : entre 100 et 200 km dans les grands estuaires, quelques dizaines de kilomètres pour les petits. Au-delà, on retrouve les « eaux issues du drainage du bassin versant ». Ces eaux servent de référence pour définir la qualité des eaux estuariennes. La dispersion introduite par le mouvement périodique des eaux vers l'amont et vers l'aval fait que l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce. Apparaissent ainsi les nécessaires notions de mélange et de gradient de salinité. (T. Jaquier, 2011)

L'ampleur et les caractéristiques morfo-dynamiques de chaque estuaire dépendent d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels son bassin versant (taille, qualité hydrologique et géologique), la zone géologique de son implantation, les aménagements effectués (ports, digues, barrages, dragages, entretiens des chenaux), etc. De ce fait, chaque estuaire présente des caractéristiques qui lui sont propres. (T. Jaquier, 2011)

### ***1-10- Perte de charge engendrée par une hydrolienne***

Lorsqu'elles sont implantées dans des canaux, les hydroliennes interagissent avec un système d'exploitation. Elles ne doivent donc pas engendrer de pertes de charge non restituables qui entraîneraient des pertes de production sur les exploitations environnantes. L'impact d'une hydrolienne sur la ligne d'eau est schématisé sur la figure 1-11.

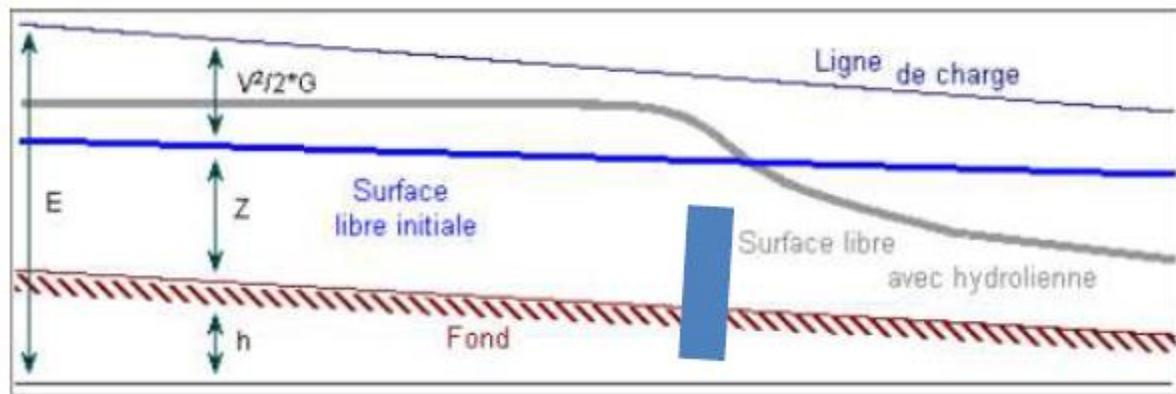


Figure I-11- Schéma de principe de l'impact d'une tour d'hydroliennes sur la ligne d'eau (T.Jaquier)

La perte de charge induite par l'hydrolienne se traduit principalement par une différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval. Ce phénomène revient donc à abaisser ponctuellement la hauteur de la ligne de charge. Cette singularité affecte la ligne de charge le long du canal, à l'amont et à l'aval de l'hydrolienne :

- A l'amont, l'impact se traduit par à une élévation de la ligne d'eau, d'une valeur nécessaire pour vaincre la perte de charge. Cependant, si l'on se place suffisamment loin à l'amont, cet effet est nul.

Il faut simplement que les berges du canal permettent cette élévation du niveau amont sans occasionner de débordement.

- A l'aval, l'impact se traduit par un abaissement de la ligne d'eau. La ligne de charge restera ensuite basse sur une longue distance à l'aval de la structure, avant que l'écoulement ne ré-accélère et que les frottements visqueux et les forces d'inertie tendent vers un rééquilibre de l'écoulement.

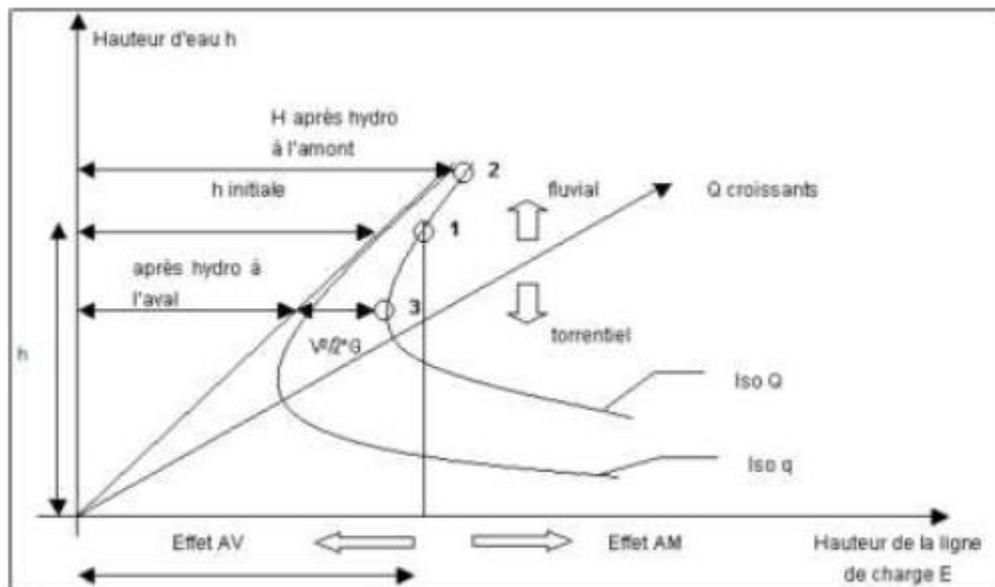
A débit constant, les effets de l'hydrolienne portent donc principalement sur la modification de l'écoulement à l'aval à condition que le rehaussement amont soit compatible avec la géométrie du canal. La figure 1-12 montre une représentation de l'équation d'énergie d'un écoulement à débit constant dans le plan hauteur d'eau / hauteur de ligne de charge. Les paramètres d'écoulement du canal sont représentés en hauteur d'eau, énergie cinétique, débit sous forme de courbes à débit constant (hyperboles). Les états de fonctionnement, avant et après mise en place d'une perte de charge, sont désignés par :

- Point 1 : Etat initial de l'écoulement avec pour un débit  $Q$  une hauteur d'eau équivalente à  $h$  initiale.

- Point 2 et 3 : Etats modifiés, état amont et aval, pour le même débit  $Q$ .

Le point 2 correspond au point de fonctionnement à l'amont de la perte de charge. Les effets sur l'écoulement par rapport au point 1 initial vont dans le sens des flèche « effet amont » et « fluvial » : la ligne de charge ainsi que le plan d'eau ont été élevés, la vitesse a diminué et, du fait de l'influence aval de l'hydrolienne, l'écoulement tend vers un fonctionnement plus fluvial.

Le point 3 correspond au point de fonctionnement à l'aval de la perte de charge. Les effets sur l'écoulement par rapport au point 1 initial vont dans le sens des flèches « effet aval » et « torrentiel » : la ligne de charge ainsi que le plan d'eau ont été diminués, la vitesse a augmenté en traversant la perte de charge et, du fait de l'influence amont de l'hydrolienne, l'écoulement tend vers un fonctionnement plus torrentiel. (T. Jaquier, 2011)



**Figure -12- Représentation de l'équation d'énergie d'un écoulement à débit constant et influence d'une perte de charge (Thomas Jaquier)**

Les calculs numériques montrent qu'à l'aval des hydroliennes, l'écoulement s'effectue à hauteur normale. Si le canal peut tolérer une légère augmentation locale du niveau d'eau, le débit maximum peut être conservé et la perte de production à l'aval est alors nulle. En revanche, si cette élévation locale n'est pas autorisée par la géométrie du canal ou les consignes d'exploitation, il en résultera une perte de production proportionnelle à la limitation en débit correspondante. La viabilité de l'implantation d'hydroliennes en canaux est donc fortement conditionnée par la possibilité d'augmenter légèrement et localement le niveau d'eau dans l'ouvrage. La longueur de restitution de la côte dépend de la vitesse d'écoulement et de la pente du canal. Plus la pente est forte, plus la longueur de restitution est faible.

## ***I-11. Conclusion***

Les hydroliennes sont l'avenir de l'humanité, étant l'une des sources d'énergie renouvelable et propre qui nécessite encore des études exploratoires et un vrai travail.

Le but d'une hydrolienne est de récupérer l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux pour faire tourner le rotor d'une turbine immergée. Il s'agit donc d'une transposition marine du rotor éolien qui récupère l'énergie cinétique du vent.

Il est économique en termes de construction et de traitement et assure la production d'énergie tout au long de l'année, contrairement à d'autres sources telles que les éoliennes. Les hydroliennes sont souvent partiellement ou complètement submergées, ce qui les rend plus protectrices que les facteurs externes pour assurer leur durabilité, mais l'environnement aquatique constitue un danger pour les animaux qui peuvent causer des dommages à la turbine qui doit être préservée. Par conséquent, ils ont besoin d'un système installé (en fonction de l'emplacement qu'ils hébergent), de la maintenance, du routage et de la gestion de l'alimentation.

Le principe de l'énergie hydrolienne est proche de celui des centrales hydrauliques au fil de l'eau, à la différence près que c'est le courant marin qui fait tourner les turbines des hydroliennes. Ces dernières fonctionnent donc dans les deux sens de la marée.

## Chapitre II

### Écoulement dans les canaux a section constant

#### II-1. INTRODUCTION

Les écoulements à surface libre sont des écoulements qui s'écoulent sous l'effet de la gravité en étant en contact partiellement avec un contenant (canal, rivière, conduite) et avec l'air dont la pression est généralement à surface libre. Contrairement aux écoulements en charge, la section d'écoulement devient une caractéristique de l'écoulement et non plus seulement de la géométrie du contenant.

Les écoulements à surface libre, dans les milieux naturels ou urbanisés, se produisent en général avec des conditions aux limites homogènes à cause de la distribution des rugosités du fond, fixes ou mobiles et/ou des déformations importantes de la surface libre en particulier pour des écoulements a faible tirant d'eau vis-à-vis des irrégularités du fond. Ces écoulements présentent ainsi des complexités qui constituent des limitations des modelés définis et mis en œuvre pour prédéterminer les écoulements instationnaires et l'effet du mobilité du fond sur la variation du régime de l'écoulement. (Fillali Siham 2010/2011)

#### II-2 DEFINITIONS ESSENTIELLES

##### II-1-1 MASSE VOLUMIQUE DE L'EAU

La masse volumique de l'eau correspond à la masse d'eau dans un litre d'eau, un mètre cube d'eau, un centimètre cube d'eau etc. La masse volumique ( $\rho$ ) d'une espèce chimique peut être calculée en divisant la masse ( $m$ ) de cette espèce chimique par le volume ( $v$ ) qu'elle occupe ce qui peut se traduire par la formule

$$\rho = m / v \dots\dots\dots II-1$$

##### II-1-2 POIDS VOLUMIQUE DE L'EAU

Le poids volumique de l'eau est note

$$\gamma_w = g \cdot \rho_w \dots\dots\dots II-2$$

### II-1-3 DEBIT DE L'ECOULEMENT

Le débit ( $q$ ) est le volume d'eau qui traverse la section verticalement sur l'axe du canal par unité de temps ce qui produit le ruissellement.

### II-1-4 VITESSE EN UN POINT DE L'ECOULEMENT

Par définition, la vitesse ( $v$ ) en un point de l'écoulement est celle de la particule qui passe en ce point au moment considéré.

### II-1-5 VITESSE MOYENNE

La vitesse moyenne est par définition  $v = q/s$ , c'est-à-dire  $v = \frac{\iint v \cdot ds}{\iint ds}$ ,  $ds$  désignant un élément de surface ( $s = \iint ds$ ).

### II-1-6 LIGNE DE COURANT

Une ligne de courant est une courbe tangente en chacun de ses points  $p$  à la vectrice vitesse en ce point. Son équation est donc  $v \cdot \lambda dp = 0$  (produit vectoriel). En écoulement non permanent, la vitesse  $v$  au point  $p$  évolue dans le temps ; les lignes de courant se déforment donc avec le temps. En écoulement permanent, les lignes de courant ne se déforment pas et constituent des trajectoires de particules d'eau. Le profil de la surface libre est une ligne de courant particulière.

### II-1-7 TUBE DE COURANT

Un tube de courant est le volume délimité par les lignes de courant qui s'appuient sur un contour fermé

### II-1-8 PRESSION HYDROSTATIQUE EN UN POINT

Dans un liquide au repos  $z + (p / \gamma_w)$  est constant.  $P$  désigne la pression appliquée à une facette passant par le point considéré et ne dépend pas de l'orientation de cette facette. Elle s'exprime en pascal (symbole  $pa$  ou  $n/m^2$ ). Dans ce qui suit,  $p$  désignera la pression relative (autrement dit, en surface d'un liquide  $p = 0$ ). A une profondeur  $h$  sous la surface libre,

$$P = \gamma_w \cdot h \dots\dots\dots \text{II-3}$$

II-1-9 CHARGE HYDRAULIQUE EN UN POINT D'UN LIQUIDE EN MOUVEMENT

L'appellation charge hydraulique désigne une énergie par unité de poids de liquide. Par définition, la charge en un point  $p$  d'une ligne de courant est la valeur  $h_p = z_p + (p / \gamma) + (v^2 / 2g)$  ou  $z_p$  est la cote du point,  $p$  la pression en ce point,  $v$  la vitesse au point  $p$ . Si  $\Delta z$  désigne la différence d'altitude entre le point  $p$  et la surface libre, la pression (relative) en  $p$  est  $p = \gamma w \cdot \Delta z$  (figure II-1). Si  $y_p$  désigne la distance du point  $p$  à la surface et si  $\alpha$  désigne l'angle du fond avec l'horizontale,  $y_p = \Delta z / \cos \alpha$  donc.  $P = \gamma w \cdot y_p / \cos \alpha$  dans les problèmes courants de rivières ou de canaux, la pente est très faible (quelques ‰ à quelques %) et  $\cos \alpha \approx 1$ . Par exemple, jusqu'à un angle de  $8^\circ$ , c'est à dire une pente de 14%, l'erreur n'est que de 1%. D'où :  $p = \gamma w \cdot y_p$ , comme pour un problème hydrostatique. Donc, en hydraulique à surface libre et pour une pente faible, la charge en un point vaut aussi :

$$H_p = z_p + y_p + (p / \gamma) + (v^2 / 2g) \quad (\text{WordPress 2018})$$

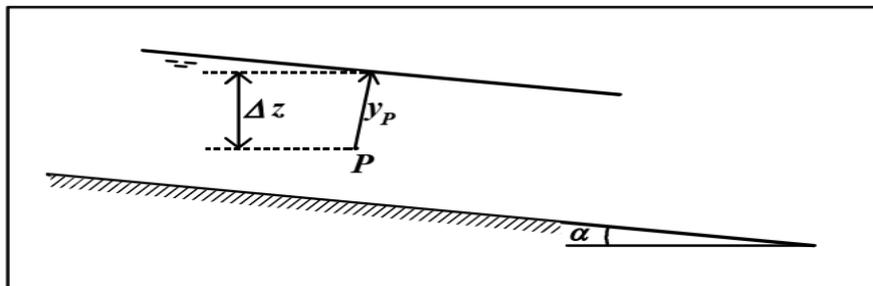


Figure II-1. Pression en un point  $p = \gamma w \cdot \Delta z$

II-1-10 CHARGE MOYENNE DANS UNE SECTION

En intégrant  $h_p = z_p + y_p + v^2 / 2g$  dans une section, il vient :  $h = z_f + y + \beta v^2 / 2g$ , ou  $z_f$  désigne la cote du fond et  $y$  le tirant d'eau pour la section. Le coefficient  $\beta$  vaut 1 si la répartition des vitesses dans la section est uniforme. Sa formulation est :  $\beta = (\int \int v^3 ds) / v^3 \cdot s$  en rivière,  $\beta$  est généralement compris entre 1 et 1,2. Par la suite, c'est cette charge moyenne que nous utiliserons. (WordPress 2018)

II-1-11 LIGNE PIEZOMETRIQUE

C'est par définition le lieu de  $z_p + p / \gamma w$  lorsque  $p$  décrit une ligne de courant. Or l'éloignement de  $p$  à la surface libre mesuré verticalement est  $p / \cos \alpha$ .  $\Gamma_w$  si la pente est faible, cet éloignement est pratiquement égal à :  $p / \gamma w$  (figure II-2)

La ligne piézométrique coïncide avec la surface libre dans un écoulement à surface libre à faible pente.

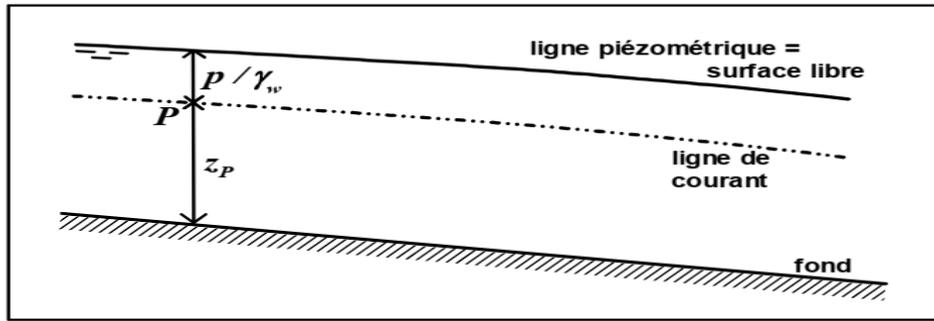


Figure II-2. Ligne piézométrique

II-1-12 LIGNE DE CHARGE MOYENNE

La ligne de charge moyenne est obtenue en reportant graphiquement  $v^2/2g$  au-dessus de la ligne piézométrique (figure II-3). Sur cette figure, le tirant d'eau est assimilé à la distance verticale entre le fond et la surface libre, toujours compte tenu de l'hypothèse de pente faible. Cette assimilation sera maintenue par la suite.

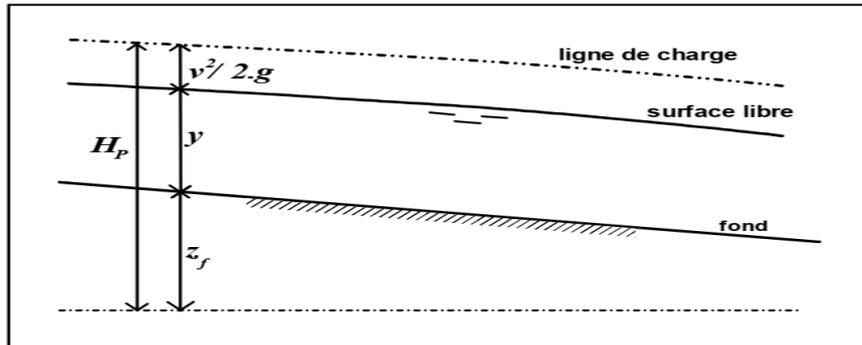


Figure II-3. Ligne de charge et ligne piézométrique

II-1-13 CHARGE SPECIFIQUE

La charge spécifique est la charge moyenne mesurée par rapport au fond du chenal :

$$H_s = h - z_f = (p / \gamma_w) + (\beta \cdot v^2 / 2g) \dots\dots\dots II-4$$

La pression hydrostatique vaut  $p = \gamma \cdot y \cdot \cos\alpha$  si la pente est faible,

$$P = \gamma_w \cdot y. \text{ D'où : } h_s = y + \beta \cdot v^2 / (2g) \dots\dots II-5$$

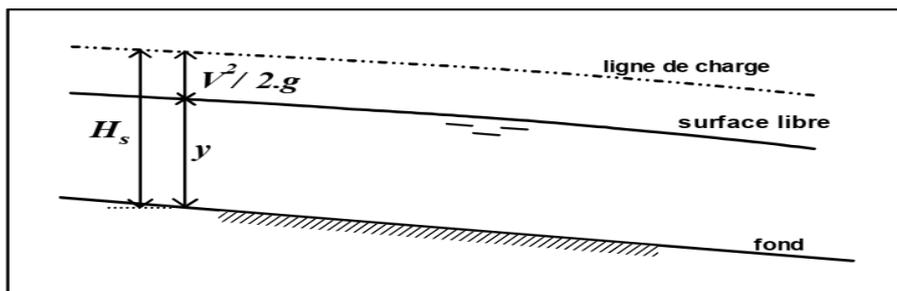


Figure II-4. Charge spécifique ( $\beta$  est ici suppose égal à 1)

### II-1-14 POUSSEE SUR UNE PAROI DU CANAL

L'eau exerce une poussée égale à celle qui existerait si l'eau était au repos. Sur un élément de section  $ds$ , la poussée est  $dp = p.ds$  avec  $p = \gamma w.y$

### II-1-15 FROTTEMENT SUR UNE PAROI DU CANAL

L'eau étant en mouvement, exerce aussi sur les parois du chenal une force de frottement habituellement notée :  $df.ds = \tau_0$  cf. Figure II-5  $\tau_0$  est la force de frottement par unité de surface ou contrainte tangentielle à la paroi. L'expression consacrée est celle de force tractrice. C'est un abus de langage puisque l'on devrait parler de tension. L'intérêt de cette notion de force tractrice apparaît plus clairement en examinant la condition de stabilité des grains qui constituent le fond ou les berges des rivières. (WordPress 2018)

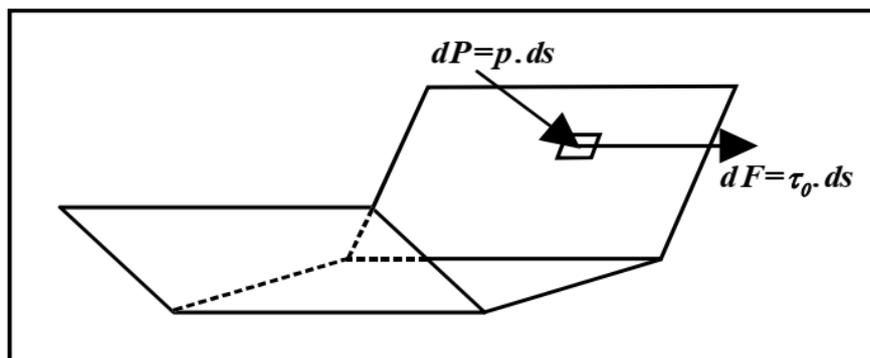


Figure II-5. Forces appliquées par l'eau sur les parois (L'une perpendiculaire, l'autre tangentielle)

## **II-2 LES DIFFERENTS TYPES DE CANAUX**

### II- 2-1-DEFINITION

On appelle canal un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique. L'étude hydraulique d'un canal se pose souvent aux ingénieurs sous la forme suivante :

Pour une pente longitudinale de fond, il faut évacuer un certain débit ; la forme et les dimensions du canal sont à déterminer. On distingue deux catégories de canaux :

- Les canaux naturels,
- Les canaux artificiels

### II -2-2- CANAUX NATURELS

Ce sont les cours d'eau qui existent naturellement sur (ou sous) terre ; tels que les ruisselets, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont généralement assez irrégulières. L'application de la théorie hydraulique ne donne que des résultats approximatifs obtenus moyennant certaines hypothèses. (Graf Walter .H .2009).

### II -2-3- CANAUX ARTIFICIELS

Ce sont des cours d'eau réalisés par l'homme sur (ou sous) terre tels que : les canaux découverts construits au ras du sol (canaux de navigation, d'adduction et d'évacuation, d'irrigation et de drainage) ou les canaux couverts dans lesquels les liquides ne remplissent pas toute la section (tunnels hydrauliques, aqueducs, drains, égouts). Les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières. L'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats satisfaisants. (Graf Walter .H .2009).

### II -2-4- GEOMETRIE DES CANAUX

La section transversale d'un canal est une section plane normale à la direction de l'écoulement. Un canal dont la section ne varie pas et dont la pente longitudinale et la rugosité restent constantes, la hauteur d'eau peuvent cependant varier, est appelé canal prismatique ; sinon, on l'appelle canal non prismatique. A part les éléments géométriques d'une section, l'étude hydraulique des canaux prend également en considération les pentes longitudinales du canal, en l'occurrence :

- La pente de fond du canal,  $i$  ou  $J$ ,
- La pente piézométrique ou pente de la surface libre,  $J_w$ .

La valeur de la pente de fond dépend essentiellement de la topographie et de la constitution du terrain. Cette pente, généralement faible, peut être exprimée par :

$$i = \operatorname{tg} \theta = \sin \theta$$

$\theta$  : l'inclinaison de la pente

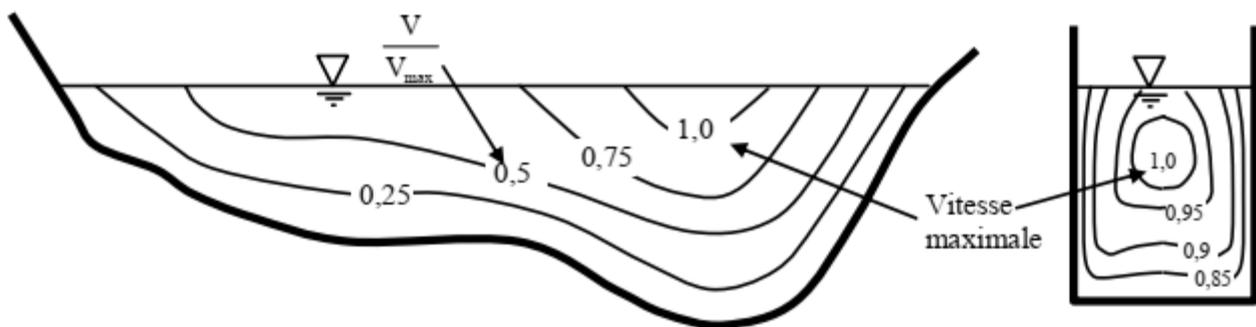
Le périmètre mouille,  $p$ , peut être composé d'un lit immobile (béton, roche) ou d'un lit mobile (granulat). (Graf Walter .H .2009).

## II-2-5- ECOULEMENT DANS LES CANAUX

Les écoulements dans les canaux naturels et artificiels sont des écoulements à surface libre. L'écoulement à surface libre est dû à la pente de fond du canal et non comme pour les conduites, à la différence de charge entre deux sections. (Graf Walter .H .2009).

## II-2-6-DISTRIBUTION DES VITESSES DANS UN CANAL

La distribution des vitesses dans une section transversale varie en fonction de la forme de la section et de la rugosité des parois. Les figures suivantes montrent la répartition des iso-vitesses dans le cas d'un régime turbulent. Dans certains cas, la vitesse peut-être maximale un peu au-dessous de la surface libre.



*Figure II-6. Distribution des vitesses dans un canal*

Comme pour les écoulements en charge, nous avons également un régime d'écoulement laminaire et turbulent. (L'écoulement laminaire est rare en hydraulique). (Jose Vasquez 2016)

## **II-3- GENERALITES SUR LES ECOULEMENTS**

### II-3-1- ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE

Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation, assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre. La surface libre est l'interface entre l'air et l'eau. La pression  $y$  est égale le plus souvent à la pression atmosphérique.

#### II-3-1-1-VARIABILITE DANS LE TEMPS

Le mouvement est permanent (ou stationnaire) si les vitesses  $u$  et la profondeur  $h$  restent invariables dans le temps en grandeur et en direction. Le mouvement est non-permanent dans le cas contraire.



Figure II-7. Écoulement permanent et non-permanent

Au sens strict, l'écoulement dans les canaux est rarement permanent. Néanmoins les variations temporelles sont, dans certains cas, suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme une succession de régime permanent. On peut alors définir ainsi le régime quasi-permanent.

II-3-1-2- VARIABILITE DANS L'ESPACE

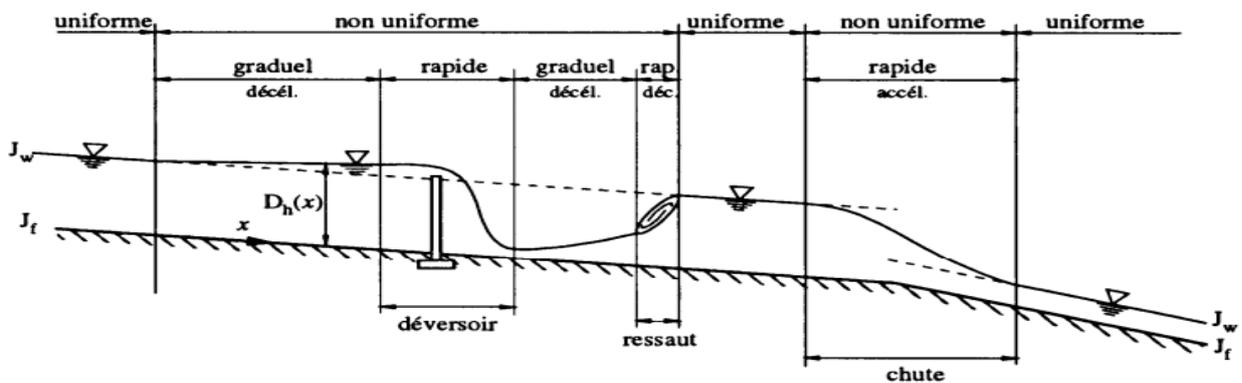


Figure II-8. Schéma des écoulements permanents, uniformes variés.

Le mouvement est uniforme si les paramètres caractérisant l'écoulement restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente du fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre.

Le mouvement est non-uniforme ou varie si les paramètres caractérisant l'écoulement changent d'une section à l'autre. La pente de la surface libre diffère de celle du fond

Un écoulement non-uniforme peut être accéléré ou décéléré suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement

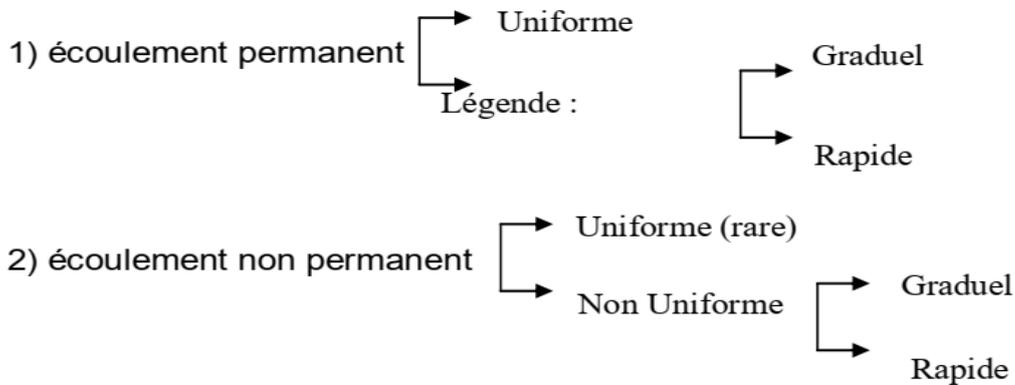
Lorsque le mouvement est graduellement varié, la profondeur ainsi que les autres paramètres varient lentement d'une section à l'autre.

Lorsque le mouvement est rapidement varié, les paramètres caractérisant l'écoulement changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un seuil, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque.

(Jose Vasquez 2016)

### II-3-1-3-LES DIFFERENTS TYPES D'ECOULEMENT

Les types d'écoulement qu'on rencontre en hydraulique peuvent être



## **II-4- LES DIFFERENTS REGIMES D'ECOULEMENT**

### II-4-1-REGIME PERMANENT

Le canal transporte un débit  $q$  constant dans le temps. Le tirant d'eau  $y$  en un point donné est donc aussi constant. En pratique, on peut calculer en régime permanent des canaux d'irrigation, des écoulements en rivière à l'étiage ou en régime moyen. Mais le calcul d'un écoulement en crue ne peut pas être abordé par le régime permanent.

Le régime permanent peut être uniforme ou varie selon la géométrie du canal.

### II-4-2-REGIME TRANSITOIRE

Le débit varie en fonction du temps, et il en va donc de même du tirant d'eau en chaque point du cours d'eau. Le calcul du laminage d'une crue par un barrage est typiquement un problème de calcul transitoire, de même le calcul d'un écoulement de rivière en crue, surtout lorsque le lit majeur est sollicité. ( *Dégoutte.G. 2002* )

## **II-5- EQUATIONS DE REGIMES D'ECOULEMENT**

### II-5-1-NOMBRE DE FROUDE

Le nombre de Froude est un nombre sans dimension dont le carré représente le rapport de l'énergie cinétique du liquide en mouvement à l'énergie potentielle de la pesanteur. Il a un rôle tout à fait fondamental pour caractériser les écoulements. ( *Dégoutte.G. 2002*)

Il s'écrit avec la formule suivante :

$$F = \sqrt{\frac{Q^2 B}{g S^3}} \dots\dots\dots \text{II-6}$$

Avec :

$Q$  : le débit évacue [m<sup>3</sup>/s]

$B$  : largeur au miroir [m]

$G$  : pesanteur [m/s<sup>2</sup>]

$S$  : section mouille [m<sup>2</sup>]

Lorsque

$F=1$ , le régime est dit critique donc  $y=y_c$

$F<1$  (ou lorsque  $y>y_c$ ) le régime est dit fluvial.

$F>1$  (ou lorsque  $y<y_c$ ) le régime est dit torrentiel

Pour un nombre de Froude =1, la hauteur d'eau à cet instant est dite hauteur critique à partir de laquelle le régime d'écoulement transite du fluvial au torrentiel et vice versa (figure II-9)

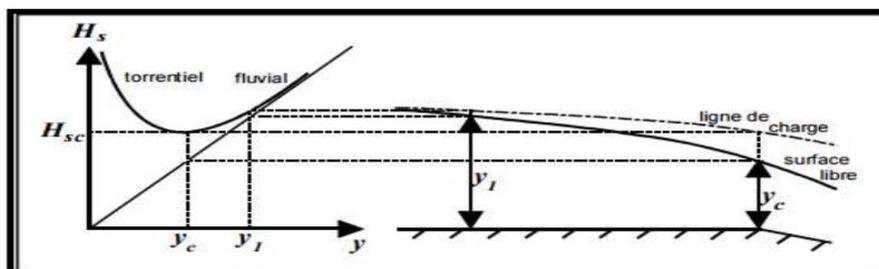


Figure II- 9. Relation charge spécifique-tirant d'eau. (Dégoutte)

## II-6- EQUATIONS DE L'HYDRAULIQUE FLUVIALE

### II-6-1-EQUATION DE CONTINUITE

L'équation de continuité considère 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  $\Delta t$ . 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  $q_1.\Delta t$  est égal au volume sortant  $q_2.\Delta t \Rightarrow q_1 = q_2$ .

- En écoulement permanent (uniforme ou non), le débit se propage en restant constant

Comme en outre 'y' est constant par définition, 's'est aussi constant. La vitesse moyenne  $v = q / s$  est aussi constante.

- En écoulement permanent uniforme, la section mouillée et la vitesse moyenne sont constantes le long du canal (*traite d'hydraulique a surface libre : G. dégoutte*)

Si  $q_1$  désigne le débit entrant dans le volume fictif, et  $q_2$  le débit sortant de ce même volume fictif, l'équation de continuité s'écrit tout simplement :

$$q_1 = q_2 \dots\dots\dots\text{II-7}$$

Ou encore

$$v_1 s_1 = v_2 s_2 \dots\dots\dots\text{II-8}$$

En régime transitoire, on traduit l'équation de continuité par le fait que tout volume entrant qui n'est pas évacué par le flux sortant se traduit par une augmentation de volume entre l'entrée et la sortie :

$$\frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots\text{II-9}$$

Arrêtons-nous un instant sur l'interprétation pratique de cette équation, pour démentir une fois pour toutes une idée reçue communément répandue, et fautive. Les seuils et barrages mobiles en rivière constituent certes un obstacle en rivière c'est même souvent leur raison d'être. Ils peuvent gêner les écoulements en les freinant et en les exhaussant, c'est indéniable et même souhaité lors de la conception. Mais en aucun cas, dès lors que le régime est stationnaire, ces ouvrages ne retiennent du débit. Le débit qui arrive à l'amont d'un tel ouvrage en régime stationnaire franchit l'ouvrage d'une manière ou d'une autre pour se retrouver intégralement à l'aval de l'ouvrage. Par contre, lors des phases transitoires d'élévation des ouvrages, le volume en amont se comporte comme un réservoir que le débit entrant remplit avant d'atteindre un nouveau état stationnaire et de sortir à nouveau intégralement à l'aval. (Bakhmeteff, 1932)

II-6-2- EQUATION DE BERNOULLI

L'équation de Bernoulli est la base théorique de la description des phénomènes physiques d'écoulement de liquides. Dans une adduction, l'énergie d'une particule d'eau est une combinaison stricte d'énergie potentielle, d'énergie cinétique et d'énergie de pression. Dans la nature, « rien ne se perd et rien ne se crée », par conséquent l'énergie d'une particule d'eau passant par le point 1 aura la

même énergie que lorsqu'elle passera par le point 2 ou par tout autre point de l'adduction. Sous forme d'équation, ce théorème peut s'écrire de la façon suivante :

Energie potentielle + énergie de pression + énergie cinétique = constante

Ou sous une forme plus élaborée :

$$\frac{V^2}{2} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{z} + \frac{\mathbf{p}}{\rho} = \text{constante} \dots \dots \dots \text{II-10}$$

Ou :

- $P$  : La pression en un point (en Pa ou  $\text{n/m}^2$ ).
- $\rho$  : La masse volumique en un point (en  $\text{kg/m}^3$ )
- $V$  : La vitesse du fluide en un point (en  $\text{m/s}$ ).
- $g$  : L'accélération de la pesanteur (en  $\text{n/kg}$  ou  $\text{m/s}^2$ )
- $z$  : L'altitude (en m)

La constante intervenant dans le second membre de l'équation n'est pas universelle mais propre à l'écoulement, il s'agit d'une constante le long de tout le domaine fluide (écoulement irrationnel), appelée charge. (Saad bénis 2007)

## II-7- ECOULEMENTS PERMANENTS UNIFORMES

### II-7-1- DEFINITION

L'écoulement uniforme et permanent se caractérise par une constance des paramètres hydrauliques. Ainsi la vitesse moyenne, le tirant d'eau et donc le débit restent invariables dans les différentes sections du canal le long de l'écoulement. Les lignes de courants sont rectilignes et parallèles et la pression verticale peut donc être considérée comme hydrostatique. La pente de fond, la pente de la surface libre et la pente de la ligne d'énergie sont parallèles.

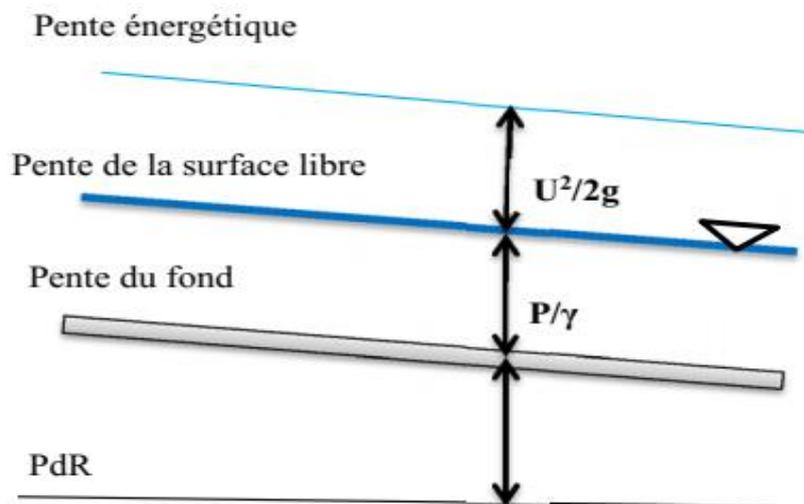


Figure II-10 Ecoulement uniforme et permanent.

Dans les écoulements à surface libre, il est commode de considérer la charge par rapport au fond du canal que l'on désigne par la charge spécifique.

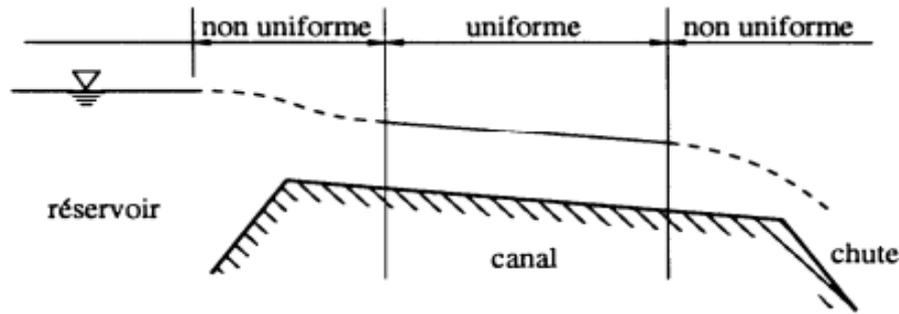


Figure II-11 Schéma des écoulements permanents, uniformes et non uniformes dans un canal.

Si on admet que la pente du fond du canal est presque constante et positive et que les caractéristiques de rugosité ne changent pas considérablement, un état d'équilibre peut apparaître entre les forces de pesanteur et les forces de frottement. La hauteur d'eau résultante s'appelle hauteur normale et ne dépend que du débit, du fluide, de la forme de la section ainsi que de la rugosité. Cette hauteur apparaît toujours après une distance importante ( $\approx 20$  à  $50$  fois le diamètre) des conditions amont et aval. L'écoulement véritablement uniforme est très rare dans les canaux. On ne l'observe que dans des canaux prismatiques très longs et situés loin des perturbations. On a donc vu que la pente du canal ( $i$ ), la pente de la surface libre ( $psl$ ), et la perte de charge ( $j$ ) par unité de poids et par unité de longueur de canal sont identiques : (Jose Vasquez. 1980)

➤  $i = psl = j$  et ceci pour des conditions fluviales ou torrentielles

## II-7-2-EQUATIONS DE L'ÉCOULEMENT UNIFORME

### II-7-2-1-FORMULES EMPIRIQUES

Plusieurs auteurs ont décrit l'écoulement uniforme et cela, de différentes façons. Les trois formules les plus utilisées sont celle de Chézy, de Bazin et de Manning.

#### II-7-2-1-1-FORMULE DE CHEZY

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. Supposons un bief élémentaire de longueur dans lequel l'écoulement est uniforme.

On doit à Chézy la première tentative retentissante, avec sa formule :

$$V = C \sqrt{Rh i} \dots\dots\dots \text{II-11}$$

Ou :

$v$  : est la vitesse moyenne (m/s),

$rh$  : le rayon hydraulique (m),

$i$  : la pente du fond (m/m)

$c$  : le coefficient empirique (m<sup>1/2</sup>/s), dit de Chézy, dépendant de la forme de la section et des parois.

*Coefficient de Bazin*

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

- Le coefficient  $c$  n'a pas été étudié systématiquement du point de vue pratique
- Ce coefficient s'avère dépendre du rayon hydraulique : pour les canaux plus petits, ou  $r$  est plus petit également, la vitesse moyenne diminue plus que ne l'annonce la formule de Chézy

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 s'écrit, en unités métriques. Pourtant, c'est Bazin qui établit une relation plus explicite du coefficient de Chézy :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{Rh}}} \dots\dots\dots \text{II-12}$$

$\gamma$  : est un paramètre représentatif de la rugosité du lit, variant de 0.06 pour un lit lisse (ciment) à 1.75 pour un lit de terre enherbée et de galets.

II-7-2-1-2-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.

$$C = \frac{1}{n} Rh^{\frac{1}{6}} \dots\dots\dots \text{II-13}$$

$C$  : est le coefficient de Chézy

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 manière monôme :

$$V = \frac{1}{n} (Rh^{\frac{2}{3}})(i^{\frac{1}{2}}) \dots\dots\dots \text{II-14}$$

II-7-2-1-3-FORMULE DE DARCY –WEISBACH

Parfois, pour les conduites d'égout, on utilise la forme de l'équation de darcy – Weisbach suivante :

$$v = \sqrt{\frac{8g rh i}{\lambda}} \dots\dots\dots \text{II-15}$$

Pour les sections de forme complexes, on procède à un découpage en sections plus simples et pour chaque sous-section on calcule, pour l'équation de Manning, un coefficient de débit  $k_i$  :

$$k_i = \frac{\alpha}{n_i} s_i r_{hi}^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots \text{II-16}$$

Ceci permet d'attribuer à chaque section un coefficient de frottement différent.

Le débit total s'écrit alors :

$$Q = \sum K_i \sqrt{I} \dots\dots\dots \text{II-17}$$

II-7-2-2-1- HAUTEUR NORMALE, PENTE CRITIQUE

Les conditions du régime uniforme ne se rencontrent que très rarement en nature, et Correspondent de fait plutôt à des ouvrages artificiels de canalisation des écoulements. Pour autant, la connaissance précise du régime uniforme grâce à la formule de Strickler nous permet de déterminer deux quantités que nous avons déjà évoquées lors de la définition des conventions, paramètres et régimes des écoulements de cours d'eau, la hauteur normale et la pente critique.

La hauteur normale est pour écoulement quelconque de débit  $Q$  donné, la hauteur d'eau  $h_N$  que l'on observerait si le régime était uniforme, c'est-à-dire sans influence ni de l'amont, ni de l'aval, comme si l'écoulement s'effectuait dans un canal uniforme de section identique à celle où la hauteur normale est calculée. (E. CRAUSSE, 1951).

Comme  $Q = VS$ , on a directement que  $h_N$  est telle que :

$$Q = KS(h_N)(Rh(h_N)^{\frac{2}{3}})(i^{\frac{1}{2}}) \dots\dots\dots \text{II-18}$$

D'autre part, nous avons vu qu'un écoulement donné pouvait être de régime fluvial, critique ou torrentiel selon que le nombre de Froude était inférieur, égal ou supérieur à 1. Mais il a été dit qu'en

nature, c'est la pente du lit qui détermine le régime du cours d'eau. La formule de Strickler nous fournit la relation qui nous manquait entre la pente du cours d'eau et la vitesse, de sorte qu'on écrive l'expression de la pente critique :

$$F^2 = \frac{BV^2}{gS} = 1 \Rightarrow Vc^2 = \frac{gSc}{Bc} \dots\dots\dots \text{II-19}$$

Or:  $Vc^2 = K^2 \left( Rhc^{\frac{4}{3}} \right) ic \dots\dots\dots \text{II-20}$

D'où :  $ic = \frac{gSc}{Bc K^2 (Rh)^{\frac{4}{3}}} \dots\dots\dots \text{II-21}$

Si pour un débit donné,

- la pente du cours d'eau est supérieure à cette pente critique le régime est torrentiel.
- Si elle est égale, le régime est critique
- si elle est inférieure, le régime est fluvial.

Evidemment, la pente du cours d'eau ne bougeant pas (hypothèse de fond fixe), c'est bien la pente critique qui est à recalculer pour ces comparaisons, en fonction du débit.

## **II-8- ECOULEMENTS PERMANENTS NON UNIFORMES**

### II-8 -1- DEFINITION

L'écoulement est non uniforme si les paramètres du canal tels que la vitesse, la hauteur, la rugosité, la section transversale changent d'une section à l'autre. Les changements peuvent être graduels ou lents (écoulement graduellement varié) ou rapides (brusquement varié). Il est à noter que si le canal est uniforme (axe rectiligne, pente et section transversale constantes, rugosité homogène) la non uniformité de l'écoulement se produit au voisinage d'une singularité (déversoir, chute d'eau....) (Carlier 1980).

On utilise le théorème de Bernoulli qui est le théorème de base de la mécanique des fluides pour l'étude des écoulements graduellement variés. Ce théorème repose sur le principe de la conservation de l'énergie, qui nous permet de comprendre les principes de base de l'écoulement graduellement varié. On peut classer l'écoulement non uniforme en deux grandes catégories, suivant que la vitesse croit ou décroît dans le sens de l'écoulement (accélééré, décélééré). (Saad bénis 2007)II-

### 8-2- ECOULEMENT BRUSQUEMENT VARIE

Dans l'écoulement brusquement variant, la vitesse et varient d'une manière sensible et brusque sur une courte distance l'exemple typique est celui du ressaut hydraulique qui se produite au

passage d'un écoulement rapide à un écoulement lent dans le canal de fuite d'une centrale hydroélectrique. Une importante manifestation de ce type d'écoulement est le ressaut hydraulique.

### II-8-2-1- LE RESSAUT HYDRAULIQUE

Est une surélévation brusque de la surface libre d'un courant survient lorsqu'un régime torrentiel devient fluvial. Sur une courte distance, des courbes de remous illustrant ce phénomène sont montrées sur la figure (II-12).

Le ressaut hydraulique peut se produire dans différentes circonstances ; par exemple au pied d'un barrage déversoir ou à l'aval d'un écoulement en-dessous d'une vanne de fond ou encore dans un canal à forte pente débouchant dans un écoulement fluvial. (Saad bénis 2007)

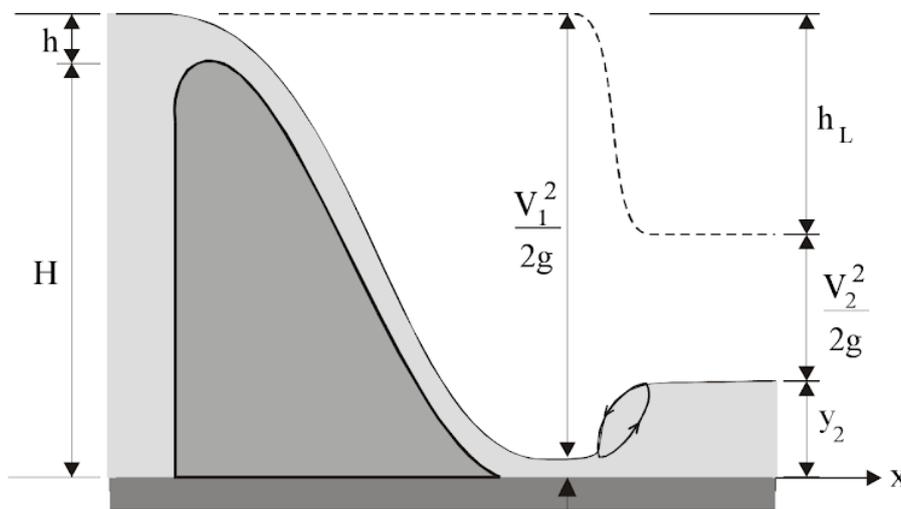


Figure II-12 ressaut hydraulique

### II-8-3- ECOULEMENT GRADUELLEMENT VARIE

#### II-8-3-1-DEFINITION

Les écoulements graduellement variés ce sont des écoulements non uniformes et permanents, dont les caractéristiques hydrauliques ne changent que très lentement d'une section à l'autre (varient très progressivement), c'est-à-dire que le débit reste constant dans le temps, les changements des sections d'écoulement généralement causés par des changements des pentes, produisent une différente trajectoire des filets liquides qui ne sont pas parallèles rendent l'écoulement non uniforme ; la surface libre et le fond du canal ne sont plus parallèles (voir fig. II-13). Les équations fondamentales pour l'étude de régime permanent sont les équations de continuité, théorème de Bernoulli qui permet de calculer la perte de charge unitaire,  $J$ , dans une section transversale par la formule de Chézy au régime graduellement varié, et le théorème d'Euler lorsque on évalue la perte

de charge globale entre deux section transversales limitant au régime brusquement varié. (M. s. Altinakar .1993)

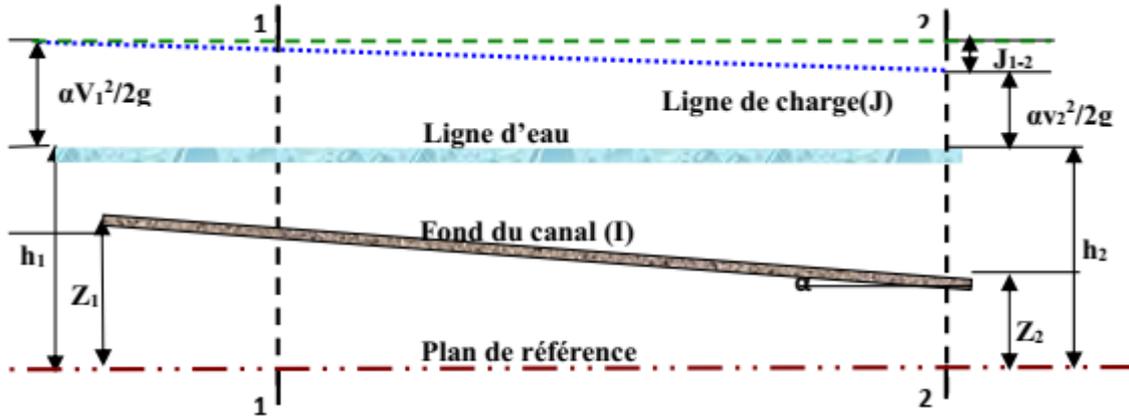


Figure II-13 Ecoulement non uniforme

II-8-3-2- EQUATION SIMPLIFIEE DE SAINT VENANT

Dans un écoulement graduellement varié, l’application des équations de Saint Venant permet de calculer les hauteurs d’eau et les vitesses moyennes le long de la direction d’écoulement en fonction du temps. Ces équations sont l’ensemble d’équation de continuité et l’équation dynamique de mouvement après des simplifications, et les solutions en sont souvent extrêmement compliquées. Dans certains cas physiquement simples mais réalistes, explicites sont possible. Dans le cas général l’équation dynamique pour un écoulement non permanent et non uniforme dans un canal découvert se donne comme suit

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - J_f = -J_e \dots\dots\dots\text{II-22}$$

Cette équation peut aussi être obtenue en utilisant le théorème de quantité de mouvement on obtiendra pratiquement le même résultat.

Avec

$$J_f = -\frac{\partial z}{\partial x} \dots\dots\dots\text{II-23}$$

Comme pente de fond.

$h_r = J_e \partial x$  Comme perte de charge et  $J_e$  comme pente énergétique donnent par une relation établie pour écoulement uniforme permanent et strictement valable de type Weisbach Darcy ou Chézy, et aussi pour les écoulements non permanents ou non uniformes. (M. s. Altinakar .1993)

L’étude d’un écoulement permanent et non uniforme rend l’équation (20) se forme

$$\frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - J_f = -J_e \dots\dots\dots\text{II-24}$$

D'autre part l'étude des écoulements graduellement variés pose un problème pour déterminer la position  $x$ , et la forme  $h(x)$  de la surface libre pour un débit  $Q$ , et une forme géométrique de section  $S$  donnée. Faite à partir de l'équation de l'énergie et l'équation de continuité.

La dérivation de l'équation d'énergie par rapport à  $x$  et lorsque on utilise une relation de type Chézy fonction de  $x$  et de  $h$  donne :

$$\frac{d\left(\frac{Q}{S}\right)^2}{2g} + \frac{dh}{dx} - J_f = -J_0 = -\frac{\left(\frac{Q}{S}\right)^2}{R_h c^2} \dots\dots\dots \text{II-25}$$

$$s = f(h(x), x) \text{ et } \left(\frac{ds}{dx}\right) = B \dots\dots\dots \text{II-26}$$

Dont la pente où la géométrie de section variante dans la direction longitudinale du canal. Par cette définition on exprime le premier terme de l'équation (II-25) par

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{Q^2}{2gS^2} \right) = \frac{Q^2}{2g} \left( -\frac{2}{S^3} \frac{dS}{dx} \right) = -\frac{Q^2}{gS^3} \left( \frac{ds}{dh} \frac{dh}{dx} + \frac{dS}{dx} \Big|_{h=cte} \right) \dots\dots\dots \text{II-27}$$

Cette équation constitue une équation différentielle du premier ordre. S'écrit par conséquent :

$$-\frac{Q^2}{gS^3} \left( \frac{ds}{dh} \frac{dh}{dx} + \frac{dS}{dx} \right) + \frac{dh}{dx} - J_f = -\frac{\left(\frac{Q}{S}\right)^2}{R_h c^2} \dots\dots\dots \text{II-28}$$

Elle permet de déterminer la profondeur d'eau  $h(x)$  en fonction de la distance, par un débit  $Q$  donné.

Après des simplifications j'obtiens une équation différentielle de l'écoulement graduellement varié des canaux non prismatiques de forme :

$$\frac{dy}{dx} = J_f \frac{1 - \frac{(Q/S)^2}{c^2 R_h J_f} + \frac{(Q/S)^2}{g S J_f} \frac{ds}{dx}}{1 - \frac{(Q/S)^2}{S g} B} \dots\dots\dots \text{II-29}$$

Où le terme  $\frac{(Q/S)^2}{g S J_f} \frac{ds}{dx}$  exprime le changement de section (largeur au miroir).

Cette équation permet de définir l'inclinaison (pente) par rapport au fond du canal et non pas la pente de la ligne d'eau, et la profondeur,  $h$ , pas la cote. Prend la valeur positive si la profondeur d'eau,  $h$ , croit et négative dans le cas contraire. (*M. s. Altinakar .1993*)

A noter que l'équation (II-25), tout comme l'équation (II-24), est l'équation simplifiée de Saint Venant ; elle est valable pour les canaux prismatiques et non prismatiques. Si le canal est prismatique l'équation (II-28) devient :

$$\frac{dy}{dx} = J_f \frac{1 - \frac{(Q/S)^2}{C^2 R_h J_f}}{1 - \frac{(Q/S)^2}{Sg} B} \dots\dots\dots \text{II-28a}$$

On remarque que l'argument  $\frac{dy}{dx}$  devient la valeur de pente critique quand :

$$C^2 R_h J_f = \frac{gS}{B} \dots\dots\dots \text{II-30}$$

C'est-à-dire la profondeur normale et la profondeur critique sont égales ceci donne la définition de la pente critique

$$J_f \equiv J_s = \frac{gS}{C^2 R_h B} \dots\dots\dots \text{II-31}$$

Cette pente en fonction de la profondeur d'eau,  $h$  qui définit une pente de manière que cette profondeur soit à la fois profondeur normale,  $h_n$  et profondeur critique,  $h_c$  quel que soit le débit. Et joue un rôle important comme paramètre de référence dans l'étude de l'écoulement graduellement varié. (M. s. Altinakar .1993)

II-8-3-3- FORME DE LA SURFACE D'EAU

Dans les écoulements graduellement variés les différentes courbes intégrales obtenue par l'équation (26) en fonction de la pente du fond  $J_f$  qui définit leurs classification pour un débit Q donné. Ces courbes ne cherchent pas à donner une solution explicite mais on s'intéresse à donner les formes semi quantitatives de la variation de la profondeur,  $h$  avec la distance  $x$  par des conditions au limite permet de tracer la surface d'eau pour les différents cas possibles. Cette classification de la ligne d'eau désignant cinq cas suivantes :

- $J_f > 0$
- $J_f < J_c$  Canaux à pente faible M
- $J_f > J_c$  Canaux à pente forte S
- $J_f = J_c$  Canaux à pente critique C
- $J_f = 0$  Canaux a pente zéro H
- $J_f < 0$  Canaux a contre pente A

Chaque courbe comporte différente branches qui donnent leur ensemble ne représentant pas une ligne réelle de la surface d'eau, mais plutôt un ensemble de divers cas possibles. Une surface d'eau réelle est alors représentée par une seule branche. Si la surface d'eau est composée de plusieurs branches, ces dernières appartiendront à des classes distinctes.

II-8-3-4- CANAUX A PENTE FAIBLE

Dans le cas où la pente du canal est positive  $J_f > 0$  et inférieure à la pente critique  $J_c$  par conséquent la hauteur normale  $h_n$ , supérieure à la hauteur critique,  $h_c$ , c'est-à-dire pente faible, dans ce cas les formes de la surface libre dans un canal descendant comprend trois branches ou courbes  $M_1, M_2, M_3$ .

Courbe M1

La hauteur normale,  $h_n$  plus grand que la hauteur critique  $h_c$ , et plus petite que la hauteur d'écoulement,  $h$ , ( $h > h_n > h_c$ ) on a donc un rapport  $\frac{dh}{dx}$  positif et un écoulement de type fluvial. La courbe vient en amont elle tend vers la pente de la profondeur normale, et en aval croissant tend vers une tangente horizontale et le canal progresse de l'aval vers l'amont. On rencontre cette branche par exemple :

- L'entrée d'un écoulement permanent uniforme dans un réservoir.
- En amont d'un barrage.
- Dans certains changements brusque de pente

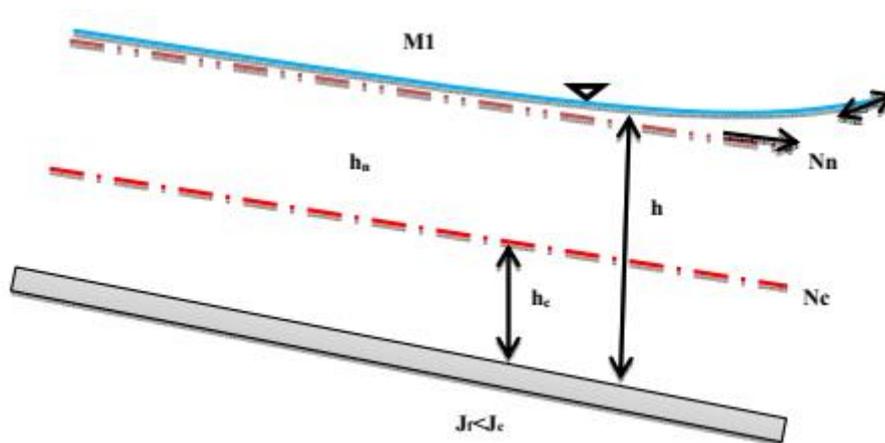


Figure II-14 Branche M1 (courbe remous d'exhaussement).

Courbe M2

Ce type de courbe correspond à un écoulement fluvial et un rapport de  $\frac{dh}{dx}$  négatif, la hauteur d'écoulement est comprise entre la hauteur critique,  $h_c$  et la hauteur normale,  $h_n$  ( $h_n > h > h_c$ ) tend vers la pente de profondeur normale en amont, et une chute brusquement vers la hauteur critique (décroissant perpendiculairement) pour tendre vers l'aval. Le calcul est le même de la courbe M2, elle représente le passage d'un écoulement permanent uniforme vers une section critique comme une chute ou encore une augmentation forte de la pente d'écoulement. (M. s. Altinakar .1993)

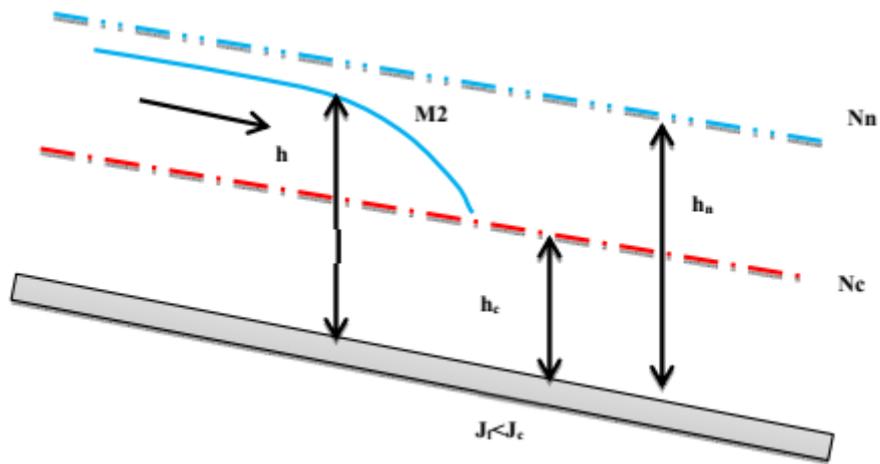


Figure II-15 Branche M2 (courbe remous d'abaissement).

Courbe M3

Cette branche désignant une hauteur critique,  $h_c$ , supérieure à la hauteur d'écoulement,  $h$ , et inférieure à la hauteur normale,  $h_n$  ( $h_c > h_n > h$ ), ou l'écoulement est torrentielle et le rapport,  $\frac{dh}{dx}$  est positif, souvent prolongé par un ressaut hydraulique. La courbe vient de l'amont en augmentation, pour tendre en aval vers la profondeur critique,  $h_c$  se rencontre dans un écoulement à grande vitesse à pente faible ou dans certains changements de pente.

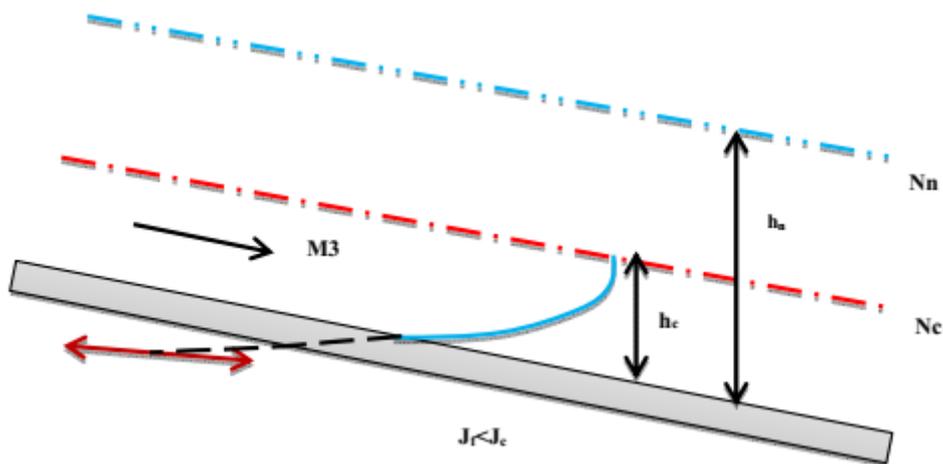


Figure II-16 Branche M3 (courbe remous d'abaissement)

II-8-3-5 CANAUX A PENTE FORTE

Les écoulements dans les canaux descendant à pente forte comprend trois branches ou des formes de la surface d'eau différents. Si la pente de fond,  $J_f$  positive et supérieur à la pente critique,  $J_c$  et la hauteur normal,  $h_n$ , inférieur à la hauteur critique,  $h_c$ , on a donc un écoulement de type torrentiel.

Courbe S1

Si le type d'écoulement torrentielle et le rapport,  $\frac{dh}{dx}$ , est positif, la hauteur d'écoulement  $h$  est plus grand que la hauteur normale,  $h_n$ , en amont elle coupe perpendiculairement la ligne de la hauteur critique,  $h_c$ , c'est le cas de ressaut hydraulique, en aval elle tend vers l'horizontale. Elle rencontre en amont (au remous) d'un barrage, ou dans certains changements de pente.

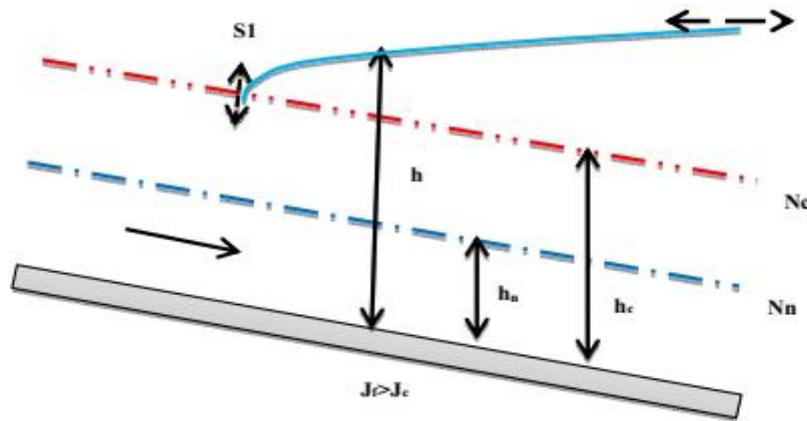


Figure II-17 Branche S1 (Courbe remous d'exhaussement).

Courbe S2

Dans ce type de cette courbe la profondeur d'eau  $h$  décroît, correspondant à un rapport de  $\frac{dh}{dx}$  négatif et un régime d'écoulement torrentiel. La hauteur d'écoulement,  $h$ , supérieure à la hauteur normale,  $h_n$ , et inférieure à la hauteur critique,  $h_c$ , en amont, elle naît brusquement de la hauteur critique, en aval elle tend vers la hauteur normale. Se rencontre en aval d'une augmentation brusque de pente, ou dans l'élargissement de la section

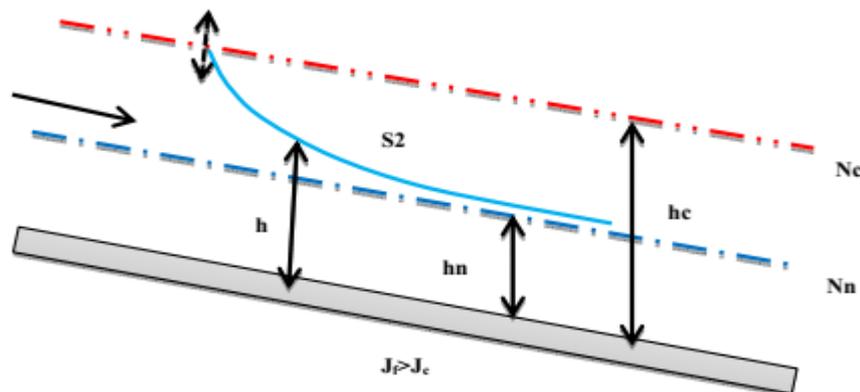


Figure II-18 Branche S2 (courbe remous d'abaissement).

Courbe S3

L'écoulement est torrentiel et la hauteur d'écoulement,  $h$ , est inférieure de la hauteur normale,  $h_n$ , le rapport,  $\frac{dh}{dx}$ , est positif, dans ce type de courbe, en amont, sa pente commence rapidement, et en aval, elle remonte brusquement vers la hauteur normale. Par exemple on rencontre :

- Dans un écoulement sous une vanne dénoyée débouchant dans un canal a pente forte.
- Lorsque la pente diminue brusquement tout en restant supérieure à la pente critique.

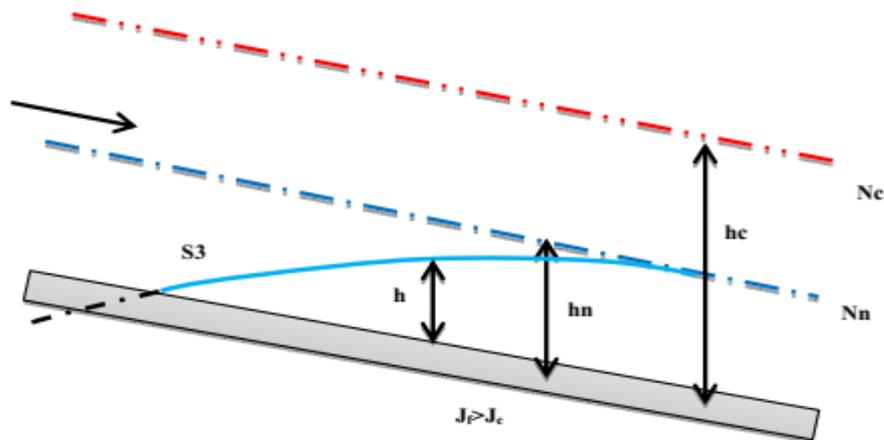


Figure II-19 Branche S3 (Courbe remous d'exhaussement).

### II-8-3-6- CANAUX A PENTE CRITIQUE

Dans un canal à pente critique où la pente de fond identique à la pente critique, et la hauteur normale,  $h_n$  équivalent à la hauteur critique,  $h_c$  les courbes C intermédiaires entre les courbes M et les courbes S. par conséquent le rapport,  $\frac{dy}{dx} = J_f$  La courbe représentative est donc horizontale. Dans ce cas l'écoulement à profondeur critique  $h_c$  est souvent instable ce qui se traduit par des fluctuations de la surface libre.

#### Courbe C1

La hauteur d'écoulement,  $h$  est plus grande que la hauteur normale,  $h_n$  par conséquent,  $h_c$ , et le régime d'écoulement est fluviale. Représente le passage entre M1 concave et S1 convexe. Elle est donc droite et horizontale.

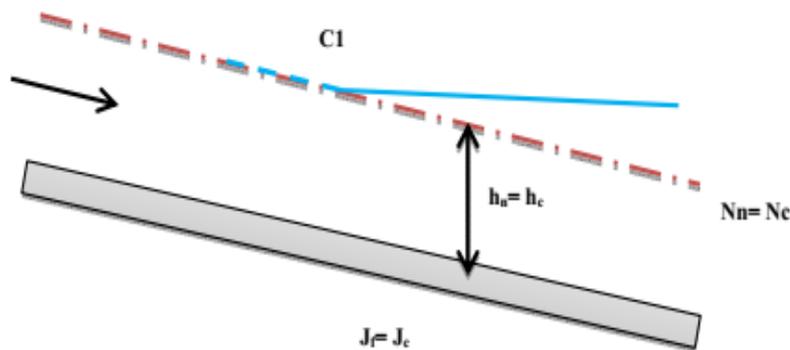


Figure II-20 Branche C1 (courbe remous d'exhaussement)

Courbe C<sub>2</sub>

Lorsque la hauteur normale et la hauteur critique sont confondues la courbe (branche) C<sub>2</sub> n'existe pas.

Courbe C<sub>3</sub>

Dans le cas contraire, la hauteur d'écoulement,  $h$  inférieure à la hauteur normale  $h_n$ , ( $\equiv h_c$ ), et le régime d'écoulement torrentielle. La courbe C<sub>3</sub> représente le passage entre M<sub>3</sub> Convexe et C<sub>3</sub> concave, elle est aussi horizontale

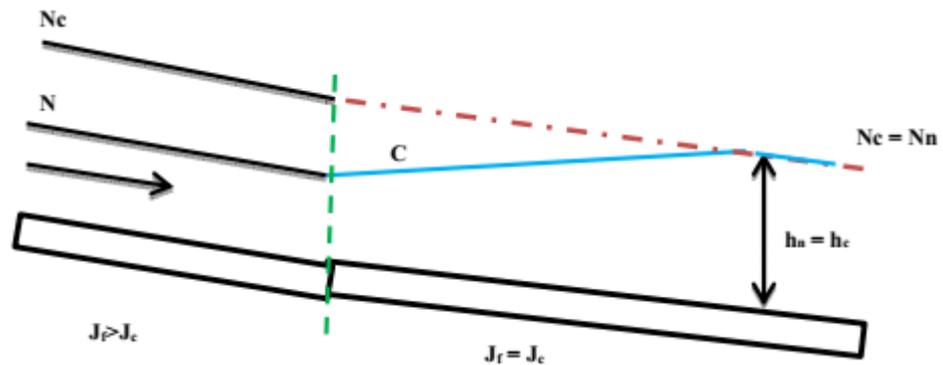


Figure II-21 Branche C3 (Courbe remous d'exhaussement).

II-8-3-7- Canaux horizontaux

Dans les canaux horizontaux la pente de fond  $J_f$  est nulle est la profondeur normale  $h_n$  n'existe pas puisqu'elle devient inférieure, dans ce cas la courbe comporte deux branches H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub> qui sont les limites des branches M<sub>2</sub> et M<sub>3</sub> et la branche H<sub>1</sub> disparaît. Se rencontre à une chute brusque pour la courbe H<sub>2</sub> et d'un écoulement à grande vitesse entrant dans un canal horizontale pour la courbe H<sub>3</sub>.

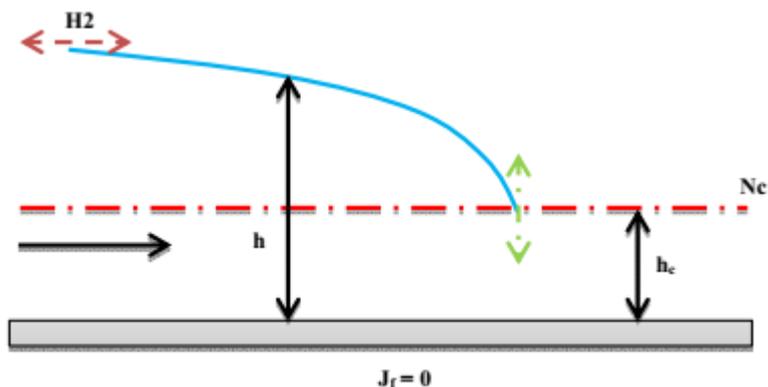


Figure II-22 Branche H2 (courbe remous d'abaissement).

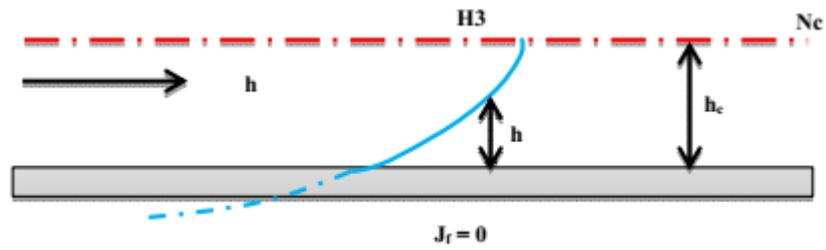


Figure II-23 Branche H3 (courbe remous d'exhaussement).

II-8-3-8- Canaux à contre pente

D'après l'équation de Manning, pour calculer la profondeur d'un canal de forme donnée avec la formule de débit on constate que l'écoulement uniforme est seulement possible dans un canal à pente descendante  $J_f > 0$ . Dans le cas contraire  $J_f < 0$  (contre pente) il n'y a pas de profondeur normale,  $h_n$ , en conséquence la branche  $A_1$  n'existe pas. Et la courbe comportant les deux branches  $A_2$  et  $A_3$  qui se rencontre successivement par exemple dans un changement brusque de pente et à une vanne dont l'ouverture est inférieure à la profondeur critique. D'une manière générale les courbes H et A sont des cas particuliers des courbe M pour les quelles, on ne peut pas définir de régime uniforme donc la hauteur normale n'existe pas puisqu'elle devient infinie. (M. s. Altinakar .1993)

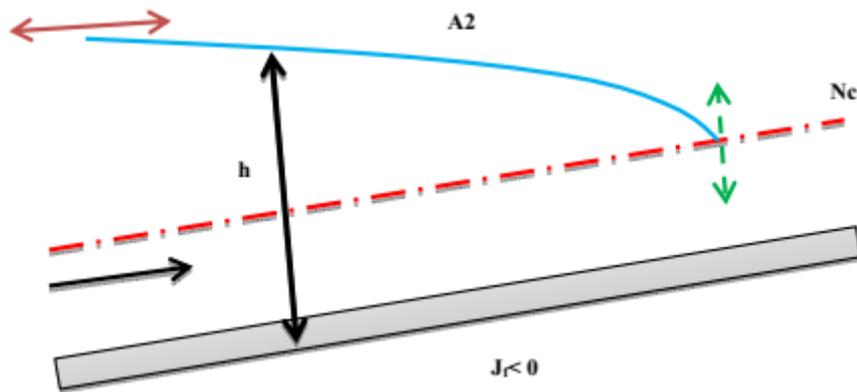


Figure II-24 Branche A2 (courbe remous d'abaissement).

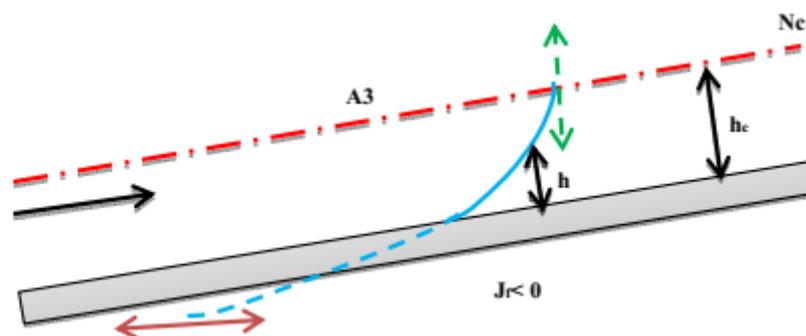


Figure II-25 Branche A3 (courbe remous d'exhaussement).

**II-9- THEORIE DE CALCUL DE LA PERTE DE CHARGE DANS UN CANAL A ECOULEMENT A SURFACE LIBRE**

**II-9-1- FORMULES DE PERTE DE CHARGE**

Depuis Chézy (1775), les ingénieurs ont cherché à établir une formule pratique qui donnerait la relation entre la perte de charge (qui représente le frottement), le débit et les autres éléments intervenant dans le mouvement de l'eau. C'est le succès de la similitude qui a permis d'établir la forme générale de la loi de frottement à travers le coefficient de perte de charge  $\Delta$ . Ainsi, pour un fluide quelconque dans un ouvrage quelconque (canalisation en charge, écoulement à surface libre), la pente de frottement s'écrit :

$$J = \frac{A}{D_H} \frac{U^2}{2g} \dots \dots \dots \text{II-32}$$

$DH$  est le diamètre hydraulique, dimension linéaire caractéristique d'une section transversale de l'ouvrage considéré (diamètre d'une canalisation, diamètre hydraulique de la section mouillée d'un écoulement à surface libre, etc.).  $g$  est l'accélération de la pesanteur.  $U$  représente la vitesse moyenne débitante dans la dite section transversale.  $A$  est le coefficient adimensionnel de perte de charge qui est fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement  $Re$ , et de  $\epsilon / DH$ , la rugosité relative des parois de l'ouvrage ( $\epsilon$  est la hauteur équivalente des rugosités des parois), soit :

$$A = f(Re\epsilon/D_H) \dots \dots \dots \text{II-33}$$

Dans le cas d'un écoulement à surface libre, la pente du canal  $I$  est l'homologue de  $J$ , et on peut s'attendre à un effet de pesanteur supplémentaire comme le nombre de Froude. Le point de distinction entre toutes les formules empiriques, semi-empiriques ou analytiques proposées dans la littérature porte sur l'expression du coefficient de résistance  $A$  comme signalé plus haut, la première formule empirique a été obtenue par Chézy correspondant à  $A = C^2 / (8g)$  où  $C$  est une constante appelée coefficient de Chézy. C'est depuis les expériences de Coulomb, en 1800, qu'on a su que la rugosité de la paroi a également une influence. A la suite, plusieurs autres formules différentes (établies dans les canaux ou dans les conduites en charge) ont été proposées. On peut citer par exemple les formules de Prony, Tadini, Ganguillet & Kutter, Darcy, Bazin, Blasius ( $A = 0.316 Re^{-0.25}$ ), Manning correspondant à  $C = Re^{1/6} / n$  où  $n$  est le coefficient de Manning, Strickler correspondant à  $n = 1 / k$  où  $k$  est le coefficient de Strickler. Ces formules empiriques ont été établies d'après les résultats d'expériences réalisées avec de grands débits d'eau sur de grosses

canalisations, mais dans un domaine assez limité. Elles ont été parfois employées, par la suite, dans tous les cas possibles, avec des extrapolations que ceux qui les utilisent ne soupçonnent même pas. (Astarita, g., Mariucci, g., et Balumbo, g., 1964)

Le problème a été allégé par Reynolds, en 1883, qui fut le premier à définir le nombre adimensionnel  $Re$  portant son nom par la suite :

$$R_e = \frac{\rho U D_H}{\mu} \dots \dots \dots \text{II-34}$$

Où  $\rho$  et  $\mu$  représente respectivement la masse volumique et la viscosité du fluide. Dans les canaux,  $D_H$  est souvent remplacé par  $4h$  où  $h$  représente la profondeur maximale (ou moyenne) de l'écoulement. Les observations de Reynolds indiquent suivant la valeur du nombre  $Re$  la nature du régime d'écoulement :

Pour de faibles valeurs de  $Re$ , les faibles rugosités de la paroi n'ont pas d'influence et l'écoulement est laminaire ; pour  $Re$  assez grand, un mouvement aléatoire des particules se produit donnant naissance à un écoulement turbulent.

II-9-2- Perte de charge dans les canaux

Metzner & Reed (1955), Kozicki & Tiu (1967-1986) ont proposé une méthode approximative générale pour la détermination du débit moyen et la vitesse maximale d'un écoulement à travers un canal section arbitraire, sans aucune spécification de la loi de comportement. Dans cette méthode, ils introduisent deux paramètres géométriques  $a_1$  et  $a_2$  déterminés expérimentalement avec un fluide de comportement Newtonien puis supposés rester valables pour tous les fluides complexes indépendants de temps. Ces paramètres sont respectivement 1/4 et 3/4 pour une forme semi-circulaire et 1/2 et 1 pour un plan incliné. (Astarita, g., Mariucci, g., et Balumbo, g., 1964)

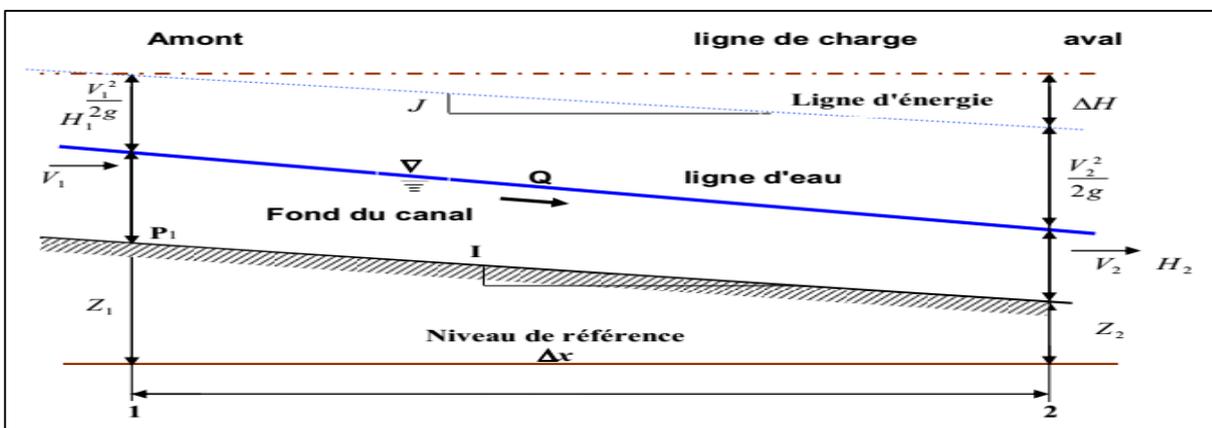


Figure II-26 : Diagramme d'énergie pour un écoulement non-uniforme.

La charge hydraulique dans une section quelconque d'une conduite est définie par :

$$H = \frac{U^2}{2.g} + \frac{P}{\rho.g} + Z \dots\dots\dots\text{II-35}$$

H : Charge hydraulique totale ( en m )

U : Vitesse moyenne (  $U = Q/s$  ) ( en m/s )

P : Pression moyenne dans la conduite ( en pascale )

Z : Cote du point considéré ( en m )

G : Accélération de pesanteur (  $g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ N/kg}$  )

$\rho$  : Masse volumique du liquide ( en  $\text{kg/m}^3$  )

$\frac{P}{2.g}$  Pour l'énergie de pression, liée aux forces de pression

$\frac{U^2}{2.g}$  Pour l'énergie cinétique, liée aux forces d'inertie

Pour calculer la perte de charge entre 2 points  $Z_1$  et  $Z_2$ , on utilise l'équation de Bernoulli :

$$Z_1 + H_1 + \frac{V_1^2}{2.g} = Z_2 + H_2 + \frac{V_2^2}{2.g} + \Delta h_{1-2} \dots\dots\dots\text{II-36}$$

La charge totale :

$$H_t = Z_1 + H_1 + \frac{V_1^2}{2.g} = Z_2 + H_2 + \frac{V_2^2}{2.g} + \Delta h_{1-2} \dots\dots\dots\text{II-37}$$

$$\Delta h_{1-2} = H_t - Z_2 - H_2 - \frac{V_2^2}{2.g} \dots\dots\dots\text{II-38}$$

On a aussi  $Q = V.S \rightarrow V = \frac{Q}{S} \rightarrow = \frac{Q}{h.b}$ , (section rectangulaire).....II-39

Donc la perte de charge par % :

$$\frac{\Delta h_{1-2}}{H_t} * 100 \dots\dots\dots\text{II-40}$$

## **Conclusion**

D'une manière générale l'expression des écoulements dans un canal à surface libre, engendre des forces ou des équations des bases développées pour les cas les plus généraux. Ces équations réduites du mouvement font intervenir les coefficients ou nombre adimensionnels permettant de classer ces régimes d'écoulements.

Ce chapitre a fourni un bref aperçu qui identifie d'abord les concepts d'écoulement irrégulier, ainsi que la compréhension des différentes propriétés hydrauliques de l'écoulement à surface libre pour calculer le débit et le niveau d'eau en plus du calcul de la basse pression. Le long des canaux naturels et artificiels.

Dans ce contexte, "basse pression" signifie "perte de charge hydrostatique". Selon l'étude théorique de ce chapitre, on peut dire que les pertes dans les canaux sont importantes si le débit est variable lorsque la géométrie ou la rugosité n'est pas constante. D'un autre côté, ce dernier permet de réhabiliter et de réparer l'ingénierie des canaux. Afin d'obtenir des flux réguliers progressivement ou rapidement, et ainsi nous distinguerons les flux graduellement ou rapidement et avec une analyse attentive

## ETUDE EXPERIMENTALE

### *III-1 Introduction*

Les courants d'eau sont un concept clé et représentent un choix idéal pour la production de l'énergie renouvelable et durable. Plusieurs chercheurs développent des systèmes pour exploiter cette énergie par de nouvelles technologies basées sur le principe de turbinage. Parmi ces systèmes qui sont en cours de développement et d'essais, la technologie des hydroliennes. Les hydroliennes sont encore un nouveau domaine d'exploration et d'expérimentation pour des conditions de fonctionnement très spécifiques, en présence d'un écoulement incident idéalisé (uniforme et stationnaire).

Cette étude expérimentale vise à déterminer l'effet des hydroliennes sur l'écoulement dans canal à écoulement libre considéré comme uniformes. Les hydroliennes sont implantés à l'intérieur du canal sous forme d'une plusieurs lignes contenant chacune une série d'hydrolienne disposées perpendiculairement au sens de l'écoulement (Fig. III-1). L'objectif est de faire une première évaluation de l'énergie consommée par le système d'hydroliennes. Pour ce faire, Nous abordons cette étude par le biais de la perte de charge généré par la présence des hydrolienne à travers l'écoulement.



Figure III-1 modèle des hydroliennes testé

Ainsi, une installation expérimentale a été mise en place. Cette installation expérimentale est définie par un canal de base de forme rectangulaire qui simule l'écoulement dans un cours d'eau naturel ou un canal artificiel de grande dimension.

### III-2 Présentation du modèle d'expérimentation

Les tests ont été effectués dans une station d'expérimentation des modèles réduits des ouvrages hydraulique. Cette station est équipée d'un canal de section rectangulaire constante. Ce canal se caractérise par une longueur de 13 m et une section de 1,0 x 0,75 m. Le système est alimenté par deux pompes qui débitent 180 l/s.



Figure III-2, Vue d'ensemble de la station expérimentale

L'entrée amont du bassin de simulation de retenue est équipée d'un dispositif qui permet d'assurer un écoulement stable. Le système contient aussi, deux débitmètres l'un à ultrason et l'autre électromagnétique pour mesurer les débits, et des indicateurs de niveau à ultrason pour mesurer les profondeurs d'eau. L'ensemble du dispositif expérimental fonctionne en circuit fermé.

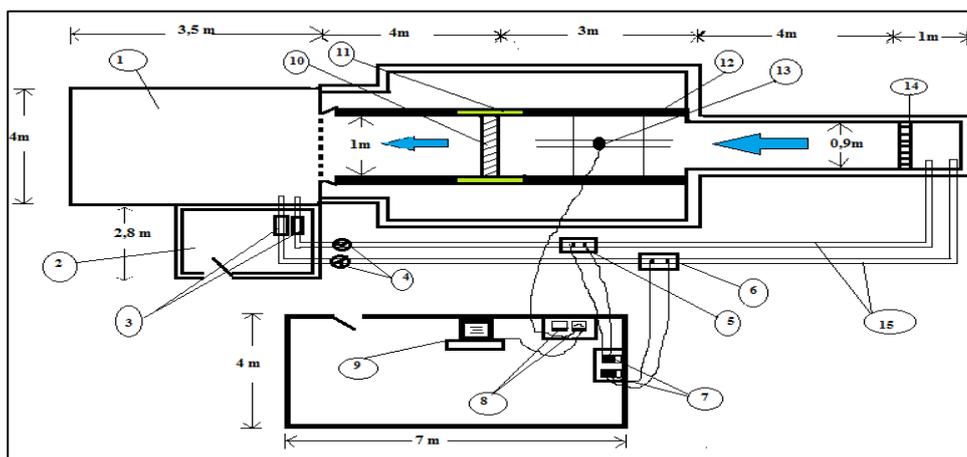


Figure III-3 Schéma de la station d'expérimentation

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1- Bâche à eau                  | 8- enregistreur de niveau                    |
| 2- Station de pompage           | 9- PC  |
| 3- pompes                       | 10- modèle réduit                            |
| 4- Vannes de réglage de débit   | 11- vitre en plexiglass                      |
| 5- Débitmètre à ultrason        | 12- canal de simulation                      |
| 6- Débitmètre électromagnétique | 13 - détecteur du niveau                     |
| 7- enregistreur des débits      | 14- Système de stabilisation de l'écoulement |
|                                 | 15- conduite de refoulement                  |

La station expérimentale a été dimensionnée dans le but de permettre l'expérimentation sur des modèles réduits des canaux et autres ouvrages hydrauliques à une échelle suffisamment acceptable.

### ***III-3 Description du modèle d'hydrolienne***

Les modèles d'hydrolienne conçus pour cette étude sont en nombre de 35 hydroliennes métalliques. Ces modèles sont confectionnés artisanalement en tôle métallique découpée et pliée et puis soudées en fonction des besoins de l'expérimentation. Les dimensions ont été choisies en respectant une échelle réduite par rapport à un exemple de prototype qui reflète les dimensions réelles de cas déjà réalisés. La figure III-4 montre le schéma type d'un modèle de l'hydrolienne conçue.

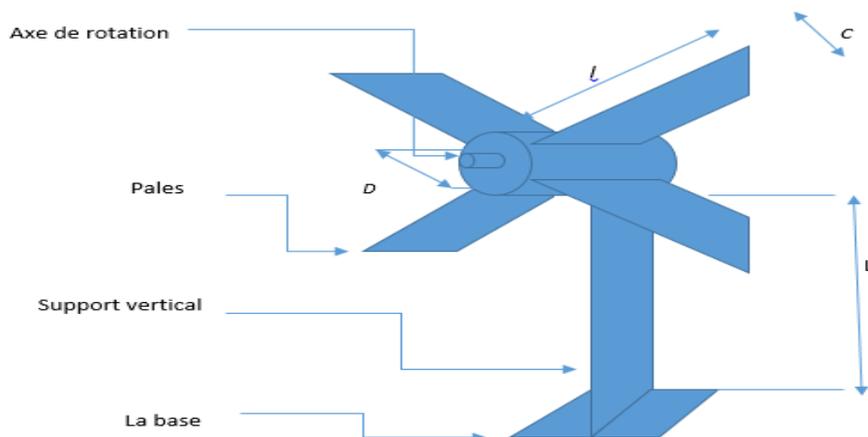


Figure III-4 Schéma type d'un modèle de l'hydrolienne conçue.

Les dimensions indiquées sur la figure représentent les dimensions techniques du modèle de hydrolienne

C : largeur de pales

L : la hauteur de support vertical

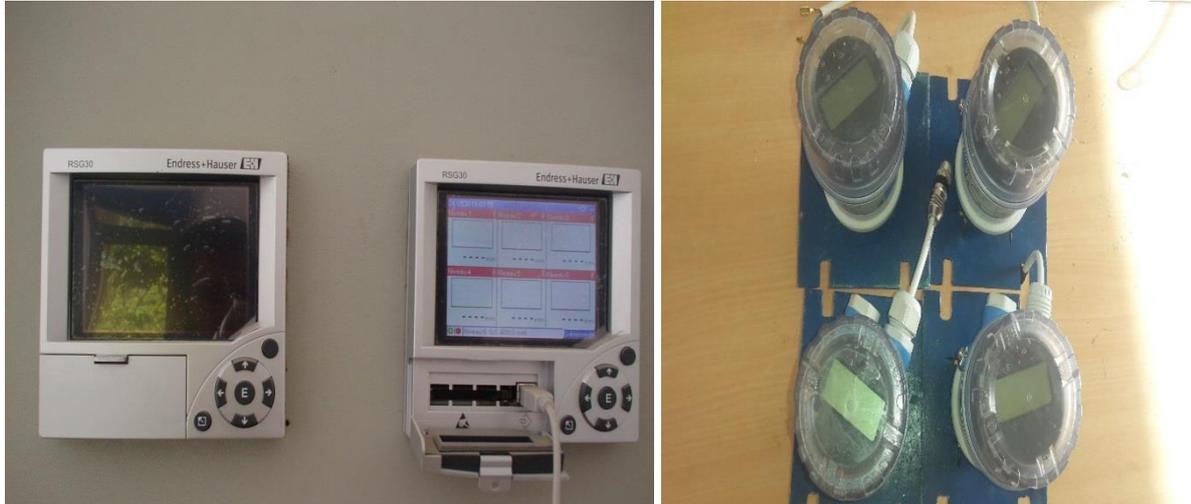
D : Diamètre de l'axe de rotation du cylindre

### ***III.4 Instrumentation de mesure***

Les deux variables qui ont été mesurées pendant les essais et qui sont d'une importance majeure, correspondent aux couples des valeurs débit – hauteur d'eau. Donc il est essentiel de procéder aux mesures de ces deux paramètres de l'écoulement par des moyens fiables pour aboutir à des résultats confirmés.

### III.4.1 Mesure des profondeurs d'eau dans le canal

Les profondeurs d'eau dans le canal d'essais sont mesurées par une série de détecteur de niveau de type PROSONIC T placé au-dessus du canal le long de ce dernier. Ces détecteurs de niveau sont raccordés chacun à un transmetteur de niveau compact destiné à la mesure de niveau continue et sans contact.



a- enregistreur du niveau

b- capteur du niveau

Figure III-5 Capteur de niveau PROSONIC T

### III.4.2 Mesure des débits qui transitent par le canal

Pour la mesure des débits deux débitmètres sont utilisés, chacun correspond à une conduite qui véhicule un débit maximum de 85 l/s, soit un débit total d'environ 170 l/s. Le premier débitmètre est à ultrason (Prosonic Flow 3W) raccordé sur la conduite et le second électromagnétique emboîté dans la conduite.

Le principe de fonctionnement du débitmètre à ultrason (Prosonic Flow) est d'envoyer un signal acoustique (ultrason) dans les deux sens d'un capteur à l'autre pour mesurer la différence de temps de parcours, Cette différence est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

Le débit est calculé à partir de la section de la conduite et de la vitesse d'écoulement mesurée, Ensuite les lectures des débits sont transmises directement à un adaptateur de type Commubox FXA.

La différence entre les deux débitmètres est que, le débitmètre électromagnétique détermine automatiquement les paramètres de la conduite ( $D$ ,  $e$ ) et les paramètres du fluide ( $T^o$ ,  $\mu$ , etc), par contre pour le débitmètre à ultrason ses paramètres sont introduits dans le logiciel de gestion du débitmètre par l'utilisateur.

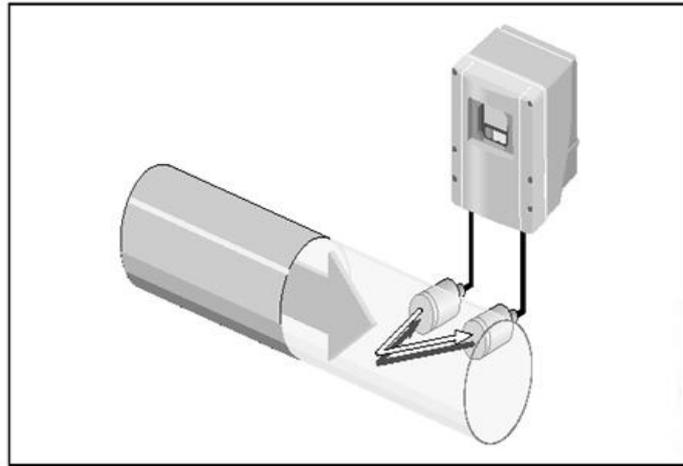


Figure III-6 Principe de mesure du débit par le débitmètre



Figure III-7 Enregistreur du débitmètre ultrason (Prosonic Flow 3W)

### ***III-5. Protocole expérimental***

Avant le début de l'expérimentation pour déterminer l'impact des hydrolienne sur l'écoulement qui se manifeste par la perte de charge. Nous ajustons les instruments de mesure de débit et de niveau d'eau et prendre la lecture des valeurs de niveau du fond du canal sur tous les endroits d'emplacement des détecteurs de niveau.

On commence par le traitement du radier du canal d'essai et par la suite, l'installation des hydroliennes, qui consiste en un ensemble de sept turbines situées sur une seule ligne.

On fait le réglage de la pompe pour un débit choisi avant de commencer les essais. Lorsque l'écoulement se stabilise, on prend la lecture de la profondeur sur chaque capteur de niveau.

Ce processus est répété chaque fois que le débit est modifié en manipulant la vanne. De cette manière, une série de couple des valeurs de débit et de la profondeur d'eau correspondante est obtenues.

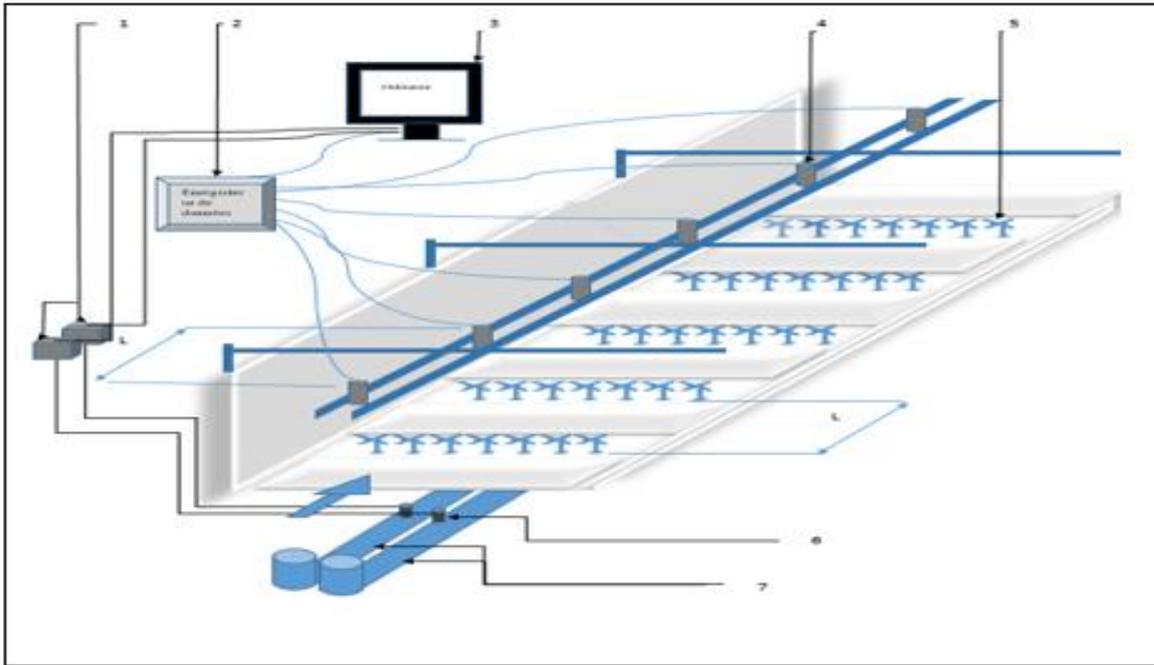


Figure III-8 Schéma de description de l'installation expérimentale

- |   |                                     |   |                         |
|---|-------------------------------------|---|-------------------------|
| 1 | Enregistreur du débitmètre ultrason | 5 | Hydroliennes            |
| 2 | Enregistreur du niveau              | 6 | Débitmètre              |
| 3 | PC d'acquisition des données        | 7 | conduite de refoulement |
| 4 | Capteur de niveau                   |   |                         |

### **III.6 Description de l'installation expérimentale**

#### **III-6-1. Choix de la disposition expérimentale**

##### *III-6-1-1. Caractéristiques géométriques et hydrauliques du prototype*

Pour se rapproché du cas réelle, nous avons choisir un modèle compatible avec les conditions réelles pour un cas d'implantation d'hydrolienne dans un canal de grande dimensions.

Par conséquent, le modèle qui a fait l'objet de cette étude correspond au prototype qui contient les caractéristiques suivantes :

Longueur du canal :  $L= 12 \text{ km}$

Largeur du canal :  $b= 100 \text{ m}$

Vitesse d'écoulement incident :  $V= 3 \text{ à } 5 \text{ m/s}$

Débit de transit :  $Q =$

Profondeur d'eau dans le canal :  $h = 15 \text{ à } 20 \text{ m}$

Diamètre des hydroliennes :  $D = 10 \text{ m}$

##### *III-6-1-2. Caractéristiques géométriques et hydrauliques du modèle réduit*

En fonction des conditions locales disponibles au niveau de la station d'expérimentation et des dimensions du prototype, le choix de l'échelle qui paraît acceptable de point de la reproduction des mêmes conditions entre le prototype et le modèle, correspond à une échelle de réduction de 1/100. En utilisant les lois de la similitude de l'analogie la plus appropriée qui est celle de Reech-Froude, on doit respecter les similitudes suivantes :

$$\text{Temps :} \quad \lambda_t = \sqrt{\lambda} \quad (\text{III-1})$$

$$\text{Vitesse :} \quad \lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad (\text{III-2})$$

$$\text{Débit :} \quad \lambda_Q = \lambda_v \cdot \lambda^2 = \lambda^{5/2} \quad (\text{III-3})$$

Le modèle est exploité en similitude de Froude, c'est-à-dire en admettant la conservation du rapport entre les forces d'inertie et de gravité

En choisissant une échelle de 1/100, on a :

Longueur du canal :  $L = 12 \text{ m}$

Largeur du canal :  $b = 100 \text{ cm}$

Vitesse d'écoulement incident :  $V = 0,3 \text{ à } 0,5 \text{ m/s}$

Débit de transit :  $Q = 30 \text{ à } 90 \text{ l/s}$

Profondeur d'eau dans le canal :  $h = 15 \text{ cm à } 20 \text{ cm}$

Diamètre des hydroliennes :  $D = 10 \text{ cm}$

#### *III-6-1-2. Choix de l'emplacement de hydroliennes*

Pour aboutir aux objectifs fixés, il est fondamental de choisir une disposition pratique des hydroliennes dans le canal d'essai semblable à celle du prototype en satisfaisant les critères suivants.

- L'alignement des hydroliennes doit être perpendiculaire au sens de l'écoulement.
- La distance entre chaque deux hydrolienne doit être suffisamment grande pour éviter toute interaction entre elles.
- La profondeur d'eau doit être suffisante pour immerger les hydroliennes sous une lame d'eau d'environ la moitié du rayon de l'hydrolienne  $R/2$ .
- La distance entre les lignes de turbine doit être la même distance entre les Appareils de mesure.

En respectant les conditions ci-dessus, sept variantes ont été adoptées.

Variante 01- Ecoulement dans le canal sans hydroliennes.

Variante 02- Une ligne de 07 hydroliennes espacé chacune de l'autre de 4cm.

Variante 03- deux lignes de 07 hydroliennes espacé l'une de l'autre de 4cm. La distance entre chaque deux ligne d'hydroliennes est de 50cm.

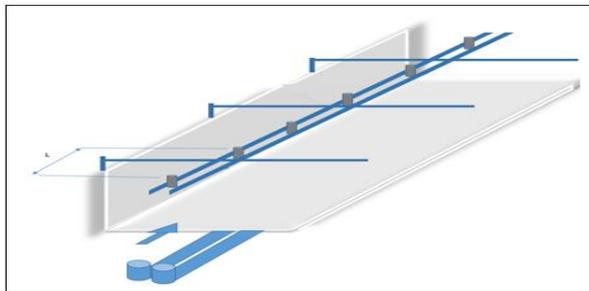
Variante 04- trois lignes de 07 hydroliennes espacé l'une de l'autre de 4cm. La distance entre chaque deux ligne d'hydroliennes est de 50cm.

Variante 05- quatre lignes de 07 hydroliennes espacé l'une de l'autre de 4cm. La distance entre chaque deux ligne d'hydroliennes est de 50cm.

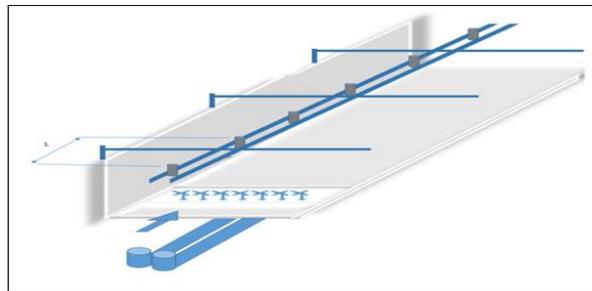
Variante 06- lignes de 07 hydroliennes espacé l'une de l'autre de 4cm. La distance entre chaque deux ligne d'hydroliennes est de 50cm.

Le travail expérimental a été conduit dans un dispositif expérimental constitué par un canal de longueur 13m et ayant une section 1.0x0.75m. En premier temps On change le nombre d'hydroliennes et on mesure la charge pour 7, 14, 21,28, et 35 hydroliennes.

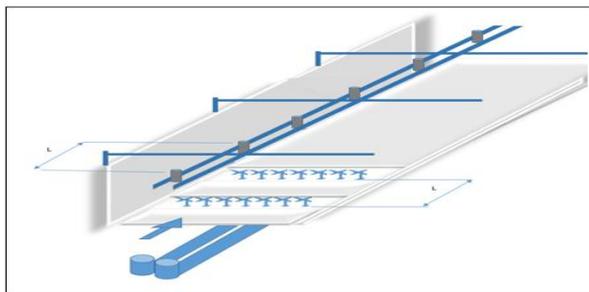
Les essais ont été effectués pour une vitesse égale à 0,34 à 0.49 m/s et un débit de 58 l/s à 111 l/s. et la distance entre les appareils de mesure  $L= 50$  cm.



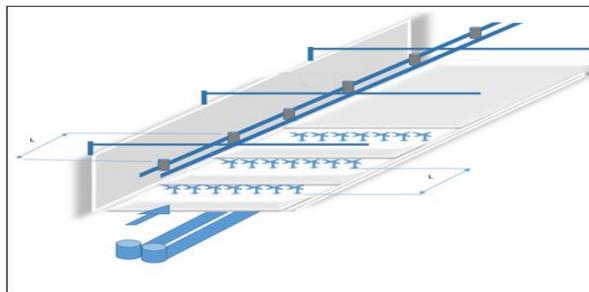
01- Canal sans hydroliennes



02- Canal avec une ligne de sept hydroliennes



03- Canal sans hydroliennes



04- Canal avec une ligne de sept hydroliennes

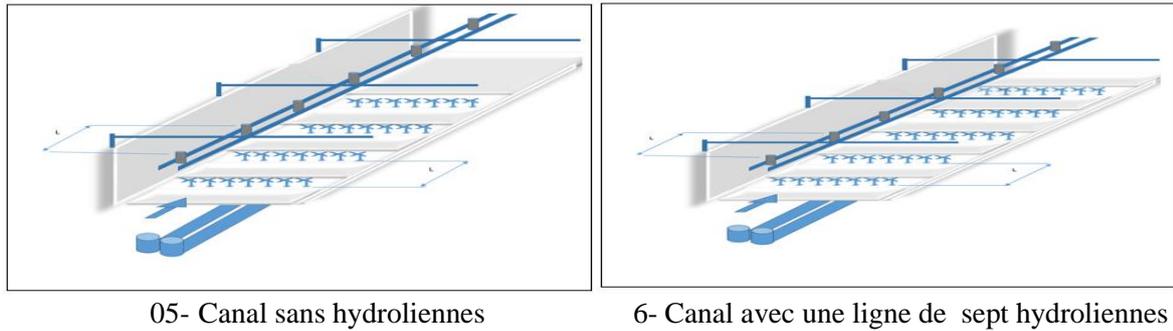


Figure III-09. Schémas des différentes variantes de disposition des hydroliennes.

### III-6. Résultats des essais

#### III-6-1. Traitement des résultats

Suite aux essais effectués, un traitement des données obtenues était nécessaire pour déterminer l'impact des hydroliennes sur l'écoulement.

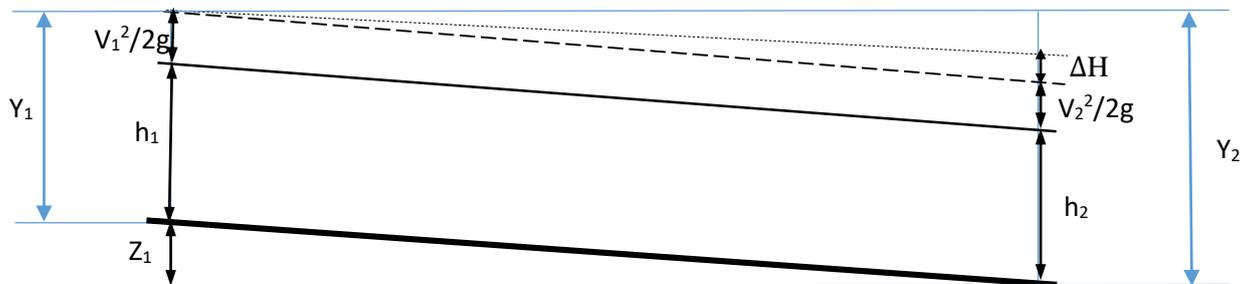


Figure III-10. Schéma de calcul de la charge totale dans le canal

L'altitude de chaque section est déterminée par la relation (III-4) par rapport à la section finale qui correspond au point d'installation du 4<sup>ème</sup> détecteur de niveau.

$$Z_1 = Y_2 - Y_1 \quad (III-4)$$

La section mouillée est déterminé par la relation suivante.

$$S_i = b x h_i \quad (III-5)$$

La vitesse moyenne d'écoulement pour chaque section est déterminée en fonction du débit de transite mesuré et de la section mouillée.

$$V_i = Q/S_i \quad (III-6)$$

La charge ou l'énergie totale dans chaque section est déterminée par l'équation de Bernoulli.

$$H_i = Z_i + h_i + V^2/2g + \Delta H_{i, i+1} \quad (III-7)$$

La perte de charge peut être estimée par la différence entre l'énergie à la section initiale et l'énergie à la section finale.

$$\Delta H_{i, i+1} = H_i - H_{i+1}$$

La perte de charge peut aussi être exprimée en pourcentage par rapport à l'énergie totale

$$\Delta H\% = (H_i - H_{i+1}) \times 100/H_i$$

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant.

Tableau III-1. Résultats des essais obtenus pour une ligne de sept hydroliennes

Q m <sup>3</sup> /s	Xi (m)	Yi (m)	Zi (m)	b (m)	hi(m)	Zi+hi (m)	Si (m)	Vi (m/s)	V <sup>2</sup> /2g (m)	Hi (m)	ΔH (m)	ΔH%
0,058	0	1,1855	0,002	1,0	0,1879	0,1899	0,1879	0,309	0,0049	0,1947	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,1891	0,1891	0,1891	0,307	0,0048	0,1939	0,0009	0,45
0,0756	0	1,1855	0,002	1,0	0,2063	0,2083	0,2063	0,366	0,0068	0,2152	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2070	0,2070	0,2070	0,365	0,0068	0,2138	0,0014	0,65
0,112	0	1,1855	0,002	1,0	0,2399	0,2419	0,2399	0,467	0,0111	0,2530	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2408	0,2408	0,2408	0,465	0,0110	0,2518	0,0012	0,47

Tableau III-2. Résultats des essais obtenus pour deux lignes de sept hydroliennes chacune, soit 14 Hydroliennes

Q m <sup>3</sup> /s	Xi (m)	Yi (m)	Zi (m)	b (m)	hi(m)	Zi+hi (m)	Si (m)	Vi (m/s)	V <sup>2</sup> /2g (m)	Hi (m)	ΔH (m)	ΔH%
0,058	0	1,1855	0,002	1,0	0,1880	0,1900	0,1880	0,309	0,0049	0,1948	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,1880	0,1880	0,1880	0,309	0,0049	0,1928	0,0020	1,02
0,0765	0	1,1855	0,002	1,0	0,2073	0,2093	0,2073	0,369	0,0069	0,2163	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2075	0,2075	0,2075	0,369	0,0069	0,2144	0,0019	0,88
0,1113	0	1,1855	0,002	1,0	0,2401	0,2421	0,2401	0,464	0,0110	0,2531	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2398	0,2398	0,2398	0,464	0,0110	0,2508	0,0023	0,90

Tableau III-3. Résultats des essais obtenus pour trois lignes de sept hydroliennes chacune, soit 21 Hydroliennes

Q m <sup>3</sup> /s	Xi (m)	Yi (m)	Zi (m)	b (m)	hi(m)	Zi+hi (m)	Si (m)	Vi (m/s)	V <sup>2</sup> /2g (m)	Hi (m)	ΔH (m)	ΔH%
0,058	0	1,1855	0,002	1,0	0,1900	0,1920	0,1900	0,305	0,0048	0,1967	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,1899	0,1899	0,1899	0,305	0,0048	0,1947	0,0021	1,04
0,0768	0	1,1855	0,002	1,0	0,2085	0,2105	0,2085	0,368	0,0069	0,2174	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2086	0,2086	0,2086	0,368	0,0069	0,2155	0,0020	0,90
0,1113	0	1,1855	0,002	1	0,2411	0,2431	0,2411	0,462	0,0109	0,2540	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1	0,2400	0,2400	0,2400	0,464	0,0110	0,2510	0,0030	1,18

Tableau III-4. Résultats des essais obtenus pour quatre lignes de sept hydroliennes chacune, soit 28 Hydroliennes

Q m <sup>3</sup> /s	Xi (m)	Yi (m)	Zi (m)	b (m)	hi(m)	Zi+hi (m)	Si (m)	Vi (m/s)	V <sup>2</sup> /2g (m)	Hi (m)	ΔH (m)	ΔH%
0,058	0	1,1855	0,002	1,0	0,1902	0,1922	0,1902	0,305	0,0047	0,1970	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,1892	0,1892	0,1892	0,307	0,0048	0,1940	0,0030	1,53
0,0765	0	1,1855	0,002	1,0	0,2094	0,2114	0,2094	0,365	0,0068	0,2182	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2074	0,2074	0,2074	0,369	0,0069	0,2144	0,0038	1,76
0,1115	0	1,1855	0,002	1,0	0,2427	0,2447	0,2427	0,459	0,0108	0,2554	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2408	0,2408	0,2408	0,463	0,0109	0,2517	0,0037	1,45

Tableau III-5. Résultats des essais obtenus pour cinq lignes de sept hydroliennes chacune, soit 35 Hydroliennes

Q m <sup>3</sup> /s	Xi (m)	Yi (m)	Zi (m)	b (m)	hi(m)	Zi+hi (m)	Si (m)	Vi (m/s)	V <sup>2</sup> /2g (m)	Hi (m)	ΔH (m)	ΔH%
0,058	0	1,1855	0,002	1,0	0,1904	0,1924	0,1904	0,305	0,0047	0,1971		0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,1884	0,1884	0,1884	0,308	0,0048	0,1932	0,0039	1,98
0,076	0	1,1855	0,002	1,0	0,2090	0,2110	0,2090	0,364	0,0067	0,2178	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2075	0,2075	0,2075	0,366	0,0068	0,2144	0,0034	1,57
0,111	0	1,1855	0,002	1,0	0,2428	0,2448	0,2428	0,457	0,0106	0,2555	0,0000	0,00
	2,5	1,1875	0	1,0	0,2400	0,2400	0,2400	0,462	0,0109	0,2509	0,0046	1,78

Avec :

Yi : distance entre le fond du canal et le détecteur de niveau (m).

b : largeur de la section du canal (m)

Q : Débit qui transite par le canal (m<sup>3</sup>/s)

L : Longueur entre deux sections de mesure (m)

Zi : Altitude de la section donnée (m)

hi : profondeur d'eau dans une section donnée (m)

Si : Section mouillée (m<sup>2</sup>)

Vi : vitesse moyenne dans une section donnée (m/s)

V<sup>2</sup>/2g : Energie cinétique dans une section donnée (m)

Hi : Energie totale (m)

ΔH : Perte de charge (m)

ΔH% : pourcentage de la perte de charge par rapport à la charge totale.



Figure III-11 Modèle avec 7 hydroliennes



Figure III-12 Modèle avec 14 hydroliennes



Figure III-13 Modèle avec 21 hydroliennes

Figure III-14 Modèle avec 28 Hydroliennes



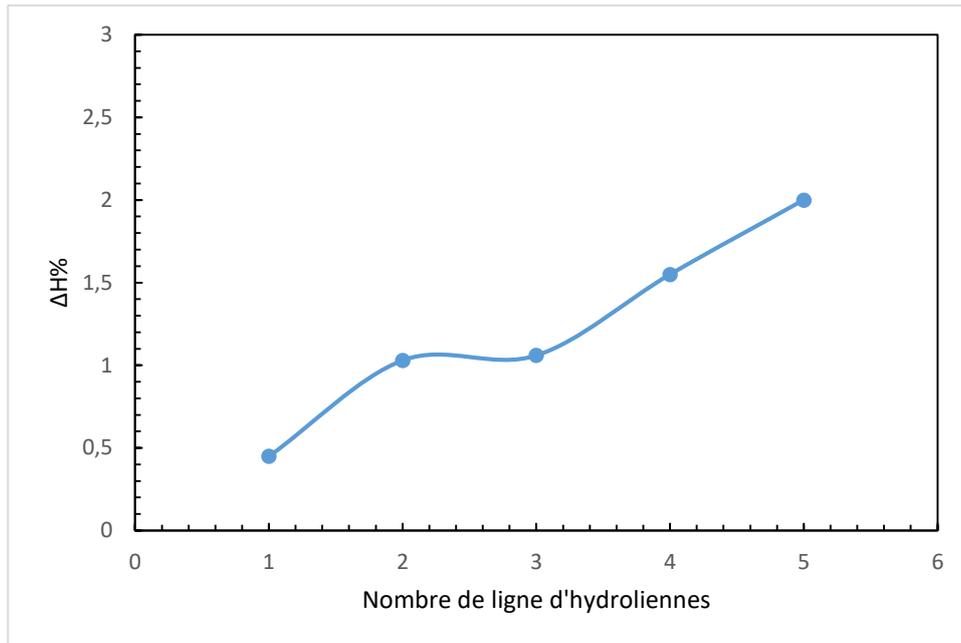
Figure III-15 Modèle avec 35 Hydroliennes

Tableau III-6. Tableau récapitulatif de la perte de charge en fonction du nombre d'hydroliennes

Débit (l/s)	Nombre d'hydroliennes	$\Delta H$ %	Débit (l/s)	Nombre d'hydroliennes	$\Delta H$ %	Débit (l/s)	Nombre d'hydroliennes	$\Delta H$ %
<b>58,00</b>	7	0,45	<b>76,00</b>	7	0,65	<b>111,00</b>	7	0,47
	14	1,02		14	0,88		14	0,90
	21	1,04		21	0,90		21	1,18
	28	1,53		28	1,76		28	1,45
	35	1,98		35	1,57		35	1,78

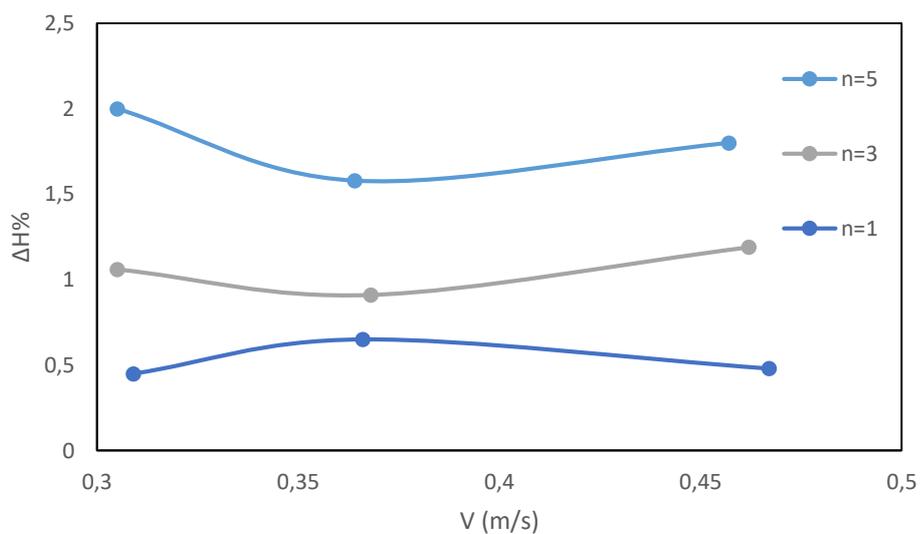
En se référant aux résultats obtenus et enregistrés dans les tableaux ci-dessus, il a été remarqué que l'écoulement dans le canal se caractérise par une perte de charge qui est liée à la présence des hydroliennes. Cette perte de charge croît avec le nombre d'hydroliennes malgré que cette dernière soit faible et n'atteint même pas les 2% dans le cas le plus défavorable. (Tab. III-6)

Ainsi, à partir du tableau (III-6), on peut facilement remarquer que la perte de charge augmente avec l'augmentation du nombre d'hydrolienne. Ceci veut dire que l'énergie consommée par les hydroliennes pour produire de l'énergie électrique augmente proportionnellement avec l'accroissement du nombre des hydroliennes.



FigureIII-16- Perte de charge en fonction du nombre de ligne d'hydroliennes

Le graphique (III-16) qui représente la perte de charge en fonction du nombre d'hydroliennes, fait remarquer que la perte de charge augmente au fur et à mesure que le nombre d'hydroliennes croît. Ceci montre que l'hydrolienne implique une perte de charge qui est transformée en énergie mécanique. Selon la courbe obtenue, on constate un décalage brusque dans la perte de charge quand on dépasse les deux lignes d'hydroliennes, ceci indique qu'au-delà d'un certain nombre d'hydrolienne la perte de charge se stabilise. Il est possible que les premières valeurs de la perte de charge correspondent à la somme de la perte de charge avant et après l'installation des hydroliennes.



FigureIII-17- Perte de charge en fonction du nombre de ligne d'hydroliennes

Le graphique (III-17) montre l'effet de la vitesse sur la perte de charge, on remarque que la perte de charge croît quand la vitesse augmente, cet accroissement est plus exprimé pour les vitesses de l'écoulement supérieure à environ 0,37 m/s. Cependant, pour les vitesses inférieures on remarque une contradiction dans les résultats, ceci peut être à cause des difficultés de mesures rencontrées pendant l'expérimentation.

### ***III-7. Conclusion***

L'étude expérimentale a été réalisée sur cinq variantes de disposition d'hydroliennes en fonction du nombre d'hydroliennes et de lignes d'installation. Les résultats obtenus ont affirmés que l'installation des hydroliennes à travers un cours d'eau provoque une perte de charge de faible incidence sur l'écoulement. Ceci montre d'une part l'intérêt de l'utilisation des hydroliennes pour la production de l'énergie et d'autre part, que l'intensification du nombre d'hydrolienne à un intérêt sur le rendement de l'installation. Il est aussi remarqué que les hydroliennes participent à l'accroissement de la perte de charge lors d'un écoulement dans un canal, cette perte de charge correspond en grande partie à la transformation d'une fraction de l'énergie totale en énergie mécanique par le biais des hydroliennes.

## **Conclusion Générale**

Les hydroliennes ont pour objectif de récupérer une fraction de l'énergie cinétique de l'écoulement dans les cours d'eau naturels ou artificiels fluviaux ou marins. Pour produire de l'énergie, les hydroliennes auront besoin d'une vitesse de courant supérieure à 1m/s en moyenne. Ainsi des ressources potentielles existent en milieu fluvial et en canaux artificiels à condition d'assurer un écoulement permanent ou un écoulement intermittent planifié.

La synthèse sur la théorie des écoulements à surface libre a permis d'avoir une idée générale sur l'écoulement dans les canaux et par conséquent, la compréhension des différentes caractéristiques hydrauliques des écoulements à surface libre.

Dans le but de vérifier l'impact des hydroliennes sur l'écoulement dans un canal à ciel ouvert, il était fondamental de choisir un modèle compatible avec les conditions réelles de l'installation d'un parc d'hydroliennes. A cet effet, le dimensionnement du modèle qui a fait l'objet d'étude expérimentale s'est basé sur un prototype qui possède des caractéristiques compatible avec un cas réel de champs d'implantation d'hydrolienne.

L'étude expérimentale a été réalisée sur cinq variantes en fonction du nombre d'hydroliennes contenu dans une ligne et du nombre de lignes. Les résultats obtenus ont montrés que l'installation des hydroliennes à travers un cours d'eau provoque une perte de charge de faible incidence sur l'écoulement. Ceci montre d'une part l'intérêt de l'utilisation des hydroliennes pour la production de l'énergie et d'autre part, que l'intensification du nombre d'hydrolienne à un intérêt sur le rendement de l'installation. Il est aussi remarqué que les hydroliennes participent à l'accroissement de la perte de charge lors d'un écoulement dans un canal, cette perte de charge correspond en grande partie à la transformation d'une fraction de l'énergie totale en énergie mécanique par le biais des hydroliennes.

Finalement on peut conclure que les hydroliennes ont un effet sur l'écoulement par le rehaussement de la ligne d'eau au niveau de la zone d'installation des hydroliennes et participent faiblement à l'accroissement de la perte de charge. Cette perte de charge correspond en grande partie à la transformation d'une fraction de l'énergie totale en énergie mécanique par le biais des hydroliennes.

Ce travail original ne représente qu'une étude préliminaire de l'effet des hydroliennes sur l'écoulement. Et peut être considéré comme une initiation à l'étude des

## LISTE DE NOTATIONS

<b>SYMBOLE</b>	<b>DESIGNATION</b>	<b>UNITE</b>
$U_{\text{eau}}$	La masse volumique de l'eau	[kg]
$U_{\text{air}}$	La masse volumique de l'air	[Kg]
$\rho_{\text{eau}}$	La viscosité de l'eau	[ - ]
$\rho_{\text{air}}$	La viscosité de l'air	[ - ]
$P_{\text{eau}}$	puissances du l'eau	[Wat]
$P_{\text{air}}$	puissances du l'air	[Wat]
$P_{\text{fluide}}$	Puissance du fluide.	[Wat]
$\rho$	masse volumique du fluide.	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S$	Section égale au maitre couple d'une hydrolienne en l'absence de celle-ci	[m <sup>2</sup> ]
$D$	le diamètre du rotor	[m]
$v$	la vitesse du courant.	[m/s]
$P$	La puissance de l'hydrolienne	[wat]
$C_p$	$C_p$ : coefficient de performance de l'hydrolienne	[-]
$E$	l'énergie cinétique	[wat]
$\zeta$	l'angle de lacet	[30°]
$U_0$	la vitesse de référence	[m/s]
$U$	la vitesse de l'écoulement	[m/s]
$Y$	la hauteur par rapport au fond	[m]
$Y_0$	la hauteur de la vitesse de référence	[m]
$n$	le coefficient du profil	[-]
$\rho$	La masse volumique	[g/l]
$m$	la masse	[g]
$V$	le volume	[l]
$\gamma_w$	Le poids volumique	[kg /m <sup>3</sup> ]
$P$	la pression	[par]
$H_p$	la charge en un point	[m .c .e]
$v$	la vitesse	[m/s]
$\alpha$	l'angle du fond avec l'horizontale	[ ]°
$\beta$	Le coefficient	[-]
$g$	L'accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$\tau_0$	la force de frottement	[force]
$J$ ou $i$	La pente de fond du canal	[-]
$J_w$	La pente piézométrique ou pente de la surface libre	[-]
$\theta$	l'inclinaison de la pente	[-]
$F$	nombre de Froude	[-]
$Q$	le débit évacue	[m]
$B$	largeur au miroir	[m]
$z$	L'altitude	[m]
$S$	section mouille	[m <sup>2</sup> ]
$q_1$	le débit entrant dans le volume fictif	[m/s <sup>3</sup> ]
$q_2$	le débit sortant de ce même volume fictif	[m/s <sup>3</sup> ]
$S_1$	La section amont	[m]
$S_2$	La section aval	[m]

## Notations

$C$	le coefficient empirique, dit de Chézy	$[m^{1/2}/s]$
$Rh$	le rayon hydraulique	$[m]$
$h_n$	la hauteur normale	$[m]$
$V_c$	La vitesse critique	$[m]$
$S_c$	La section critique	$[m]$
$B$	Largeur de canal	$[m]$
$I_c$	pente critique	$[m]$
$DH$	le diamètre hydraulique	$[m]$
$C$	le coefficient de Manning	$[-]$
$A$	coefficient de résistance	$[-]$
$R_e$	Le nombre Reynolds	$[-]$
$\mu$	la viscosité du fluide	$[-]$
$\varepsilon$	la hauteur équivalente des rugosités des parois	$[-]$
$H$	Charge hydraulique totale	$[m]$
$U$	Vitesse moyenne	$[m/s^2]$
$P$	Pression moyenne dans la conduite	pascale
$Z$	Cote du point considéré	$[m]$
$Q$	Debite	$[m/s^3]$
$\mathcal{P}$	Masse volumique du liquide	$[kg/m^3]$

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- *COPYRIGHT © 2018 | MH MAGAZINE WORDPRESS THEME BY MH THEMES*
- *WALTER H.GRAF EN COLLABORATION AVEC M.S.ALTIKAR, VOLUME 16, HYDRAULIQUE FLUVIALE. WALTER H. VOLUME 16 «RIVER HYDRAULIQUES.*
- *(JOSE VASQUEZ (LABORATOIRE SYSTEMES HYDRAULIQUES URBAINS) ENGEES)*
- *TRAITE D'HYDRAULIQUE A SURFACE LIBRE : GERARD DEGOUTTE)*
- *(BAKHMETEFF, 1932)*
- *(A HANDBOOK OF GRAVITY-FLOW WATER SYSTEM, THOMAS D. JORDAN) JNR., INTERMEDIATE TECHNOLOGY PUBLICATIONS (I.T.) 1980 (250 P.), OUVRAGE CHAUDEMENT RECOMMANDE PAR PIERRE)*
- *ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG ; (JOSE VASQUEZ (SYSTEMES HYDRAULIQUES URBAINS – ENGEES) (JOSE VASQUEZ (SYSTEMES HYDRAULIQUES URBAINS)*
- *((ECOULEMENT UNIFORME LE CON 2 : NOTIONS DE BASE  
[HTTPS://SITES.UCLOUVAIN.BE/DIDACTICIELHYDRAULIQUE/LECONS/LECON](https://sites.uclouvain.be/didacticielhydraulique/lecons/lecon)))*
- *(E. CRAUSSE, 1951). HYDRAULIQUE DES CANAUX DECOUVERTS EN REGIME PERMANENT ETIENNE CRAUSSE, L ESCANDE PUBLISHED IN 1951 IN PARIS BY EYROLLES MORE FROM ETIENNE CRAUSSE et L ESCANDE*
- *HYDRAULIQUE GENERALE ET APPLIQUEE. (CARLIER 1980).*
- *SAAD BENNIS HYDRAULIQUE ET HYDROLOGIE 3EME EDITION (PRESSES DE L'UNIVERSITE DU QUEBEC)*
- *WALTER H. GRAF EN COLLABORATION AVEC M. S. ALTINAKAR(1993), HYDRAULIQUE FLUVIAL. TOME 1, ECOULEMENT PERMANENT UNIFORME ET NON UNIFORME PRESSES POLYETHNIQUE ET UNIVERSITAIRE ROMANDE*
- *(ASTARITA, G., MARRUCCI, G., ET PALUMBO, G., (1964)) (NON-NEWTONIAN GRAVITY FLOW ALONG INCLINED PLANE SURFACES. IND. ENGG. CHEM. FUNDLS, 3; 333-339)*
- *S.E. BEN ELGHALI, “MODELISATION ET COMMANDE D'UNE HYDROLIENNE*

*EQUIPEE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION,"*  
*CONFERENCE DES JEUNES CHERCHEURS EN GENIE ELECTRIQUE –*  
*JCGE'08, LYON, DECEMBRE 2008.*

- *(MAMADOU DANSOKO 2014) MODELISATION ET COMMANDE NON LINEAIRE DES HYDROLIENNES COUPLEES A UN RESEAU ELECTRIQUE. TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'IMAGE. UNIVERSITE PARIS-NORD - PARIS XIII, 2014. FRANÇAIS. <NNT : 2014PA132047>. <TEL-01274264>*
- *DIVERS ASPECTS DE L'EXPLOITATION DE L'ENERGIE DES COURANTS MARINS J.F. DAVIAU – H. MAJASTRE - HYDROHELIX ENERGIES F. GUENA – SOFRESID ENGINEERING J. RUER – SAIPEM SA PUBLICATION SEATECH WEEK (CORRIGEE) – BREST - 20-21 OCTOBRE 2004*
- *ENERGIE RENOUEVELABLE - 10-04-18 PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DE L'HYDROLIENNE ADELINE .M.*
- *HYDROLIENNES A FLUX TRANSVERSE : DEVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE HARVEST EN CANAL 13 DECEMBRE 2011*
- *AVANTAGES ET INCONVENIENTS RESPECTIFS DE HYDROLIENNES PAR SERGE BAILLARGEON LE 7 FEVRIER 2015 DANS ECOLOGIE*
- *ARTICLE : 068 LES HYDROLIENNES MAÎTRE THIERRY 2015 – DECEMBRE*
- *L'ENERGIE DES COURANTS DE MAREE – LES HYDROLIENNES JACQUES RUER - MARS 2016*
- *ÉTUDE CFD DES EFFETS DU DESALIGNEMENT ET DU SAILLEMENT SUR LES PERFORMANCES ET LE CHARGEMENT DES HYDROLIENNES MEMOIRE CHRISTIAN PERRON MAITRISE EN GENIE MECANIQUE MAITRE ES SCIENCES (M.SC.) QUEBEC, CANADA © CHRISTIAN PERRON, 2015*
- *(PIERRE MARNIER 2016) 13/04/2016 - L'ENERGIE HYDROLIENNE : L'AVENIR DES ENERGIES RENOUEVELABLES ET 16/12/20*