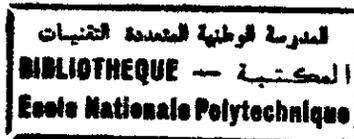


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

Département Hydraulique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

THEME

**LA DETERMINATION EXPERIMENTALE
DE LA LIGNE D'EAU DANS UN CONVERGENT
SYMETRIQUE ET NON SYMETRIQUE**

Proposé par :

**Mlle S. BENMAMAR
Mr S. HADDAD**

Présenté par :

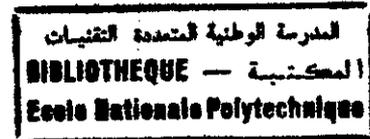
**Mr C. LABIOD
Mr K. KABOUCHE**

Dirigé par :

**Mlle S. BENMAMAR
Mr S. HADDAD**

Promotion juin 1998

REMERCIEMENTS



Nous tenons à remercier *Mlle S. BENMAMAR* notre promotrice qui a bien voulu mettre à notre disposition sa compétence en nous orientant pour l'élaboration de ce travail qu'elle trouve ici l'expression de nos profondes reconnaissances.

Nos remerciements également à *Mr S. HADDAD* pour ses précieux conseils le long de notre travail.

Que *Mr BERKANI, Mr BENZIADA, Mr BELHADJ, Mr NEBBACHE,* trouvent ici nos vifs remerciement pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Ce travail doit également beaucoup à *Mr A. BERREKSI, Nabil, Radouane et Meriem.*

A *Mr S. HANIN* chef du laboratoire d'hydraulique, ainsi qu'au personnel de la bibliothèque, en particulier, *KRIMO, SALAH,* qu'ils trouvent ici le témoignage de nos sincères reconnaissances.

Enfin nous remercions nos amis qui ont su rendre agréable notre séjour à Alger, en particulier, *RABAH, NASRO, SOFIAN, AMAR.*

Qui chacun à sa manière, nous a apporté concours, aides, services, réconfort et humour.

DEDICACES

*A ma grande-mère
A mes très chers parents*

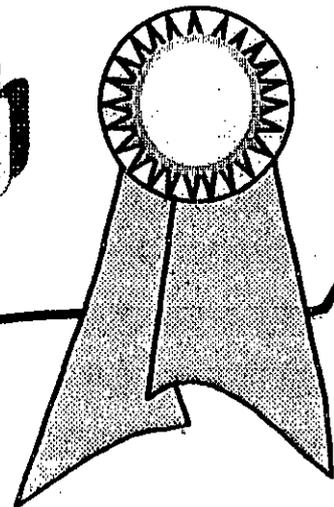
*A mes sœurs
A mes frères : Fouad et Ferhat*

*A toute ma famille
A tous mes collègues*

A tous ceux qui me sont chers (es)

Je dédie ce modeste travail

Chouaib



DEDICACES

A ma mère, à ma mère, à ma mère,

A mon père,

A mes sœurs et mes frères

A toute ma famille

A Raouf et Samir

A tous mes collègues

A tous ceux qui me sont chers (es)

Je dédie ce modeste travail

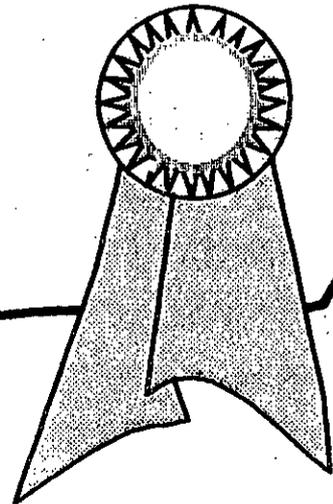
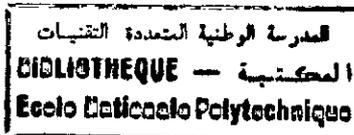


TABLE DES MATIERES



Chapitre I : INTRODUCTION GENERALE

I.1. Introduction générale.....	2
I.2. Généralité sur les écoulements à surface libre.....	3
I.2.1. Définition d'un écoulement à surface libre.....	3
I.2.2. Définition du nombre de Froude et l'onde superficielle.....	3
I.2.3. Classification des écoulements à surface libre.....	4
I.2.3.1. L'écoulement critique.....	4
I.2.3.2 L'écoulement fluvial.....	4
I.2.3.3 L'écoulement torrentiel.....	5
I.2.4. Définition d'un canal non prismatique.....	5
I.2.5. Présentation des écoulements dans les canaux non prismatiques.....	5

Chapitre II : ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES ECOULEMENTS A TRAVERS LES CANNAUX NON PRISMATIQUES

II.1. Introduction.....	8
II.2. Etude du Dawson et Col.....	8
II.3. Etude de D.P Rodriguez en 1943.....	14
II.4. Etude de M.P Barschdorf et H.G Woodbury en 1947.....	15
II.5. Etude de Frank Englund et Johs Munch-Peterson en 1953.....	17
II.6. Etude de Hager et Bretz.....	18
II.7. Etudes effectuées au département Hydraulique de l'E.N.P.....	18
II.7.1 Etude de Berreksi et Bouhadji (1993).....	18
II.7.2. Etude d'ABSI ET Retieb (1994).....	19
II.7.3. Etude d'Amghar et Morsali (1995).....	20
II.7.4. Etude d'Oukacha et Lechheb (1996).....	23
II.8. Etude de Mezanur et Chaudry (1997).....	24
II.9. Etude de Berreksi (1998).....	26

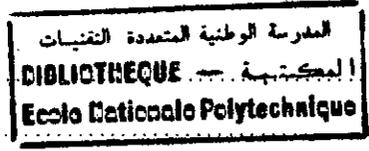
Chapitre III : LES PHENOMENES DE BASE



III.1. Introduction	30
III.2. Etudes des ondes transversales résultantes du changement de la direction d'un canal	30
III.3. Etude de l'écoulement dans les rétrécissements (convergenents) progressifs.....	32
III.3.1. Types de rétrécissements	32
III.3.2. Etude de l'écoulement fluvial dans un convergent symétrique en forme d'entonnoir.....	32
III.3.3. Etude de l'écoulement torrentiel traversant un convergent symétrique en forme d'entonnoir	34
III.3.4. Etude de l'écoulement supercritique dans un convergent non symétrique.....	37
III.4. Déviation brusque d'une paroi	38
III.5. Etude de l'écoulement dans un canal à forte pente	40
III.5.1. Influence de la pente sur la surface libre en cas d'un écoulement torrentiel.....	40
III.5.2. Etude de l'écoulement torrentiel dans un canal rétréci de pente considérable.....	41
III.6. Généralités sur les ressauts.....	43
III.6.1. Introduction	43
III.6.2. Définition d'un ressaut.....	43
III.6.3. Différents types de ressauts.....	43
III.6.4. Caractéristiques et classification des ressauts ondulés.....	44

Chapitre IV : ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction	48
IV.2. Installation expérimentale	48
IV.2.1. Réservoir	48
IV.2.2. Le premier canal prismatique.....	48
IV.2.3. La transition.....	51
IV.2.3.1. Convergent symétrique.....	51
IV.2.3.2. Convergent non symétrique.....	51
IV.2.4. Le deuxième canal prismatique.....	51
IV.3. Techniques de mesure	53



IV.3.1. Mesure de la hauteur d'eau.....	53
IV.3.2. Mesure de la pression au fond du canal.....	53
IV.3.3. Mesure du débit.....	53
IV.3.3.1. Présentation de l'appareil.....	53
IV.3.3.2. Principe de fonctionnement.....	53
IV.3.3.3. Conversion du débit.....	54
IV.3.3.4. Mesure de la vitesse.....	54
IV.4. Canevas de mesure.....	59
IV.5. Observations.....	60
IV.5.1. Convergent symétrique.....	60
IV.5.2. Convergent non symétrique.....	61
VI.6. Analyse des résultats.....	64
IV.6.1. Convergent symétrique.....	64
IV.6.2. Convergent non symétrique.....	76
Conclusion.....	90
Annexe	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Chapitre I

Introduction générale

I.1. Introduction générale :

L'étude de l'écoulement de l'eau à travers les canaux à ciel ouvert pose un problème complexe.

En effet, tout changement de section ou de direction d'un canal : rétrécissement ou élargissement, entraîne des perturbations et rend la surface libre d'écoulement irrégulière et ondulée.

Ces perturbations provoquent des ondes stationnaires à la surface libre de l'eau. De telles ondes sont appelées "ondes transversales", ou par analogie au dynamique du gaz "ondes de choc".

Aussi on relève que les ondes transversales sont habituellement présentées dans des canaux non prismatiques pour un écoulement en régime torrentiel (supercritique).

La complexité du phénomène nécessite de disposer des outils puissants, soit par modélisation numérique ou par modélisation physique (expérimentation) ou modélisation numérique ; qui sont devenues des démarches de base :

La modélisation est une caractéristique des études modernes

L'intérêt pratique de notre étude est de permettre un dimensionnement rationnel donc économique des murs bajoyers dans les différentes structures hydrauliques (exemple : la partie de réception des évacuateurs de crue à surface libre).

La présente étude consiste à déterminer expérimentalement l'allure de la ligne d'eau lors d'un écoulement à travers un convergent symétrique et non symétrique, à faible et à forte pente.

Pour atteindre cet objectif, les étapes suivantes ont été nécessaires :

- Un rappel de certaines définitions indispensables à la compréhension du texte.
- Puis on a fait une synthèse bibliographique répartie sur deux chapitres :

*Le premier a concerné essentiellement les différentes études soit expérimentales ou numériques, effectuées sur les écoulements à travers les convergents, avec présentation des résultats obtenus.

Tandis que le second passe en revue les différents phénomènes de base qui règnent à la surface libre dans le cas d'un écoulement à travers la transition. Notre attention s'est portée particulièrement sur l'étude des ondes transversales étroitement liées à la présente étude.

- Une étude expérimentale sera l'objectif du chapitre VI, qui permettra la détermination de l'allure de la surface libre dans le convergent pour les deux variantes symétrique et non symétrique. Chaque série d'essais a été réalisée pour un débit donné et une pente fixée.
- Enfin les résultats expérimentaux obtenus ont servi à donner une analyse et comparaison avec les études antérieures afin de confirmer la présence de tel phénomène. Cette approche expérimentale, nous a permis d'examiner l'influence de la pente et du débit sur la ligne d'eau, notamment le profil de la vitesse et la pression le long de l'axe de l'écoulement et aux parois latérales.

I.2. Généralités sur les écoulements à surface libre

I.2.1. Définition d'un écoulement à surface libre : [5], [7] et [10]

Les écoulements à surface libre sont caractérisés par l'existence d'une surface de séparation entre le liquide et le gaz qui est l'air, généralement soumise à la pression atmosphérique.

L'écoulement à surface libre est généralement produit par l'effet de la gravité, son mécanisme est compliqué car la forme de la surface qui limite le domaine occupé par le fluide est généralement inconnue.

Les écoulements à surface libre sont généralement classés suivant plusieurs paramètres [10].

- permanent ou non permanent suivant le temps.
- Uniforme ou varié suivant l'espace.
- Torrentiel ou fluvial suivant le rapport des forces d'inertie aux forces de gravité qui s'appelle dans le domaine de la similitude hydraulique : le nombre de Froude.

Pour citer cette classification, il est nécessaire de définir le nombre de Froude et l'onde superficielle.

I.2.2. Définition du nombre de Froude et l'onde superficielle :

Le nombre de Froude d'un écoulement à surface libre représente le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse de propagation d'une onde superficielle infiniment petite le long du courant considéré [5].

La variabilité dans le temps d'un écoulement à surface libre se manifeste par les ondes de gravité à la surface libre (superficielle). On considère les ondes de faible amplitude ou de grande longueur d'onde. [10].

La vitesse de propagation de l'onde superficielle s'exprime par la formule suivante :

$$a = \sqrt{gh} \dots\dots\dots(1).$$

h : le rapport de la section mouillée et de la longueur en surface, qui devient profondeur d'écoulement dans le cas d'un canal rectangulaire [11].

g : accélération de la pesanteur.

Cette formule s'obtient par l'application de l'équation de continuité et le théorème d'Euler dans un repère lié à l'onde, en supposant que l'écoulement est permanent [5].

Finalement, le nombre de Froude s'exprime par la formule :

$$F = \frac{V}{a} = \frac{V}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots(2).$$

V : la vitesse moyenne de l'écoulement, a : la vitesse de propagation des ondes superficielle.

1.2.3. Classification des écoulements à surface libre : [5]

1.2.3.1. L'écoulement critique :

L'écoulement critique dans un canal bidimensionnel est défini par sa hauteur critique, qui s'exprime par la formule suivante :

$$h = h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \dots\dots\dots(3).$$

q : le débit d'écoulement par unité de largeur, g : Accélération de gravité,

h_c : la hauteur critique.

Dans ce cas, la vitesse moyenne de l'écoulement est égale à la vitesse de propagation des ondes.

1.2.3.2. L'écoulement fluvial (subcritique) :

L'écoulement fluvial est caractérisé par :

- La hauteur d'eau est supérieure à la hauteur critique.

- La vitesse moyenne (v) est inférieure à la vitesse critique (v_c). C'est à dire : $v < \sqrt{gh_c}$.
- Le nombre de Froude est inférieur à l'unité.
- Les ondes superficielles peuvent remonter vers l'amont.

I.2.3.3. L'écoulement torrentiel (supercritique) :

L'écoulement torrentiel (supercritique) est caractérisé par :

- La hauteur d'eau est inférieure à la hauteur critique.
- La vitesse moyenne (V) est supérieure à la vitesse critique (V_c).
c'est à dire : $v > \sqrt{gh_c}$.
- Le nombre de Froude est supérieur à l'unité.
- Les ondes superficielles ne peuvent remonter vers l'amont.

I.2.4. Définition d'un canal non prismatique : [5]et [7]

On appelle un canal non prismatique si :

- les génératrices du canal ne sont pas parallèles entre elles.
- La forme du canal présente des changements de section le long de l'écoulement produisant soit une convergence, soit une divergence, qui peuvent être progressives ou brusques.
- Les canaux non prismatiques sont souvent utilisés sur une courte distance, c'est pour cela d'ailleurs qu'on les désigne souvent sous le nom de transition.
- Leur présence engendre des instabilités à la surface libre de l'écoulement.

I.2.5. Présentation des écoulements dans les canaux non prismatiques :

Les écoulements fluviaux à travers les canaux non prismatiques tels que les convergents sont caractérisés par une surface libre plus ou moins stable, ce qui facilite la résolution de plusieurs problèmes [12].

Par contre les écoulements torrentiels entraînent des particularités du type onde, qui constituent des problèmes caractéristiques le long du canal. Ainsi chaque obstacle dans le

canal ou variation de la direction l'écoulement crée de grandes perturbations qui provoquent des ondes stationnaires à la surface libre de l'eau (creux ou - ce qui est plus dangereux - surélévation). Donc, il devient indispensable de chercher les moyens permettant d'éviter ou au moins de réduire la formation de ces ondes, qui nécessitent dans la plupart des cas une revanche supplémentaire.

Chapitre II

***Etat de connaissance sur les écoulements à
travers les canaux non prismatiques***

II.1. Introduction :

La surface libre des écoulements dans les canaux non prismatiques, présentent des perturbations distinctes, le long de la zone de transition tel que la propagation des ondes transversales, qui peuvent conduire à des complications si leur hauteur est considérable.

En effet, plusieurs chercheurs ont tenté d'étudier ce type d'écoulement avec toute sa complexité, afin de trouver les moyens nécessaires permettant la réduction des ondes transversales.

II.2. Etude d'IPPEN et DAWSON : [12]

En 1943, Dawson en collaboration avec Rodriguez, Coles et Shintaku ont étudié les écoulements torrentiels et fluviaux à travers les changements des sections des canaux à ciel ouvert, ils ont conçu un premier modèle de convergent en forme de tuyère (figure.1 ci-dessous), qui est d'après les auteurs, une forme représentative des canaux à ciel ouvert.

Les caractéristiques géométriques de ce modèle sont :

- La largeur d'entrée (b_1) est égale à 61 cm.
- La largeur de sortie (b_3) est égale à 31 cm.
- La longueur du convergent (l_c) est égale à 39 cm.
- L'angle central (point de changement de la courbure) est égal à 16° .
- Les Rayons de courbure d'entrée et de sortie (R_1 et R_2) sont égaux à 190,5 cm.

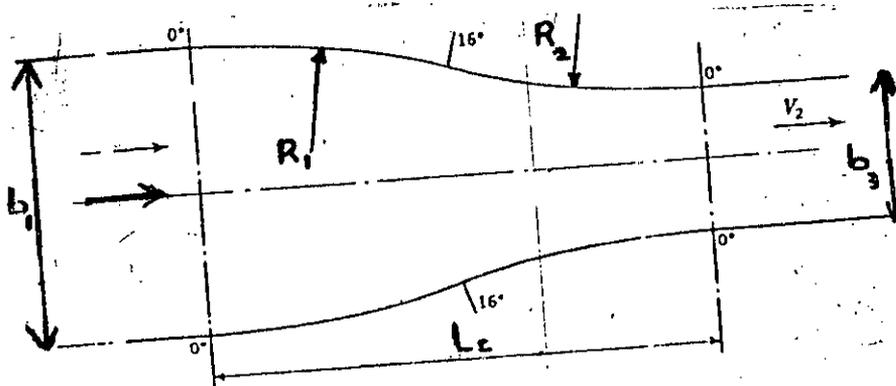


Figure (1) : Rétrécissement en forme de tuyère.

- Les contraintes tangentielles au fond du canal sont prépondérantes sur les autres contraintes.

- Accélération de Coriolis est négligée.

Le modèle numérique obtenu, en utilisant la méthode des différences finies permet l'analyse des écoulements à travers les transitions.

Ainsi l'analyse d'un écoulement torrentiel dans un convergent (figure 11) a donné les résultats présentés sur les figures 12, page 20, et figure 14, page 21.

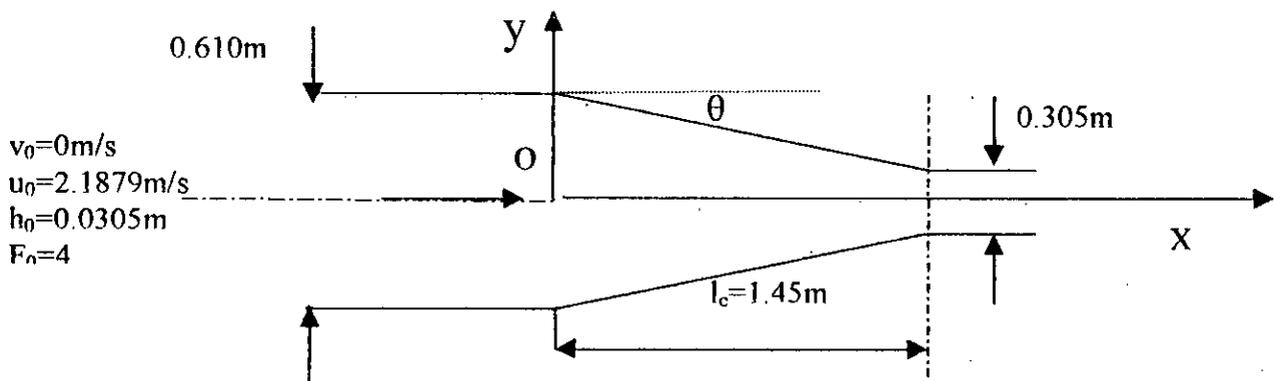


Figure (11) : Schéma d'un convergent utilisé pour la validation des modèles numériques

u_0 , v_0 , h_0 et F_0 sont respectivement la vitesse selon OY, la vitesse selon OX, la profondeur, et le nombre de Froude à l'entrée du convergent.

Ils ont conclu que la simulation numérique de la ligne d'eau le long de la paroi donne des résultats satisfaisants bien que ce ne soit pas le cas pour l'axe médian du canal ou l'hypothèse d'une distribution hydrostatique des pressions n'est plus valide (présence d'onde de choc)

II.7.2. Etude d'ABSI et RETIEB (1994) :[1]

ABSI et RETIEB ont présenté une thèse d'ingénieur, dans laquelle ils ont analysé les problèmes de diffraction bidimensionnelle d'un mascaret en régime instationnaire, en utilisant les équations d'un écoulement bidimensionnel graduellement varié et non permanent à surface libre.

Le but de cette étude est de définir les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement à surface libre dans les zones de transition.

L'expérimentation numérique qui a été faite sur un écoulement torrentiel traversant le convergent indiqué sur la figure (11) a donné les résultats schématisés sur la figure12, page20 et la figure14, page 21 .

II.7.3. Etude d'AMGHAR et MORSALI(1995) :[2]

La simulation des écoulements supercritiques bidimensionnels et à surface libre a été faite en 1995 par AMGHAR et MORSALI en employant la méthode des éléments finis.

Dans le but de valider leur modèle, ils ont analysé l'écoulement torrentiel dans un rétrécissement (figure 11, page 18).

Les résultats obtenus sont schématisés sur la figure12, page20 et la figure13, page 21 .

Ils ont constaté que leur modèle et les modèles numériques précédents présentent presque les même surélévations importantes.

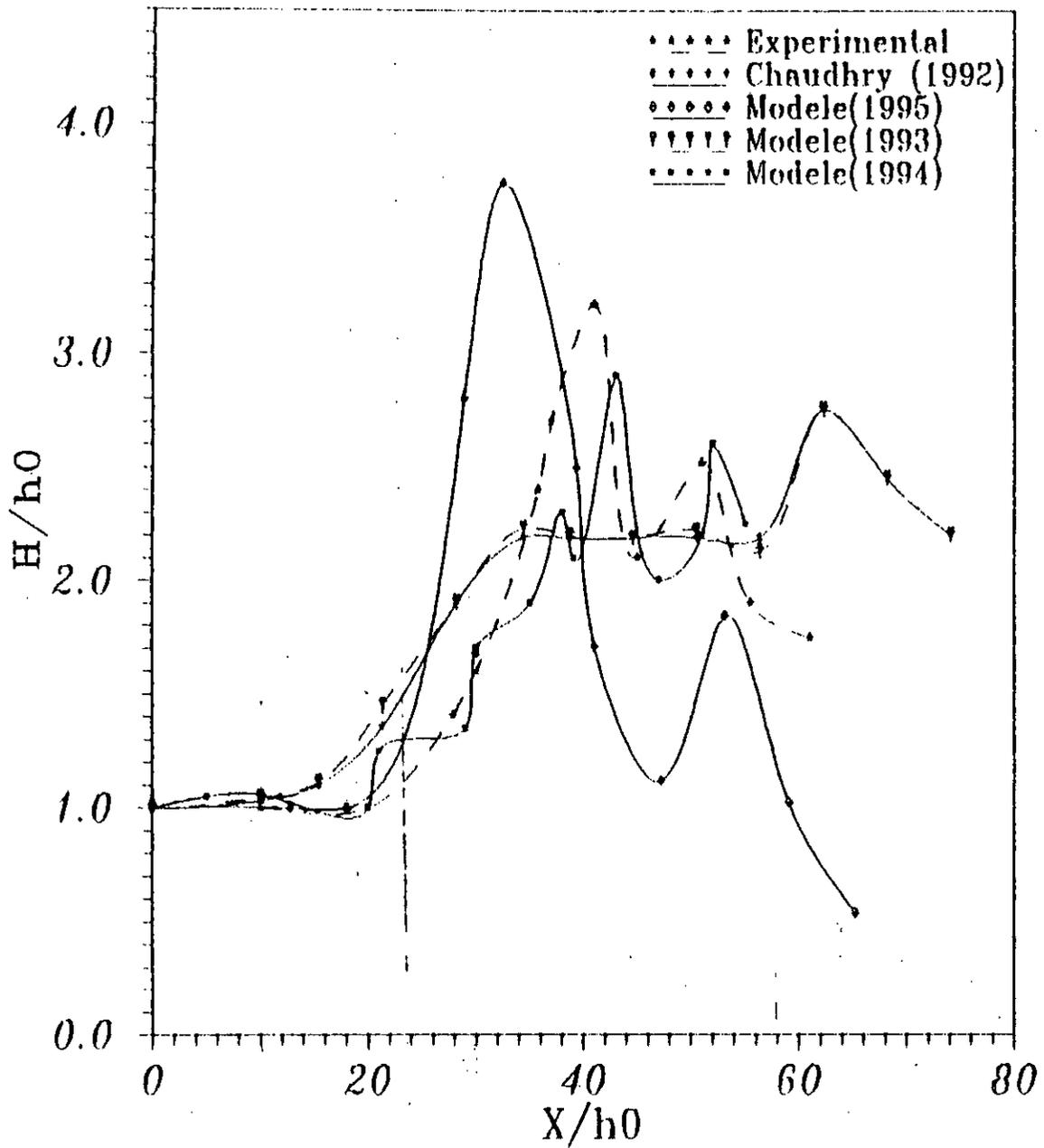


Figure (12) : La ligne d'eau le long de l'axe dans un convergent rectiligne

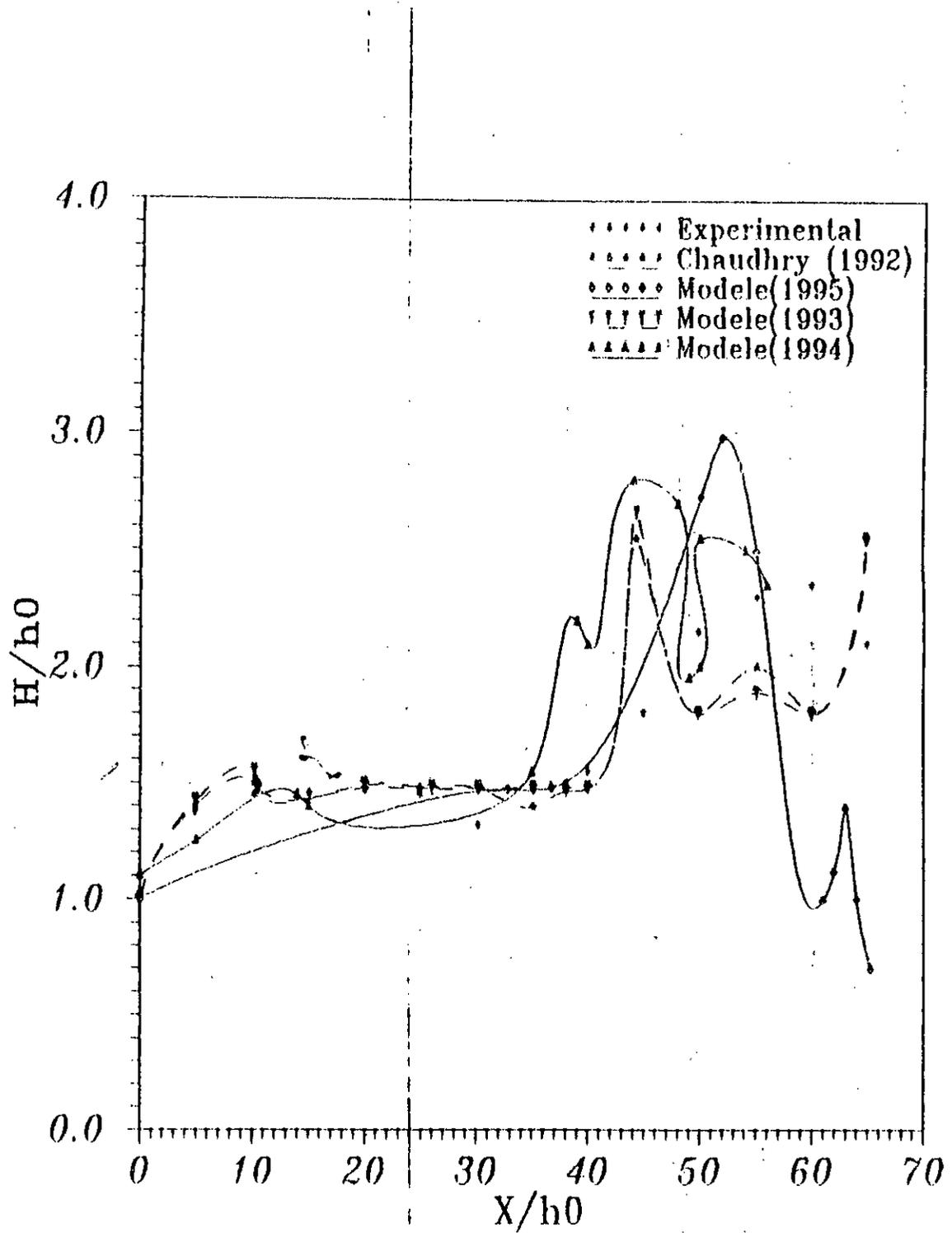


Figure (13) : La ligne d'eau le long de la paroi dans un convergent rectiligne

II.7.4. Etude d'OUKACHA.M et LECHHEB.M (1996) :[16]

D'autre part, en 1996 OUKACHA et LECHHEB ont présenté une thèse d'ingénieur, qui a comme objectif : la détermination de la ligne d'eau dans les canaux non prismatiques et à forte pente.

L'analyse de l'écoulement torrentiel dans un rétrécissement (figure 11, page 18), a donné les résultats schématisés sur les figures 14 et 15 (page 23,24) respectivement.

Ils ont constaté la grande influence de la ligne d'eau, sous l'effet d'une forte pente. Ceci est traduit par de faibles profondeurs et le danger de dépression, ainsi d'une réduction de l'ampleur des agitations au niveau de la surface libre.

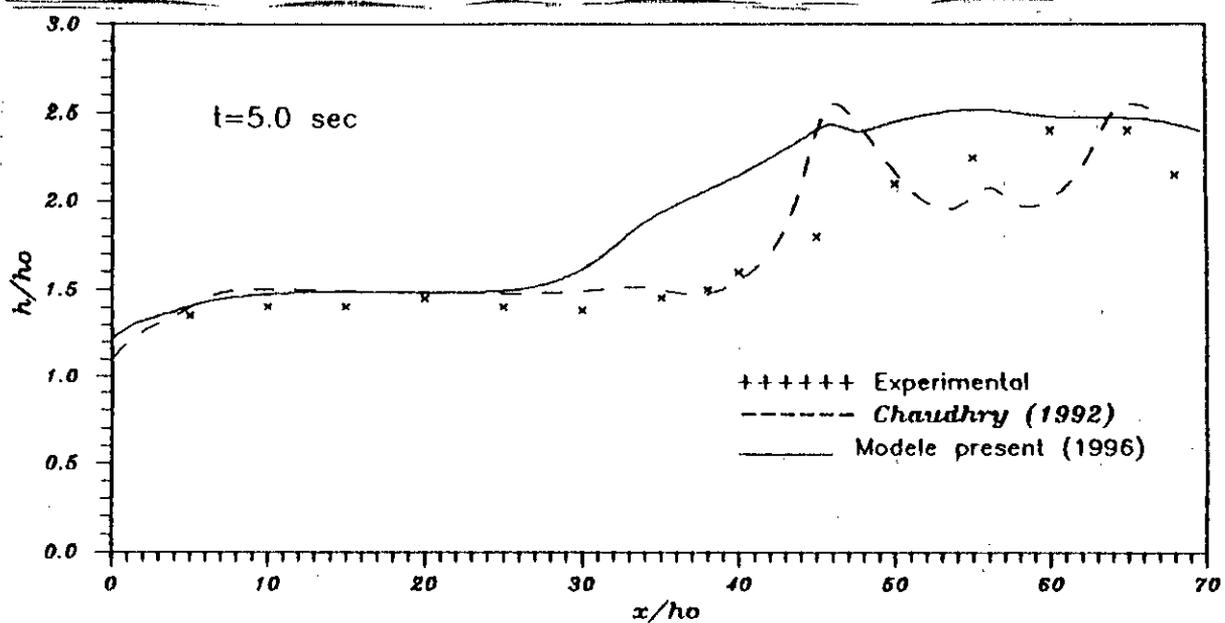


Figure (14) : Ligne d'eau le long de la paroi dans un convergent rectiligne

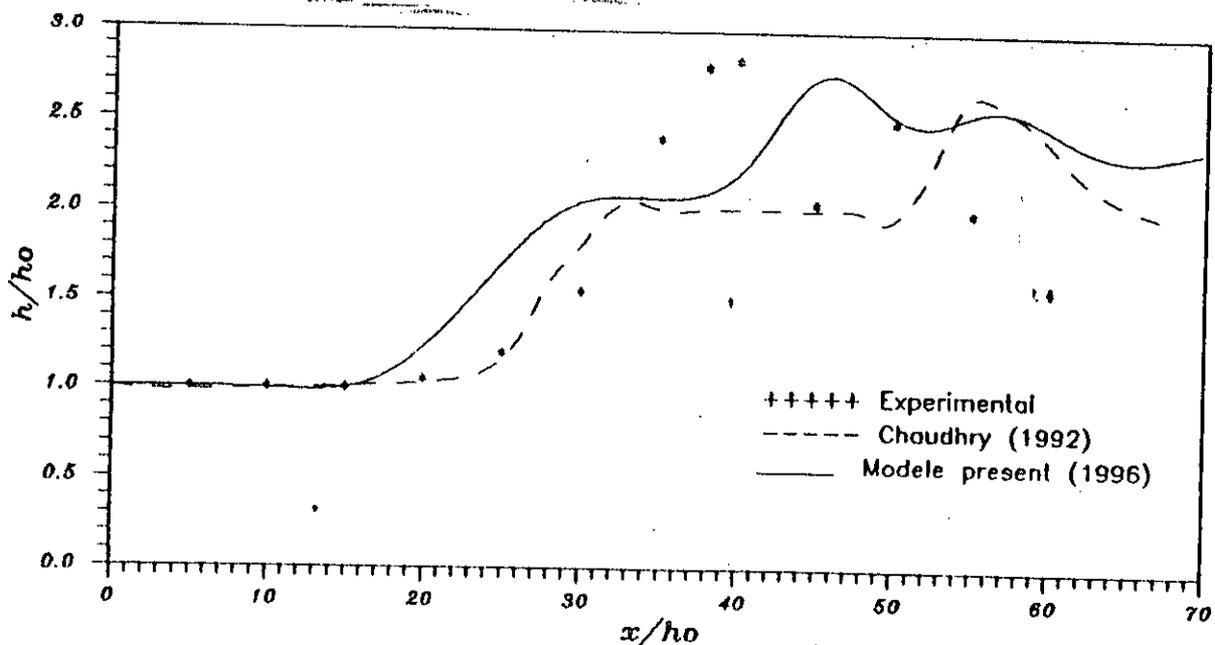


Figure (15) : Ligne d'eau le long de l'axe dans un convergent rectiligne

II.8. Etude de MEZANURE et CHAUDRY(1997) : [16]

L'étude est basée sur la simulation numérique des écoulements dans les changements de section de canaux à surface libre ; elle n'est réalisée qu'en s'aidant de la forme différentielle des équations de saint-venant, cette forme est établie par une application des principes de conservation de la masse et de quantité de mouvement, pour un écoulement peu profond.

Ceci ne peut se faire qu'en s'appuyant sur les hypothèses suivantes :

- Répartition hydrostatique de pression.
- Répartition uniforme de vitesse le long de la profondeur.
- Pente faible du radier de canal.
- Négligence de l'accélération verticale.

A fin de compléter cette étude, ils ont utilisé la méthode des différences finis avec un schéma explicite prédicteur-correcteur de Mac Cormack du second ordre.

L'analyse d'un écoulement torrentiel dans un convergent symétrique à section transversale rectangulaire dont les dimensions sont données sur la figure 11 (page 18) a donné les résultats schématisés sur les figures (16) et (17) ci-dessous.

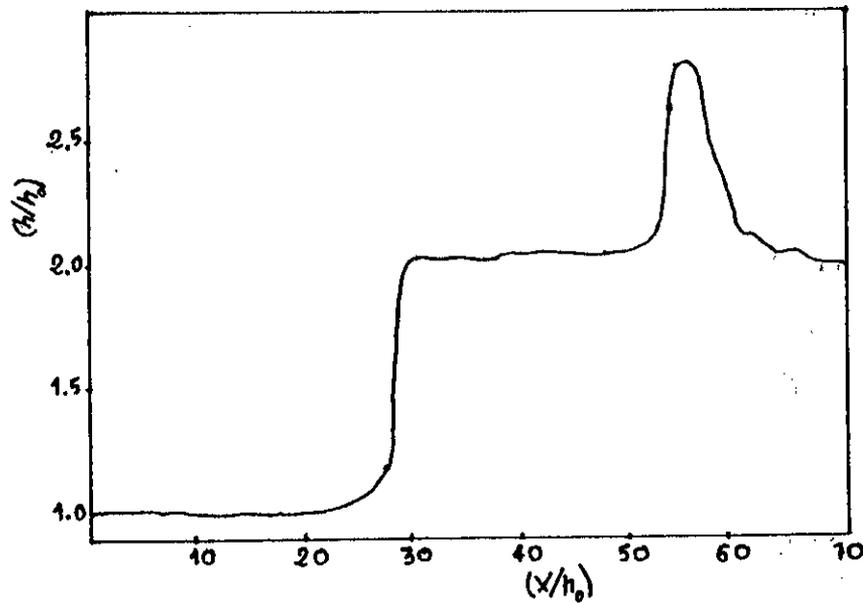


Figure. (16) : ligne d'eau le long de l'axe de l'écoulement dans le convergent.

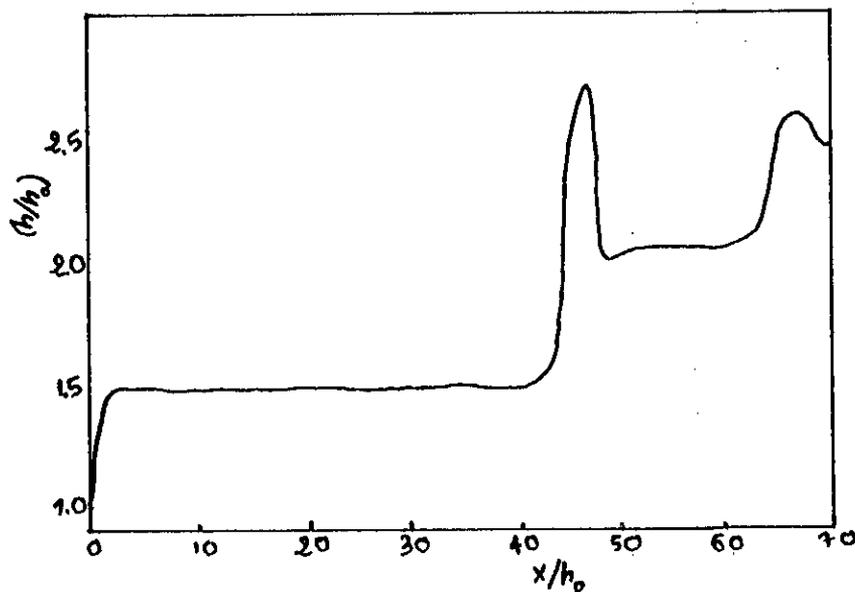


Figure.(17) : ligne d'eau le long de la paroi dans le convergent.

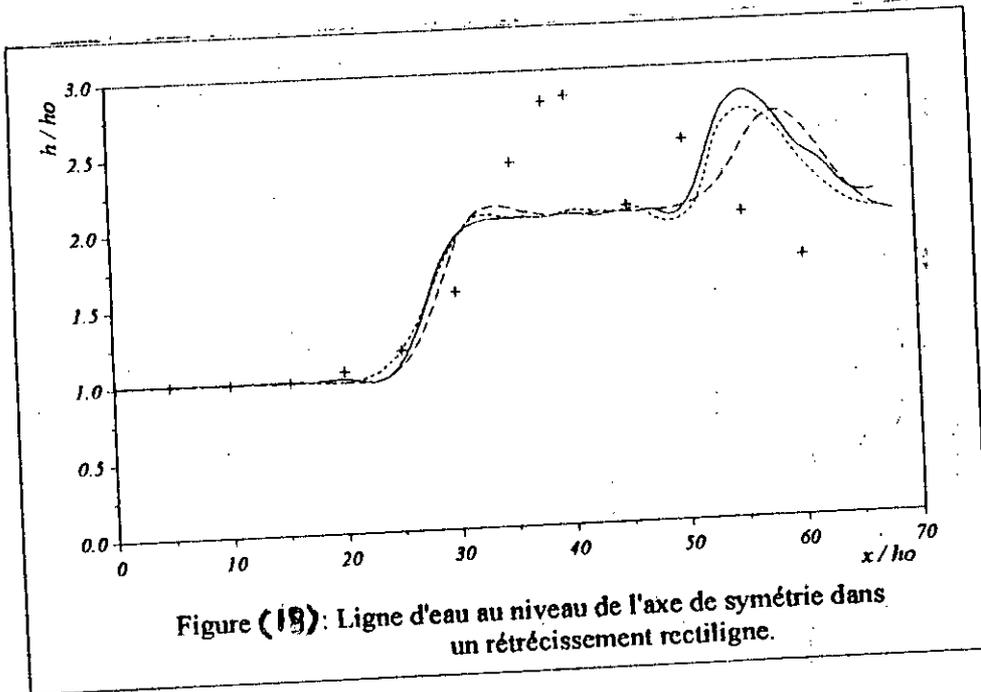
II.9. Etude de BERREKSSIA (1998) : [4]

BERREKSSIA a présenté une thèse de magister, dans laquelle, il a donné une simulation des écoulements à surface libre dans les canaux à faible et à forte pente à géométrie variable. Son objectif principal consiste à la détermination de la allure de la surface libre, pour cela, il a utilisé deux schémas aux différences finies explicites du type prédicteur-correcteur précis à l'ordre 2, à savoir le schéma de Macormak et de Gabutti.

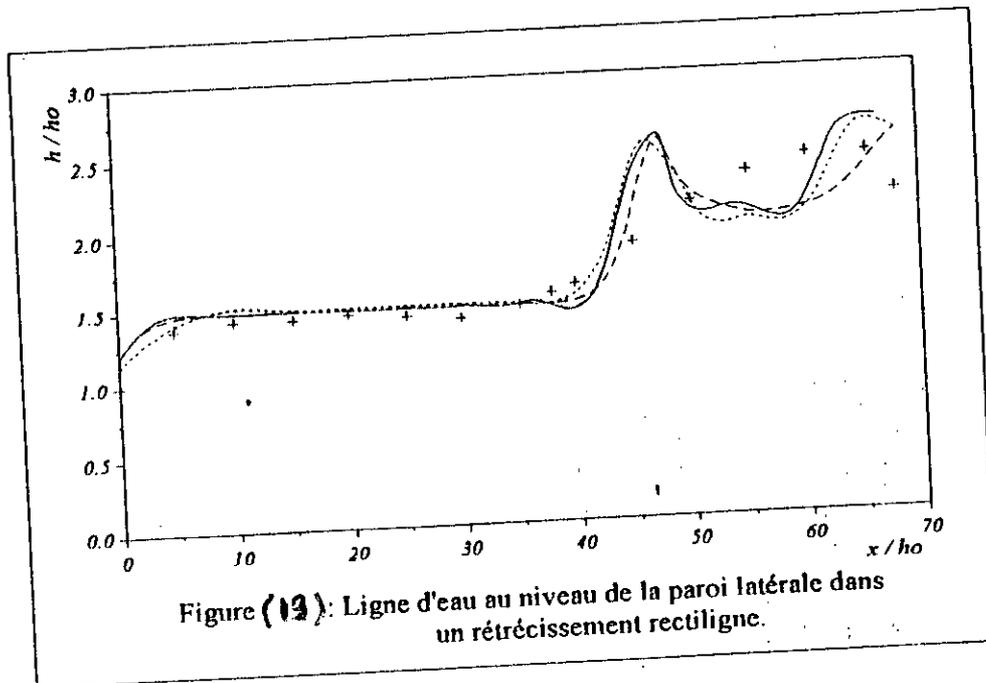
Le calcul de la ligne d'eau le long des parois d'un convergent rectiligne symétrique a donné des résultats représentés sur les figures (18÷23) pages (26÷28) satisfaisants avec les deux schémas numériques au niveau de la paroi latérale, et de moins bons résultats le long de l'axe du canal.

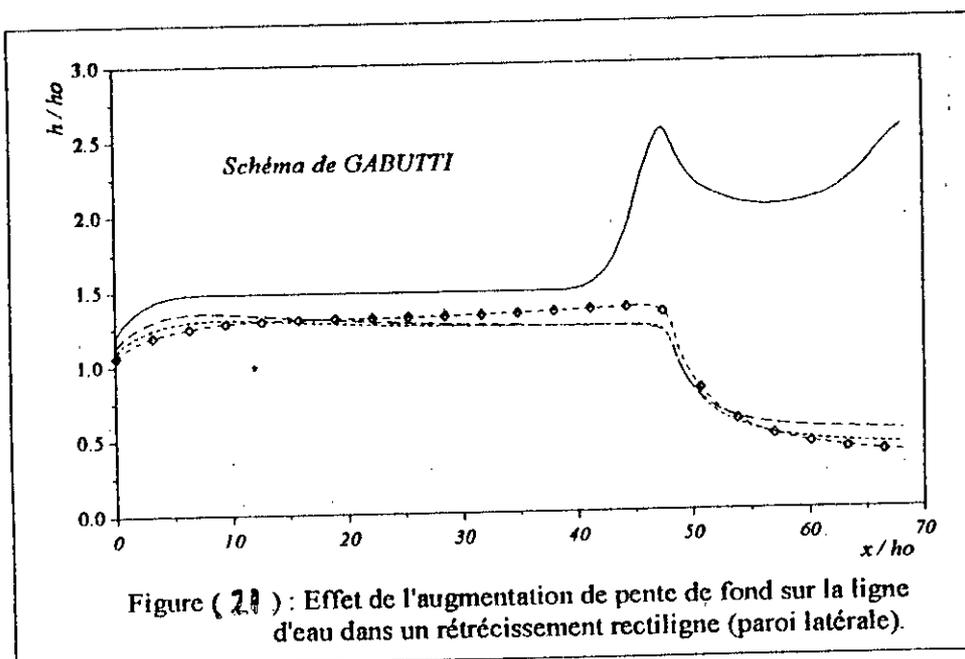
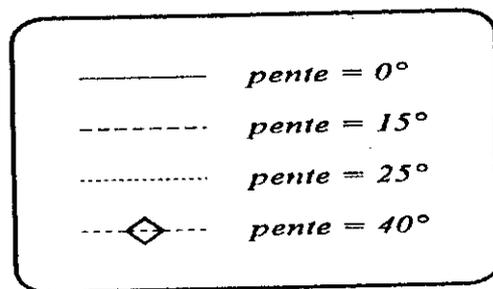
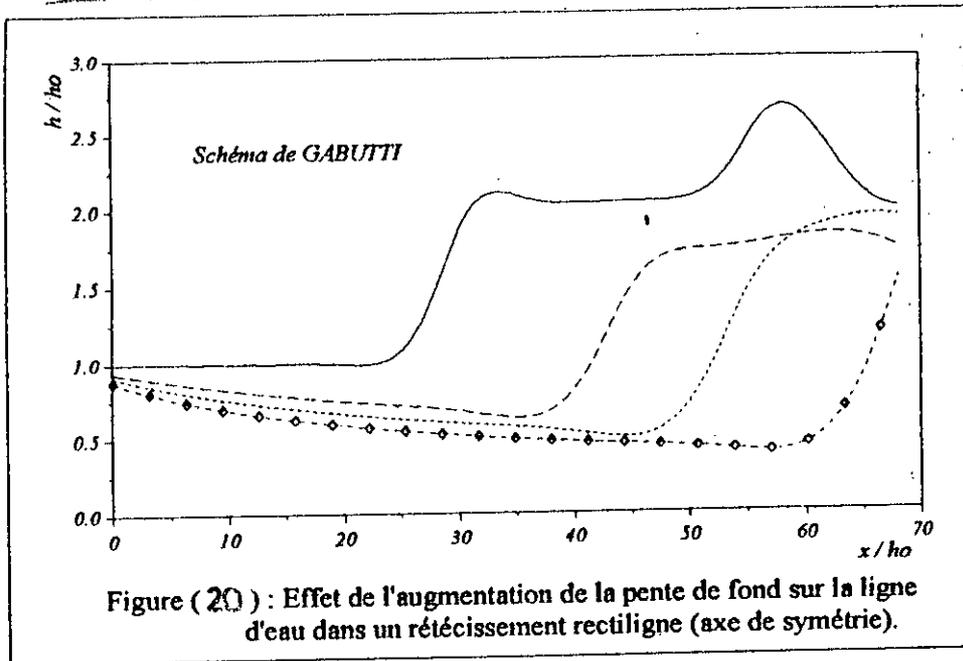
conclusion

A travers cette étude de connaissance, il est clair qu'il existe nombreux recherches dans le domaine de la simulation numérique mais très peu dans le domaine expérimentale et particulièrement pour les écoulements à travers les transition à ciel ouvert.



- + COLES et SHINTAKU (expérimental) [15]
- BHALLAMUDI et CHAUDHRY [15]
- Schéma de MacCORMACK
- - - - Schéma de GABUTTI





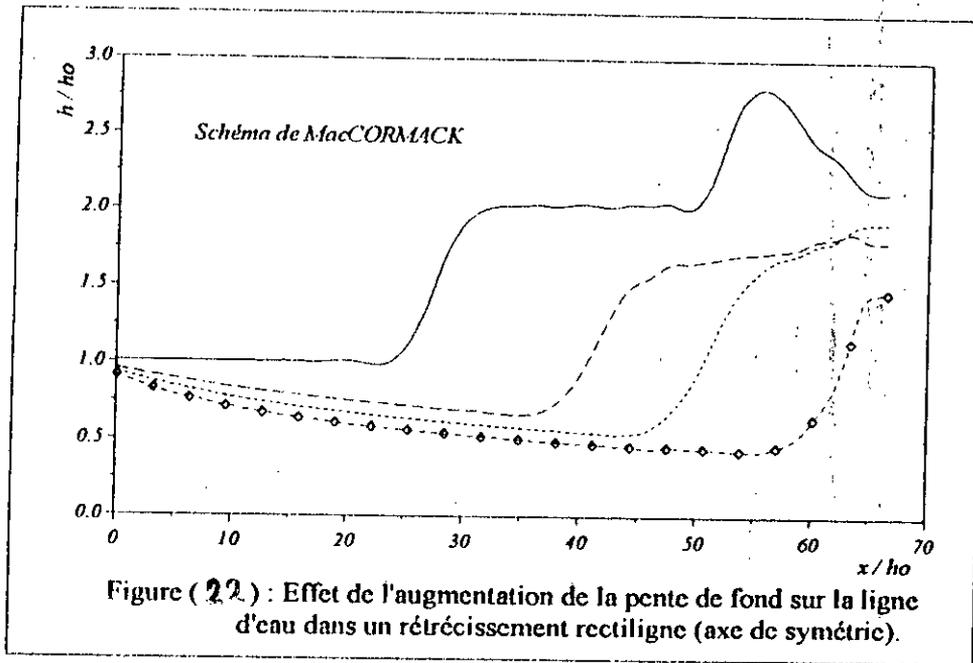


Figure (22) : Effet de l'augmentation de la pente de fond sur la ligne d'eau dans un rétrécissement rectiligne (axe de symétrie).

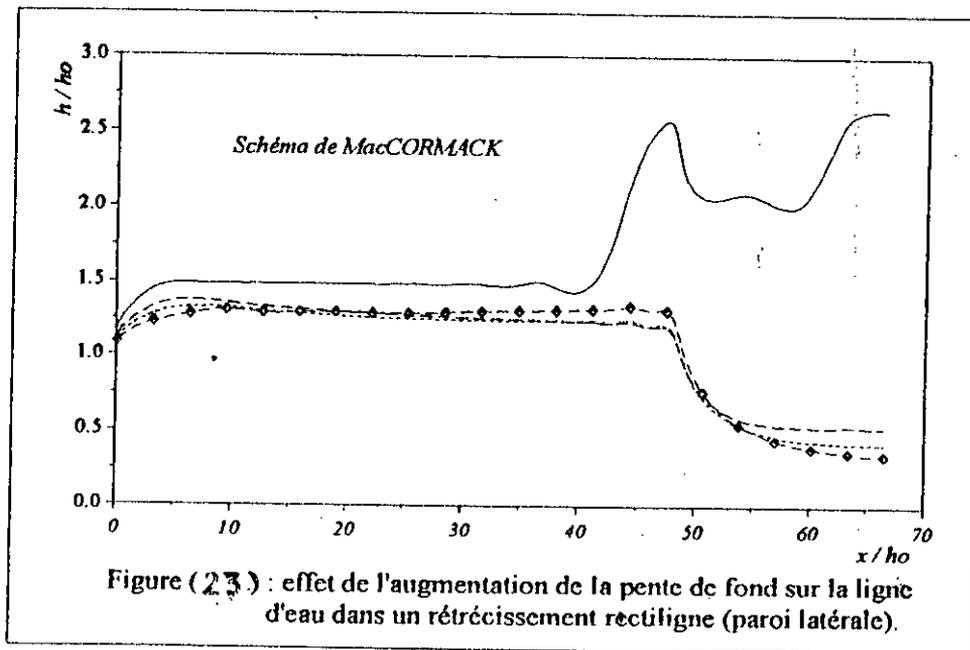
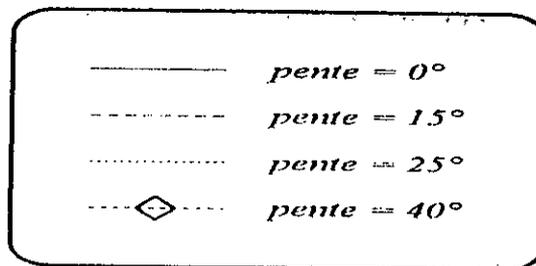


Figure (23) : effet de l'augmentation de la pente de fond sur la ligne d'eau dans un rétrécissement rectiligne (paroi latérale).

CHAPITRE III

les phénomènes de base

III.1. Introduction :

L'écoulement torrentiel dans des changements de section de canaux à surface libre engendre fréquemment des discontinuités dans les grandeurs caractéristiques de l'écoulement. Selon la taille, la nature et la forme des canaux, l'écoulement peut engendrer des ondes transversales (ondes de choc) des ressauts ondulés et quelque fois des structures complexes d'ondes créent par des réflexions multiples sur les parois et leurs interactions [11]

Dans ce chapitre, la formation d'ondes transversales sera traitée pour le changement de direction d'un canal, puis, on traitera les écoulements fluviaux et torrentiels dans les rétrécissements rectilignes symétriques et non symétriques.

III.2. Etudes des ondes transversales résultantes du changement de la direction d'un canal : [11]

On considère un canal présentant un changement de direction brusque mais faible (Figure 24) dont le nombre de Froude à l'entrée est supérieur à l'unité ($IF_1 > 1$).

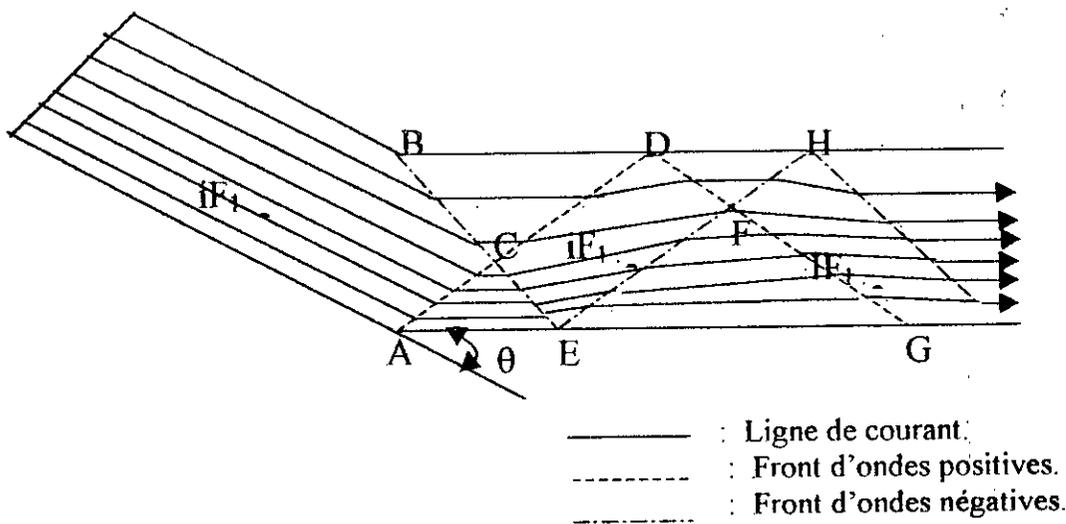


Figure (24) : Représentation de la surface libre d'un écoulement lors de changement de direction d'un canal.

Le canal change la direction d'un angle θ aux points A et B. Au point A, la déviation de la paroi provoque l'augmentation de la profondeur de l'écoulement d'où la création des ondes positives, au contraire, la déviation au point B provoque une diminution de la profondeur ce qui donne naissance à des ondes négatives.

L'onde négative diffère de l'onde positive du fait que le changement de profondeur est progressif et non brutal.

La zone à l'amont des ondes transversales n'est pas influencée par le changement de direction et les lignes de courant restent parallèles au canal d'entrée.

Dans la zone (ACE) et (BCD) (figure 24, page 30), les lignes de courant sont parallèles aux parois du canal et les profondeurs de l'écoulement augmentent et diminuent respectivement.

Le point (C) est le point d'intersection des deux ondes transversales. Toutes deux pénètrent dans les zones perturbées, mais aboutissent en raison de l'inversion à la zone d'état initial.

Il en résulte que les caractéristiques dans la zone (CDEF) sont égales à (h_1) et (F_1) . Cependant les lignes de courant sont déviées de (2θ) par rapport à la direction de l'écoulement initial.

A l'aval de la ligne (DFE), une inversion se produit de nouveau : les lignes de courant deviennent parallèles aux parois. La profondeur de l'écoulement augmente dans la zone (DFH) et diminue dans la zone (EFG).

Le long de la paroi (AEG), la surface s'élève tout d'abord brusquement puis tombe au-dessous de la profondeur d'eau initiale (h_1) , l'écoulement devient ainsi agité dans le canal, ce qui nécessite des parois plus hautes que ceux de la zone d'entrée.

D'où l'étude d'un tel écoulement doit être prise en considération afin de réduire les hauteurs des ondes.

III.3. Etude de l'écoulement dans les rétrécissements (convergent)

progressifs :

III.3.1. Types de rétrécissements :

Un rétrécissement permet à l'écoulement de passer d'un canal de largeur (b_1) à un canal de largeur (b_2) tel que ($b_1 > b_2$), ce passage est brusque ou progressif :

On distingue deux types de rétrécissement progressif :

- Symétrique :
- * en forme d'entonnoir (Figure 25.a).
 - * en forme d'éventail (Figure 25.b).
 - * en forme de tuyère (Figure 25.c)

Non symétrique : (Figure 25.d).

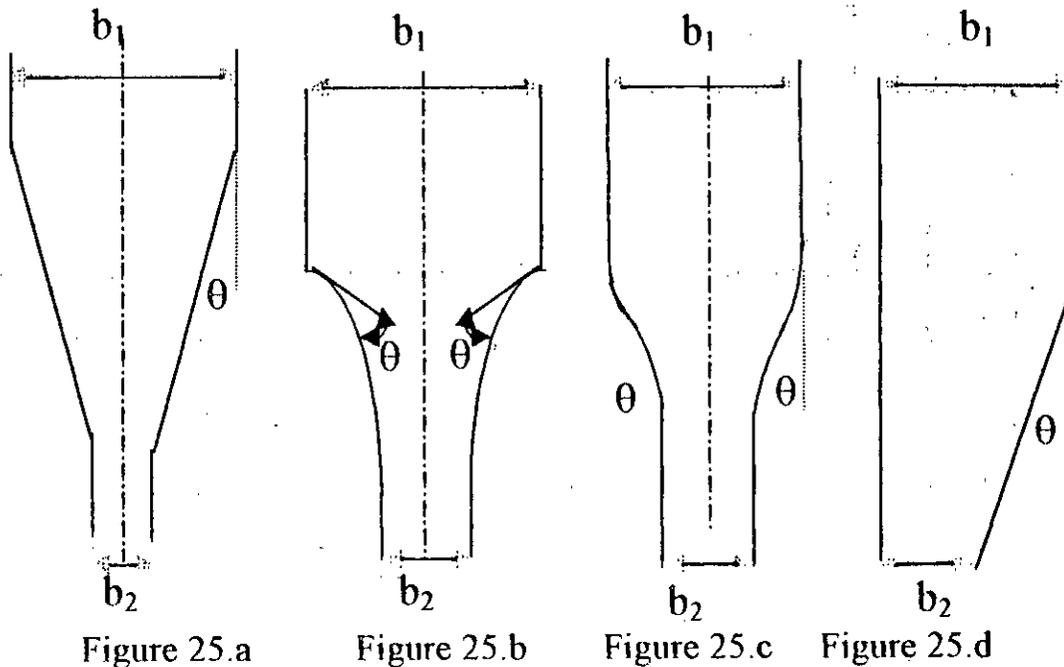


Figure (25) : types de rétrécissement

III.3.2. Etude de l'écoulement fluvial dans un convergent symétrique en forme d'entonnoir :

On considère un écoulement uniforme fluvial traversant un canal convergent symétrique de grande longueur de section droite rectangulaire (figure 26, page 33) [17].

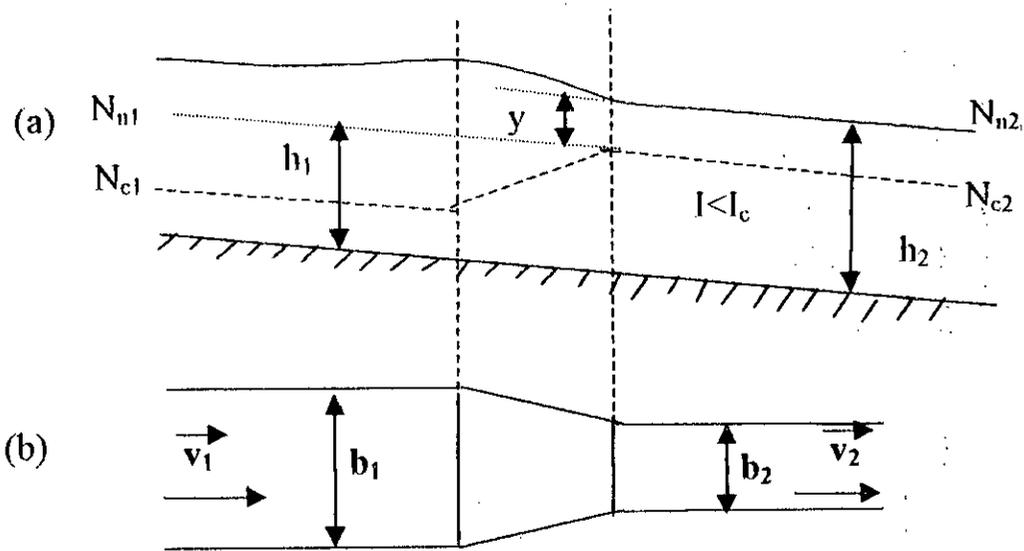


Figure (26) : a) : l'allure de la ligne dans un convergent symétrique.
 b) : schéma d'un convergent symétrique .

On observe, un exhaussement du niveau dans la partie rétrécie et un exhaussement supplémentaire du niveau à l'entrée du rétrécissement.

On suppose que les largeurs (b_1 et b_2) sont très grandes par rapport aux profondeurs correspondantes de façon à pouvoir admettre que le rayon hydraulique est égal à la profondeur d'eau.

b_1 : la largeur amont (zone élargie), I : la pente constante du fond du canal.

b_2 : la largeur aval (zone rétrécie), h_1 : la profondeur amont en régime uniforme, h_2 : la profondeur aval en régime uniforme, v_1 : la vitesse moyenne amont en régime uniforme.

v_2 : la vitesse moyenne aval en régime uniforme.

R : le rayon hydraulique est égal à h , q_1 : le débit unitaire à l'amont.

q_2 : le débit unitaire à l'aval.

Dans les deux tronçons, on peut écrire l'équation générale :

$$R I = \frac{1}{C^2} V^2 \dots\dots\dots(7)$$

Où :

C : représente le coefficient de Chezy.

A l'amont, on a :

$$h_1 I = (1/C_1^2) V_1^2 \dots\dots\dots(8)$$

A l'aval

$$h_2 I = \frac{1}{C_2^2} V_2^2 \dots\dots\dots(9)$$

Où C est supposé constant, donc :

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{V_2^2}{V_1^2} \dots\dots\dots(10)$$

Par ailleurs l'équation de continuité s'écrit :

$$Q = b_1 h_1 V_1 = b_2 h_2 V_2 \dots\dots\dots(11)$$

En associant les deux relations précédentes, on obtient :

$$h_2 = h_1 \sqrt[3]{\left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2} \dots\dots\dots(12)$$

Et finalement, l'exhaussement ($y=h_2 - h_1$) est donné par la formule suivante :

$$y = h_1 \left[\sqrt[3]{\left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2} - 1 \right] \dots\dots\dots(13)$$

Cette formule montre que l'exhaussement (y) est proportionnel à h_1 .

III.3.3. Etude d'un écoulement torrentiel traversant un convergent symétrique en forme d'entonnoir : [11], [12] et [17]

Considérons l'écoulement torrentiel traversant un rétrécissement (convergent) symétrique en forme d'entonnoir, (figure (27), page 33).

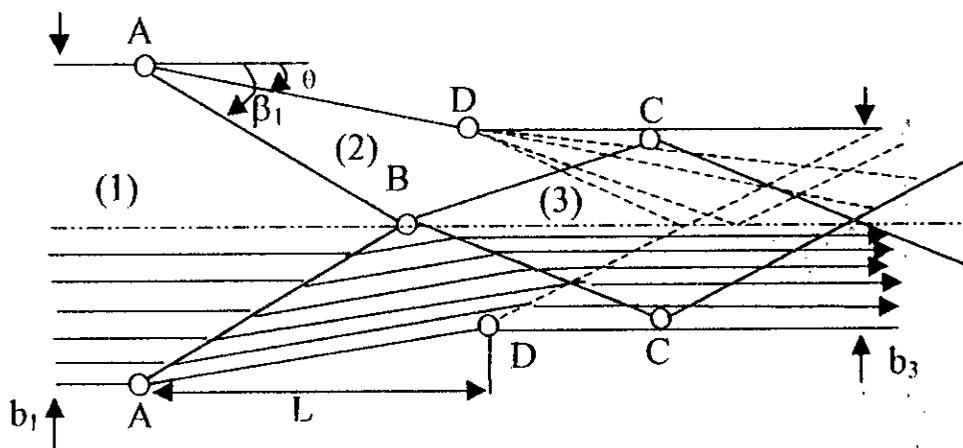


Figure (27) : Représentation schématique de l'écoulement dans un rétrécissement de canal d'après Ippen et Dawson (1951).

L'indice (1) correspond aux conditions d'écoulement à l'entrée h_1 , v_1 et F_1 , qui sont respectivement la profondeur, la vitesse et le nombre de Froude à l'amont de l'écoulement. Les largeurs du canal d'entrée et du canal de sortie sont b_1 et b_3 pour un angle de rétrécissement arbitraire (θ).

Le changement de la section et la déviation de l'écoulement provoquent une propagation des ondes transversales (de choc) des points (A). Les ondes se rencontrent au point (B) situé sur l'axe du canal, puis réfléchissent sur les murs opposés aux points (C) et pénètrent dans le canal. [11] et [17]

Simultanément des ondes négatives se forment aux points (d). La superposition des ondes positives et négatives conduit à un écoulement agité (figure 27 ci-dessus). Il en résulte que l'écoulement dans le canal aval connaît des perturbations.

Le choix correct de l'angle (θ) qui dépend du nombre de Froude amont (F_1), et le rapport (b_3/b_1), donne une nette amélioration de l'écoulement. Dans ce cas, les ondes transversales positives sont dirigées exactement vers les points (D, C) figure (29.a). L'interférence des ondes se produit comme décrit précédemment, l'écoulement qui en résulte dans le canal aval n'a pratiquement pas de perturbations de surface. Il s'ensuit que seul l'écoulement dans la zone 2 n'est pas axial.

La figure (28.b) représente des profils caractéristiques de la surface libre le long des parois latérales et le long de l'axe du canal. [11] et [17]

En se basant sur la figure (28.a, ci-dessous) [17] ; l'application du théorème de la quantité de mouvement longitudinalement et perpendiculaire au front d'onde (AB) et l'équation de continuité, donne les caractéristiques de l'écoulement le long des fronts d'ondes (AB) donne :

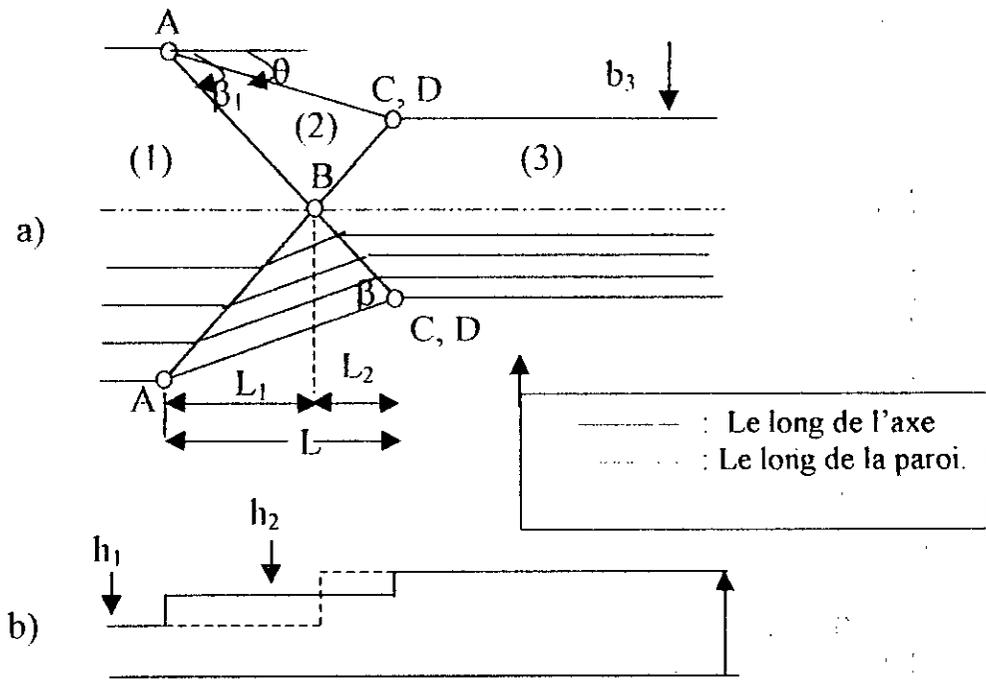


Figure (28.a) : La forme de la ligne d'eau
Figure (28.b) : Schématisation de l'écoulement dans un convergent symétrique ayant un angle de déviation (θ) correct.

$$\frac{h_{i+1}}{h_i} = \frac{\operatorname{tg} \beta_i}{\operatorname{tg}(\beta_i - \theta)} \dots \dots \dots (14)$$

$$\sin \beta_i = \frac{1}{F_i} \left[\frac{\operatorname{tg} \beta_i}{2 \operatorname{tg}(\beta_i - \theta)} \left(\frac{\operatorname{tg} \beta_i}{\operatorname{tg}(\beta_i - \theta)} + 1 \right) \right]^{1/2} \dots \dots \dots (15)$$

$$\frac{F_{i+1}}{F_i} = \frac{\sin \beta_i}{\sin(\beta_i - \theta)} (h_i - h_{i+1})^{-3/2} \dots \dots \dots (16)$$

Où :

$i = 1, 2.$

Pour $i = 1$, les équations (14,15 et 16) se rapportent aux tronçons AB.

Pour $i = 2$, les équations (14,15,16) se rapportent aux tronçons BC du système des ondes transversales (ondes de choc).

Pour F_i ($i = 1$) et θ fixés, l'équation (15) permet de calculer β_i , les valeurs h_{i+1} et F_{i+1} résultent alors des deux autres équations.

On répète ensuite la même procédure pour F_{i+1} , (θ) fixé on obtient β_{i+1} ($i = 1$) et F_{i+1} , h_{i+1} ($i = 2$).

La condition pour que l'onde de choc touche la paroi aux points (C) (figure 28.a page 36) peut être exprimé par le rapport suivant : [16]

$$\psi = \frac{h_3}{h_1} = \frac{\sin(\beta_1 - \theta) \cdot \sin(\beta_2 - \theta)}{\sin \beta_1 \sin \beta_2} \dots\dots\dots(17)$$

III.3.4. Etude de l'écoulement supercritique dans un convergent non symétrique : [16]

On considère un écoulement torrentiel traversant un convergent non symétrique, figure (29, ci-dessous).

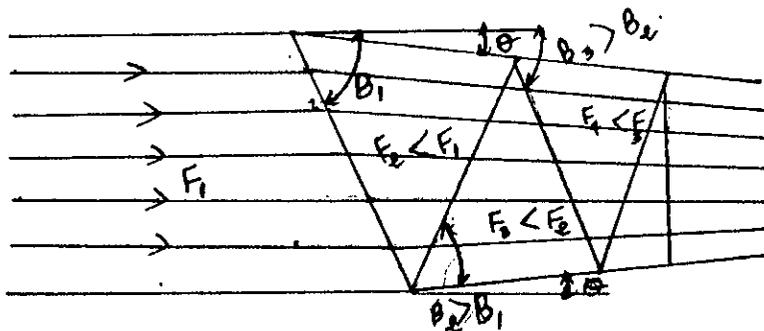


Figure (29) : Représentation schématique de l'écoulement dans un convergent non symétrique.

Graf.H a montré par l'application de l'équation de continuité et le théorème de la quantité de mouvement, normalement et tangentiellment au front de l'onde que :

L'angle initial de l'onde (β_1) est calculé à l'aide de l'équation :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \beta_1 (\sqrt{1 + 8(F_1^n)^2} - 3)}{2 \operatorname{tg}^2 \beta_1 + \sqrt{1 + 8(F_1^n)^2} - 1} \dots\dots\dots (18)$$

Où F_1^n : le nombre de Froude dans le sens normal au front d'onde.

Pour nombre de Froude F_1 et pour angle de déflexion (θ), le nombre de Froude F_2 ($F_2 < F_1$), diminue et la profondeur h_2 ($h_2 > h_1$) augmente.

- L'onde est réfléchiée sur la paroi droite, l'angle de cette onde (β_2) ($\beta_2 > \beta_1$) est calculé par la formule suivante :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \beta_2 (\sqrt{1 + 8(F_2^n)^2} - 3)}{2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 + \sqrt{1 + 8(F_2^n)^2} - 1} \dots\dots\dots (19)$$

- Le nombre de Froude F_3 ($F_3 < F_2$) diminue et la profondeur h_3 ($h_3 > h_2$) augmente.

Remarque :

Graf a montré que si le canal est assez long, un ressaut hydraulique normal se forme et l'écoulement passera au régime fluvial.

III.4. Déviation brusque d'une paroi : [8] et [16]

On considère un écoulement torrentiel uniforme parallèle dans un canal rectangulaire, en un certain point, la paroi est déviée vers l'écoulement d'un angle θ (Figure 30, page 40).

Cette déviation cause une perturbation de l'écoulement le long d'une ligne droite faisant un angle β par rapport à la direction initiale de l'écoulement.

L'angle β est appelé angle de choc et la ligne correspondant, onde transversale.

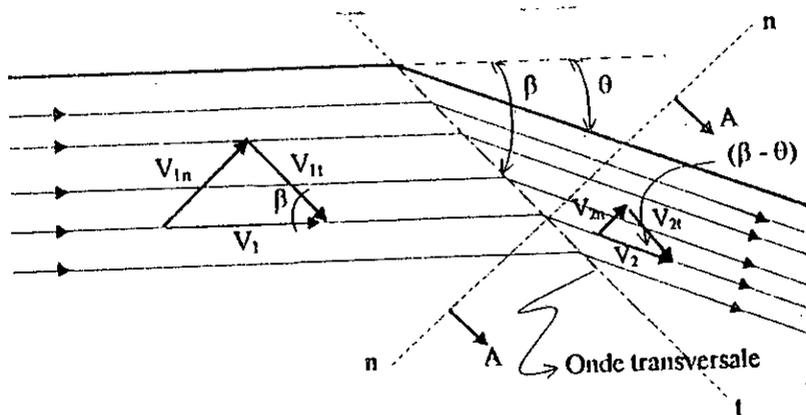


Figure (30) : Ondes transversales dans une déviation de mur.

L'application du principe de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement permet de déterminer les caractéristiques de l'écoulement amont et aval.

Ainsi le rapport entre les hauteurs h_1 et h_2 , s'exprime par la formule suivante :

$$h_2 / h_1 = \frac{1}{2} [(1 + 8F_1^2 \sin^2 \beta)^{1/2} - 1] \dots\dots\dots(20)$$

On pose $h_2/h_1 = y$ donc :

le nombre de Froude (F_2) s'exprime par la formule suivante :

$$F_2^2 = y^{-1} [F_1^2 - (1/2y) (y-1) (y+1)^2] \dots\dots\dots(21)$$

Où : $F_1 = V_1 / (gh_1)^{1/2}$ et $F_2 = V_2 / (gh_2)^{1/2}$.

Le système d'équation ci-dessus a été établi à partir des suppositions suivantes :

- L'eau est peu profond.
- Distribution uniforme de la vitesse.

D'après Hager et Bretz, dans le cas où : $F_1 \sin \beta_1 > 1$, l'équation (20) peut être remplacée par l'équation approchée suivante :

$$h_2/h_1 = \sqrt{2} \sin \beta - 1/2 \dots\dots\dots(22)$$

Hager a montré que :

$$\beta = \theta + (3/2\sqrt{2} F_1)^{-1} \dots\dots\dots(23)$$

Pour $\beta < \pi/4$ et $F_1 > 2$ les valeurs caractéristiques de l'équation (21) présentent un écart inférieur à 2°. De plus la valeur de F_2 peut être représentée par la formule approchée :

$$F_2^2 = \frac{F_1 \cos^2 \beta}{\sqrt{2} \sin \beta [1 - (2\sqrt{2} F_1 \sin \beta)^{-1}]} \dots\dots\dots(24)$$

III.5. Etude de l'écoulement dans un canal à forte pente :

III.5.1. Influence de la pente sur la surface libre en cas d'un écoulement torrentiel : [4]

Si la pente du canal est importante et l'écoulement est torrentiel, la surface libre de l'eau peut devenir par la suite instable (figure 31 page 41), cette instabilité se manifeste par :

- Une série d'ondes de gravité de faible amplitude appelées « ondes en cascade » qui se propage vers l'aval.
- Un déferlement qui provoque un entraînement d'air.
- Ainsi, les ondes en cascades se superposent à l'écoulement et se croissent en se déplaçant vers l'aval avec une célérité absolue (c_0) plus importante que la vitesse moyenne (V).

Pour un canal de section droite rectangulaire, la célérité (c_0) est donnée par la formule :

$$c_0 = V + \sqrt{gh} \dots\dots\dots(25)$$

- Les critères des ondes en cascade forment une région de forte turbulence, tandis que les creux se présentent comme une surface plutôt lisse.

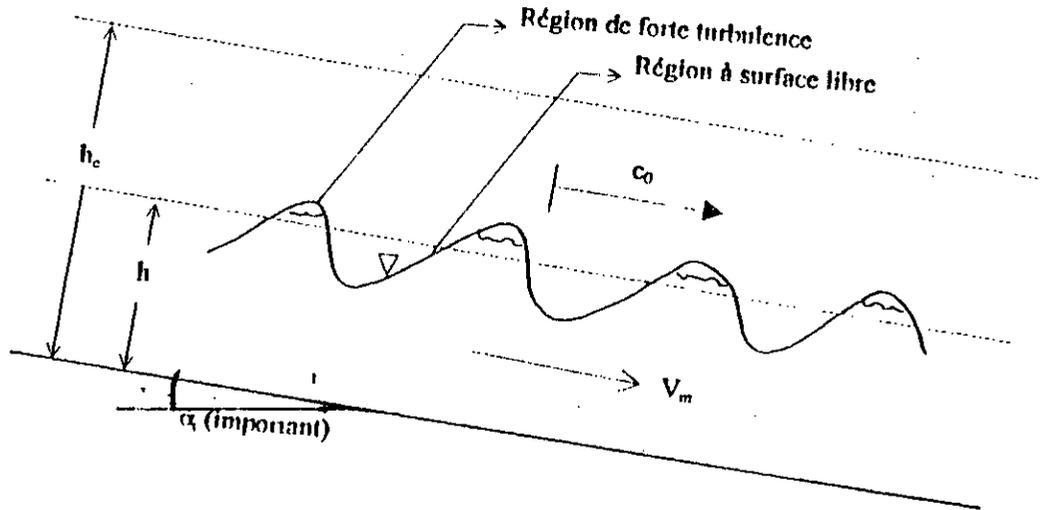


Figure (31) : La forme de la surface libre due à une pente importante du radier en régime torrentiel.

III.5.2. Etude de l'écoulement torrentiel dans un canal rétréci de pente considérable: [4]

On considère un écoulement torrentiel dans un canal rétréci représenté par la figure (32 page 42) et dont l'effet de la pente du fond est pris en considération.

L'application de l'équation de continuité et du théorème de la quantité de mouvement perpendiculaire au front de l'onde transversale (onde de choc), nous donne :

$$h_1 v_1 \sin\beta = h_2 v_2 \sin(\beta - \theta) \dots\dots\dots(26)$$

$$p_1 + (h_1 / g) v_1^2 \sin^2 \beta + w_1 = p_2 + (h_2 / g) v_2^2 \sin^2 (\beta - \theta) \dots\dots\dots(27)$$

Dans lesquelles :

$$P_1 = \frac{1}{2} h_1^2 \cos \alpha ; p_2 = \frac{1}{2} h_2^2 \cos \alpha ; w_1 = \frac{1}{2} k_f l_s (h_1 + h_2) \sin \alpha \sin \beta .$$

Avec :

θ : angle de déviation de la paroi, β : angle de choc, h_1 : hauteur de l'écoulement en amont, v_1 : vitesse de l'écoulement en amont, k_f : facteur de forme, l_s : largeur du front de l'onde de choc, w_1 : force de pression à la paroi,

p_1, p_2 : Pressions statiques.

La combinaison des deux équations (1) et (2) donne la relation suivante :

$$\sin \beta = \frac{\sqrt{\left(\frac{l_2}{h_1}\right)^2 (1+y)^2 \sin^2 \alpha + 8F_1^2 \left(1 - \frac{1}{y}\right) \cos \alpha (y^2 - 1) - \left(\frac{l_2}{h_1}\right) (1+y) \sin \alpha}}{4F_1^2 (1 - y^{-1})} \dots (28)$$

Où :

$y = h_2/h_1$: rapport des profondeurs de l'écoulement.

$$F_1 = v_1 / \sqrt{gh}$$

Le coefficient de forme est pris tel que : $K_f = 1$.

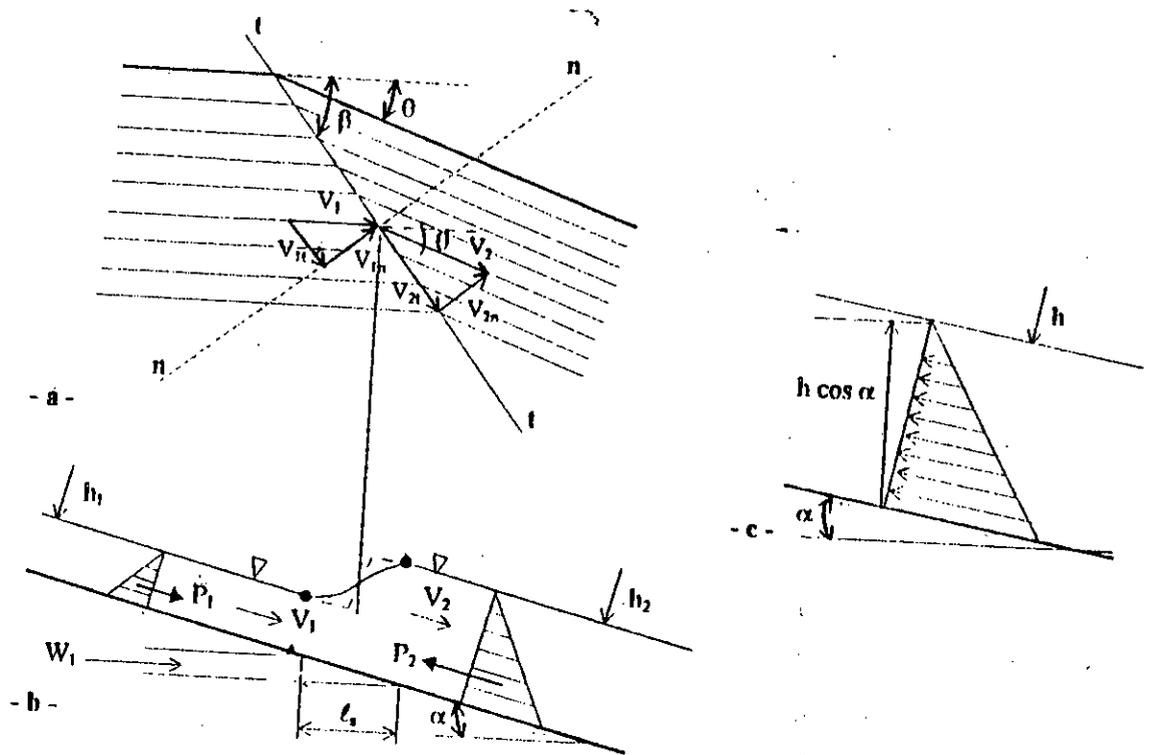


Figure (32) : Description d'une déviation brusque de la paroi dans un canal incliné.

- a) Composante de la vitesse,
- b) Coupe perpendiculaire au front d'onde,
- c) Définition de la hauteur de pression.

III.6. Généralités sur les ressauts:

III.6.1. Introduction:

L'évacuation de l'eau dans les ouvrages hydraulique, tel que les évacuateurs de crues, s'effectue par la transformation de l'énergie potentielle emmagasinée par la retenue en une forte énergie cinétique. Ainsi les forces tractrices engendrées, proportionnelles au carré de la vitesse, peuvent sérieusement menacer l'ouvrage par le caractère érosif.

Le phénomène qui apparaît dans tous les dissipateurs d'énergie est une diminution locale de la vitesse moyenne sur une faible longueur, accompagné d'une réduction importante de l'énergie mécanique de l'écoulement. Cela se traduit par la création d'un ressaut hydraulique. [17]

III.6.2. Définition d'un ressaut: [6]

Le ressaut hydraulique stationnaire est une brusque surélévation de la surface libre du courant permanent. Ce phénomène se produit lorsqu'un régime torrentiel devient fluvial.

L'écoulement à l'intérieur du ressaut hydraulique est fortement non stationnaire, celui-ci est caractérisé par :

- *Les effets de turbulences importants.
- *La présence du phénomène d'entraînement d'air.
- *La dissipation importante d'énergie.

Un ressaut hydraulique peut être décrit par ses hauteurs conjuguées, sa longueur et sa dissipation d'énergie mécanique.

III.6.3. Différents types de ressauts : [17]

La classification des ressauts hydrauliques est fonction du nombre de Froude amont (F_1), il existe : [5]

- des ressauts ondulés $1 < F_1 < 1,7$
- des ressauts faibles $1,7 < F_1 < 2,5$
- des ressauts oscillants $2,5 < F_1 < 4,5$
- des ressauts stationnaires $4,5 < F_1 < 9$.

III.6.4. Caractéristiques et classification des ressauts ondulés: [9]

Comme nous l'avons signalé, les ressauts ondulés sont caractérisés par un écoulement amont légèrement torrentiel, ce qui conduit à une transition graduellement variée entre l'écoulement torrentiel et l'écoulement fluvial.

Les pertes de charges sont essentiellement dues aux frottements sur les parois du canal. A la limite, le ressaut ondulé est caractérisé par l'entraînement d'air est la formation de déferlement. [6] et [17]

Les ressauts ondulés sont caractérisés par la propagation des ondulations sur longues distances à la surface libre de l'écoulement. De là, l'étude des ressauts ondulés se base sur l'analogie avec la propagation des ondes transversales.

En effet, la classification des ressauts ondulés s'effectue selon le nombre de Froude caractérisant les ondes transversales et le phénomène d'entraînement d'air.

Ainsi à faible nombre de Froude ($1 < F < F_{1A}$) l'écoulement est parfaitement bidimensionnel, et les ondulations de la surface libre sont de faible amplitude avec de grandes longueurs d'ondes (figure 33 ci-dessous).

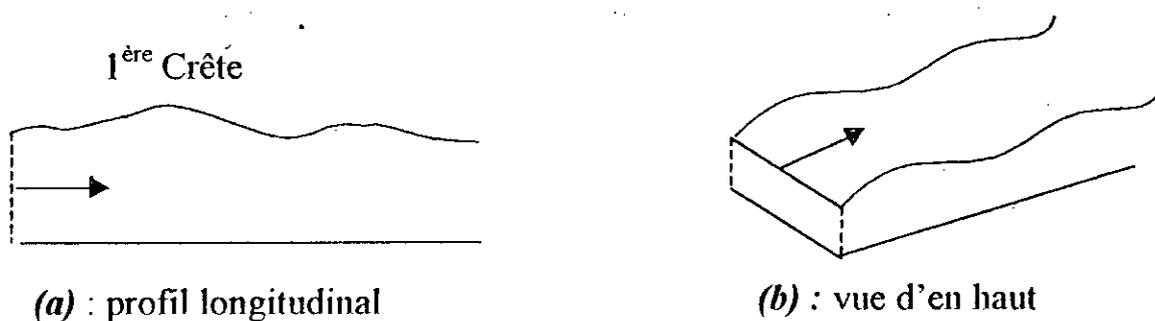


Figure (33) : Ressaut ondulé pour $(1 < F_1 < F_{1A})$.

Où :

F_{1A} : Le nombre de Froude caractérisant l'apparition d'ondes transversales (de choc).

Une augmentation de nombre de Froude ($F_{1A} < F_1 < F_{1B}$) (Figur34, page 46) entraîne l'apparition d'ondes transversales se développent à la surface libre, depuis les parois latérales, en amont de la première crête.

Elles se réfléchissent sur la paroi opposée à la hauteur du creux de la première vague, se rencontrent de nouveau sur la deuxième crête. Vu d'en haut, l'écoulement en aval de la première crête, apparaît comme une succession de losanges alignés dans l'axe du canal (Figure 34, ci-dessous).

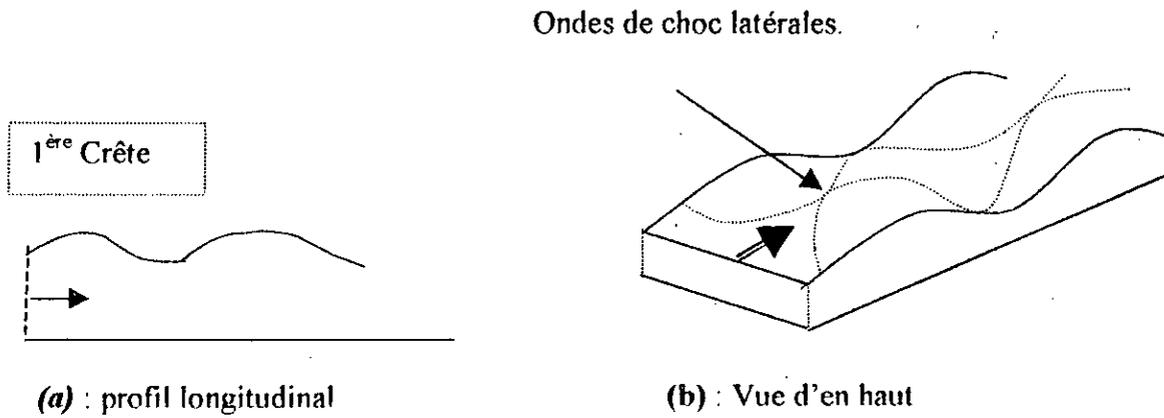


Figure (34) : Ressaut ondulé pour $F_{1A} < F_1 < F_{1B}$.

F_{1B} : Le nombre de Froude caractérisant l'apparition d'un petit rouleau de déferlement sur la crête de la première ondulation.

D'après la figure (35, ci-dessous), lorsque le nombre de Froude atteint la valeur caractéristique de l'entraînement d'air, un petit rouleau de déferlement apparaît à l'intersection des ondes de choc latérales sur la première crête.

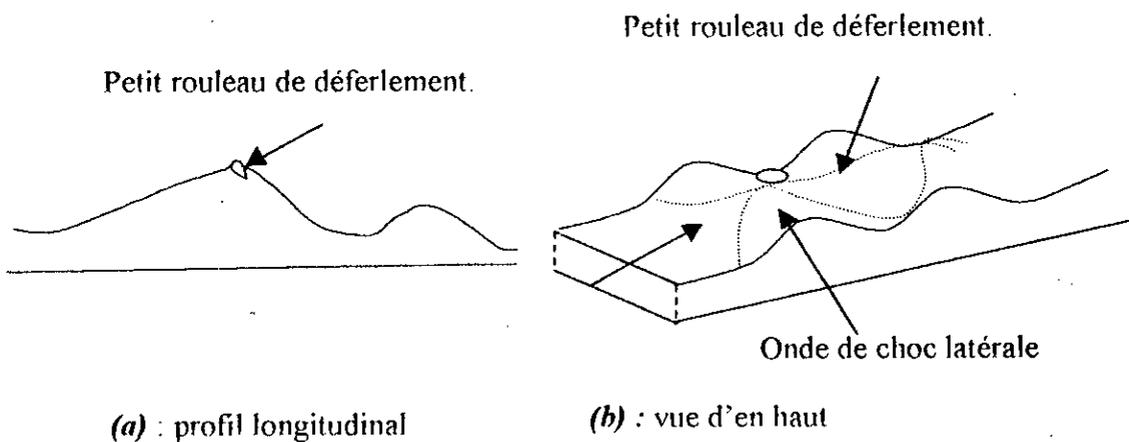


Figure (35) : Apparition des petits rouleaux de déferlement dans les ressauts ondulés.

pour des nombres de Froude supérieurs, le rouleau devient plus important et des bulles d'air sont entraînées à l'intersection des ondes de choc et du petit rouleau sur la première crête.

Juste avant la disparition du ressaut ondulé, le rouleau de déferlement s'élargit et bloque le développement des ondes de choc latérales (Figure 36, ci-dessous).

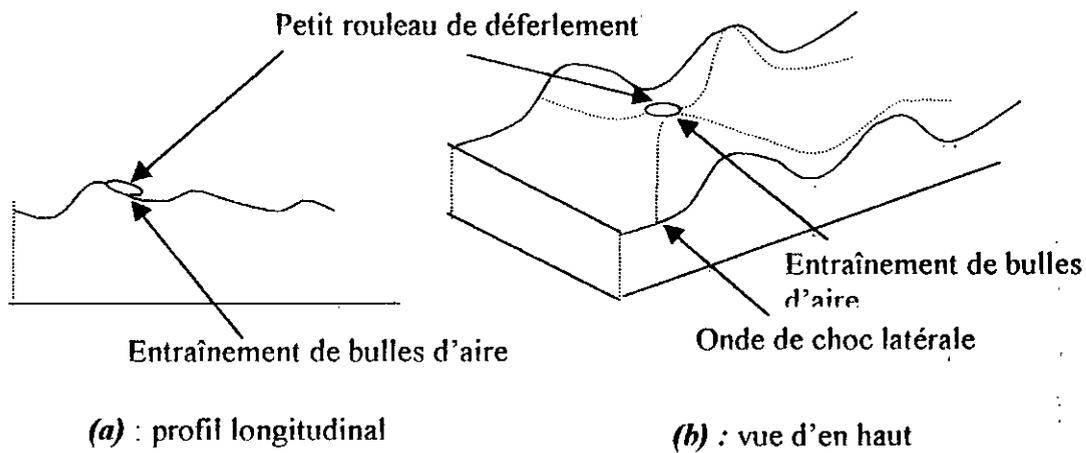


Figure (36) : l'entraînement d'air dans les ressauts ondulés.

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction :

Dans cette partie, on procède, d'une part à une description des installations et des instruments de mesure utilisés dans les essais et d'autre part à une présentation des résultats expérimentaux, leurs interprétations, ainsi leur comparaison avec les études faites ultérieurement sur les écoulements à travers les convergents.

Par ailleurs, les essais ont été menés sur un modèle physique et ont été consacré à mesurer pour chaque pentes, et pour chaque débit, les différentes hauteur d'eau, la pression(en terme de la hauteur d'eau), en chaque station de mesure.

Les mesures de la hauteur d'eau sont effectuées au moyen d'un limnimètre qui se déplace suivant les directions : (X), (Y). Alors que la pression est mesurée à l'aide des piézomètres. Enfin le débit est mesuré par l'intermédiaire d'un débitmètre non intrusif préalablement étalonné.

Dans le but d'étudier les écoulements dans le convergent en forme d'entonnoir symétrique et non symétrique, et tracer la ligne d'eau résultante, des essais expérimentaux ont été menés sur un modèle physique, réalisé au sein du laboratoire d'hydraulique à l'école nationale polytechnique

IV.2. Installation expérimentale :

L'installation sur laquelle sont effectués les différents essais et mesures, est réalisée dans sa totalité en Plexiglas (figure 37, page 49).

L'installation comporte de l'amont vers l'aval :

IV.2.1. Réservoir :

Un réservoir en Plexiglas de dimensions (largeur=50cm, longueur=50cm, hauteur=60cm), posé sur un support métallique de 1,85 m de hauteur. Ce réservoir est muni d'une plaque tranquillisante, afin d'éliminer toutes formes de vibration, de réflexion d'ondes et de vagues à la surface libre. Le réservoir est alimenté en eau, à partir d'une conduite se raccordant au château d'eau, qui, de son côté est alimenté à l'aide d'une pompe centrifuge (figure 38, page 50).

IV.2.2. Le premier canal prismatique :

Un petit canal prismatique allonge le réservoir. Ce canal est muni de deux plaques tranquillisantes, assurant une surface libre stable à l'entrée du convergent

A la lumière des résultats obtenus, les auteurs ont constaté que :

Lors d'un écoulement fluvial avec un nombre de Froude égal à 0,36, la surface libre ne présente pas beaucoup de perturbation et la hauteur de l'eau diminue de l'amont vers l'aval (Figure 2, ci-dessous).

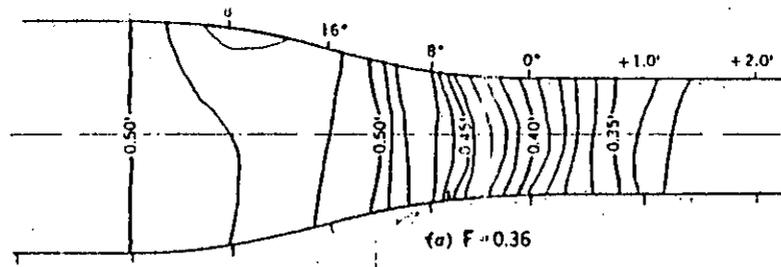


Figure (2) : Présentation des iso hauteurs de la surface libre pour un écoulement fluvial

Par contre, lors d'un écoulement torrentiel dont le nombre de Froude est égal à 4 on constate que :

- La surface libre présente des perturbations de type ondes transversales.
- Les ondes transversales convergent vers l'axe du canal dans la partie concave et divergent dans la partie convexe (figure 3, ci-dessous)
- Une surélévation brusque de la profondeur de l'eau juste à la sortie du convergent a été observée.

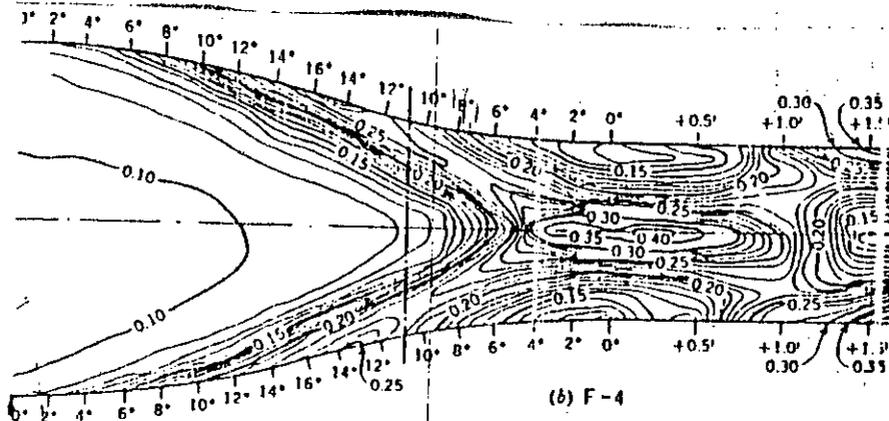


Figure (3) : Présentation des iso hauteurs de la surface libre pour un écoulement torrentiel.

- L'évolution de la hauteur d'eau le long de la paroi du canal et le long de l'axe sont représentés sur la figure 4, page 10 .

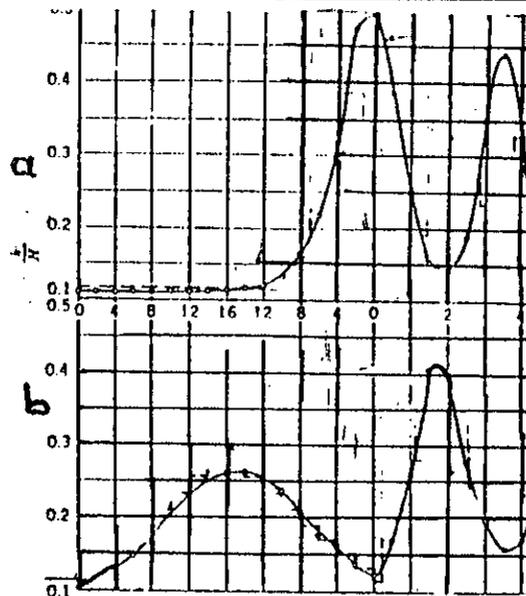


Figure (4) : L'évolution de la hauteur de l'eau :

a) le long de la paroi.

b) le long de l'axe de l'écoulement.

A partir de ces courbes, les auteurs ont constaté qu'une première surélévation s'effectue le long de la paroi au point de changement de la courbure.

Une deuxième surélévation importante s'effectue le long de l'axe du canal juste à la sortie du convergent. Par contre, au niveau de cette section, la hauteur d'eau au centre du canal est faible et identique à celle d'entrée.

De même, pour étudier l'influence de la forme de la paroi sur l'allure de la ligne d'eau, ils ont fait plusieurs expériences en faisant varier le nombre de Froude.

La figure (5) représente la variation de la hauteur d'eau le long de la paroi en fonction de l'angle de déviation des parois latérales.

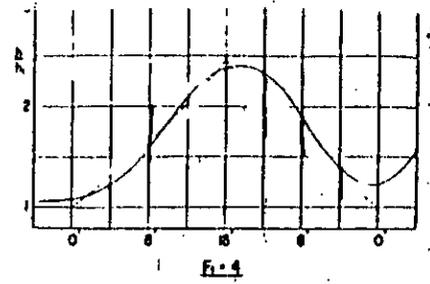
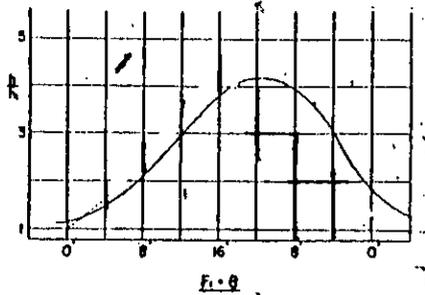


Figure (5) : La variation de la hauteur de l'eau le long de la paroi en fonction de l'angle de déviation (θ).

D'après ces résultats, ils ont constaté que la hauteur de l'eau le long du convergent est proportionnelle à l'angle de déviation des parois et la hauteur d'eau atteint sa valeur maximale dans la section où l'angle de déviation θ est maximal.

De là, les auteurs ont montré que l'angle de déviation des parois détermine la hauteur des ondes transversales, et pour minimiser cette dernière, il y a lieu de donner une déviation rectiligne (linéaire) aux parois latérales, c'est à dire un convergent en forme d'entonnoir.

Dans le but de faire une étude comparative de l'écoulement à travers les deux convergents (tuyère, entonnoir), ils ont conçu un deuxième modèle en forme d'entonnoir, avec les mêmes caractéristiques de ceux en forme de tuyère, sauf que l'angle de déviation des parois est égal à 8° (Figure.6, ci-dessous).

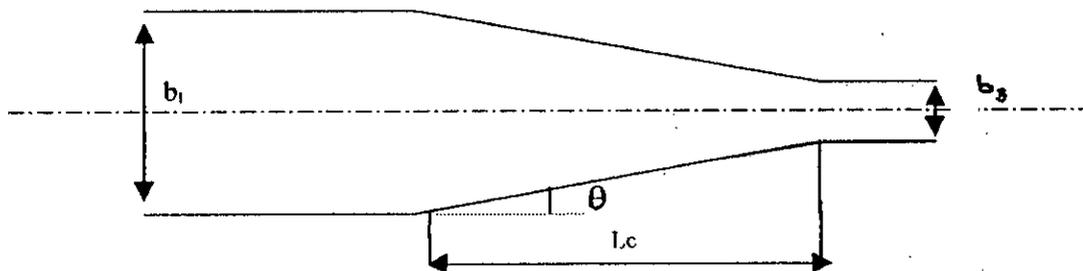


Figure (6) : Rétrécissement en forme d'entonnoir

Les études effectuées sur les deux modèles en faisant varier le nombre de Froude, ont donné les résultats représentés dans le tableau ci-dessous :

Nombre de Froude	h_3 / h_1 (convergent linéaire $\theta=8^\circ$)	h_3 / h_1 (convergent en forme de tuyère $\theta=16^\circ$)
2	1,82	Ressaut hydraulique
3	2,1	3,78
4	2,44	4,50
6	3,34	7,00
8	4,23	10,00
10	5,4	13,50

Tableau (1)

Avec ,

h_1 : la hauteur de l'eau à l'entrée du convergent.

h_3 : la hauteur de l'eau juste après la première intersection des ondes dans le convergent.

A travers ces constats, ils ont conclu que le choix correct de l'angle de déviation (θ) permet de réduire la hauteur des ondes. Et ils ont donné une description analytique du phénomène produisant la perturbation de la surface libre.

Ainsi, lors d'un écoulement torrentiel traversant un convergent symétrique, une série d'ondes se propagent des points (A) (figure 7 ci-dessous) et se rencontrent au point (B) situé sur l'axe du canal. Puis ces ondes se réfléchissent sur les parois opposées aux points (C) et pénètrent dans le canal aval. Simultanément d'autres ondes se forment aux points (D). La superposition des ondes provenant de (A) et celle provenant de (D) conduit à un écoulement agité.

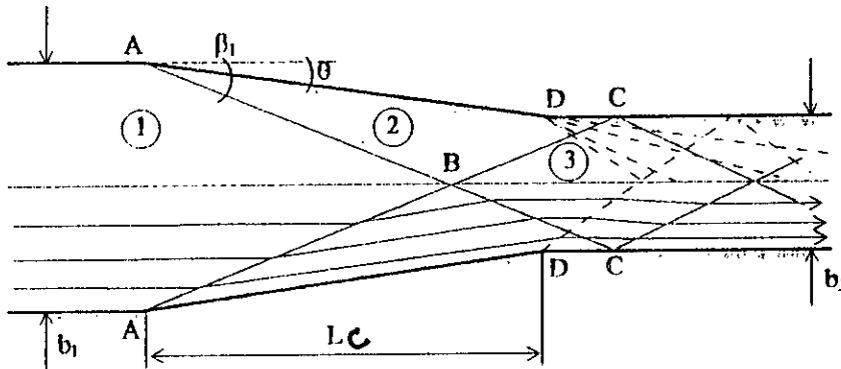


Figure (7) : Représentation schématique de l'écoulement torrentiel dans un rétrécissement linéaire.

Afin d'obtenir un écoulement non perturbé dans le canal aval, il faut choisir l'angle (θ) d'une façon que la réflexion des fronts d'ondes touchent exactement les parois de la contraction (figure 8, ci-dessous).

Cette condition d'après les auteurs, peut être exprimée d'après les considérations géométriques par la formule suivante :

$$L = (b_1 - b_3) / 2 \operatorname{tg} \theta \dots\dots\dots(4).$$

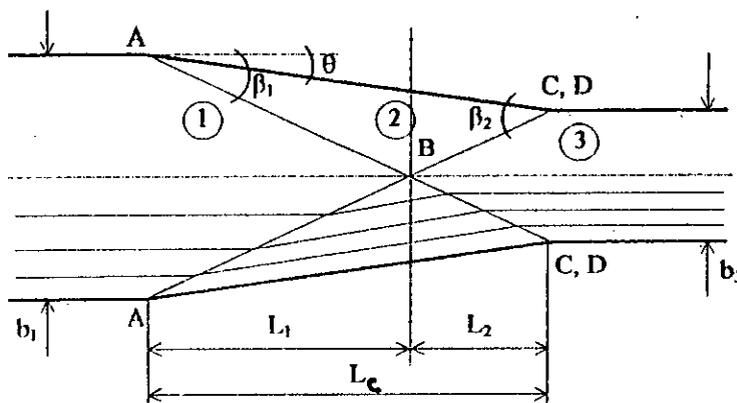


Figure (8) : Schématisation de l'écoulement dans un convergent symétrique ayant un angle de déviation (θ) optimum pour un débit constant.

II.3. Etude de RODRIGUEZ D.P en 1943:[12]

En vue d'étudier l'allure de la ligne d'eau le long de la paroi et le long de l'axe d'un écoulement traversant un convergent en forme d'entonnoir, RODRIGUEZ a conçu un modèle dont la largeur d'entrée est égale au double de celle de sortie, et d'un angle de déviation des parois latérales de 6.9° .

Les expériences effectuées en faisant varier le nombre de Froude de 2,71 à 3,38 ont montré que l'écoulement moins perturbé s'obtient pour une valeur du nombre de Froude égal à 2.71.

La figure 9, page 15., représente la variation de la hauteur d'eau le long de la paroi et le long de l'axe du canal pour plusieurs nombres de Froude.

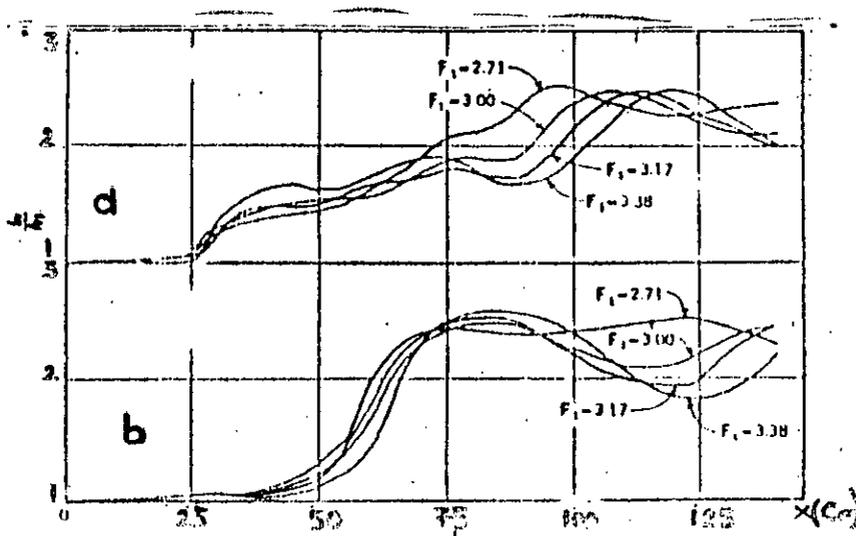


Figure (9) : la variation de la profondeur d'eau dans un convergent en forme d'entonnoir.

a) Le long de la paroi, b) Le long de l'axe du canal.

II.4. Etude de BARSCHDORF M.P et WOODBURY H.G en 1947 : [12]

En 1947, BARSCHDORF M.P et WOODBURY H.G, ont conçu un modèle de convergent en forme d'entonnoir pour étudier les caractéristiques de l'écoulement torrentiel à travers les convergents. Ils ont réalisé plusieurs expériences en faisant varier l'angle de déviation (θ) de 3° jusqu'à 30° et pour plusieurs nombres de Froude.

Le tableau (2), représente l'évolution de l'angle de propagation des ondes (β_1) en fonction de l'angle (θ) pour un nombre de Froude égal à 3,85.

β_1 : angle de propagation des ondes transversales à l'entrée du convergent

Angle de déviation (θ)	β_1 théorique	β_1 mesuré
3°	$17^\circ 35'$	$15^\circ 30'$
6°	$20^\circ 15'$	$18^\circ 15'$
9°	$23^\circ 10'$	$22^\circ 45'$
12°	$26^\circ 30'$	$26^\circ 7'$
15°	$29^\circ 30'$	$29^\circ 55'$
18°	$32^\circ 25'$	$34^\circ 15'$
21°	$35^\circ 45'$	$38^\circ 00'$
24°	$39^\circ 18'$	$41^\circ 20'$

Tableau (2)

Ils ont constaté que les valeurs mesurées sont proches des valeurs théoriques et l'angle (β_1) augmente avec l'augmentation de (θ).

D'autre part le tableau (3) donne la variation de l'angle (β_1) pour plusieurs nombres de Froude et pour un angle de déviation $\theta=6^\circ$.

F	β_1 (expérimental)	β_1 (théorique)
3,00	25° 10'	22° 00'
4,00	19° 30'	18° 40'
6,00	15° 00'	15° 10'
8,00	12° 20'	12° 45'
10,00	11° 10'	10° 30'

Tableau (3)

BARSCHDORF et **WOODBURY** ont constaté qu'il y a une concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales de l'angle (β_1). Et ce dernier diminue avec l'augmentation du nombre de Froude.

Aussi, ils ont observé que l'allure de la ligne d'eau le long de la paroi est moins perturbée pour un nombre de Froude égal à 4 qu'un nombre égal à 3, en utilisant le même modèle (figure 10, ci-dessous).

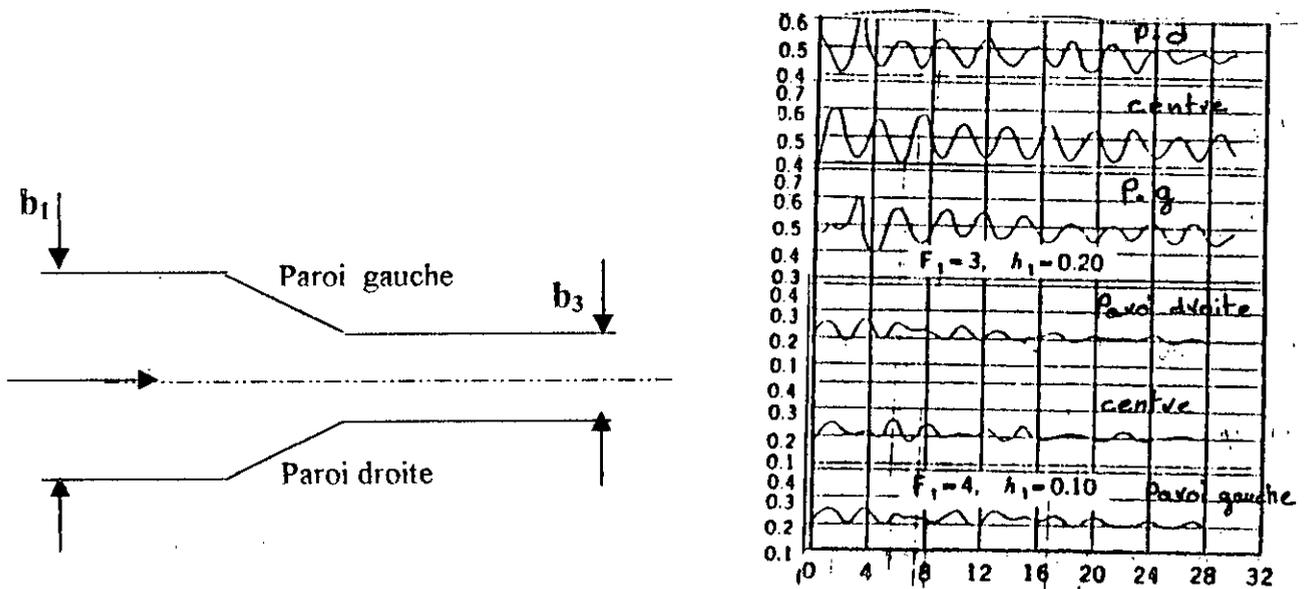


Figure (10) : l'allure de la ligne d'eau le long de la paroi d'un convergent en forme d'entonnoir.

II.5. Etude de ENGELUND FRANK et MUNCH-PETERSEN JOHS en 1953: [9]

En se basant sur les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est permanent.
- L'écoulement s'effectue dans un canal horizontal à section droite.
- L'écoulement est à potentiel de vitesse.
- Le fluide est incompressible.
- Les frottements sont négligés.
- L'influence de la tension superficielle et l'entraînement d'air sont négligés.

ENGELUND et ses collaborateurs ont présenté une étude dans le but de donner une formule mathématique de la surface libre des écoulements traversant des canaux convergents et divergents.

A partir de la résolution de l'équation de Laplace, ils ont démontré que l'expression générale de la cote de la surface libre se présente comme une série de Fourier :

$$Y = y_m + \sum a_n \sin(2\pi / \lambda) (x_n + \delta_n) \cos(n \pi z / b) \dots \dots \dots (5)$$

Avec,

y_m : la profondeur moyenne, a_n : amplitude de l'onde d'ordre n .

λ_n : longueur d'onde d'ordre n .

Les auteurs ont conclu, que la surface libre peut être considérée comme la résultante de la superposition d'une infinité d'ondes stationnaires. Pour un convergent symétrique, seule les valeurs paires de n conviennent, et les amplitudes diminuent en général très rapidement lorsque n croit, de sorte que l'angle (θ) de leur résultante ne diffère pas beaucoup de la valeur obtenue pour $n = 2$.

II.6. Étude de HAGER et BRETZ : [11]

En 1987, Hager et Bretz ont repris les résultats expérimentaux et théoriques cités précédemment et ont proposé une formule approchée de l'angle optimum de déviation des parois latérales (θ) (Figure 8, page 13).

$$\text{Arctg}(\theta) = 1/(2F_1) (b_1/b_3 - 1) \dots \dots \dots (6) \quad \text{Pour } \theta < 10^\circ$$

L'étude est basée sur le débit pour lequel la hauteur maximale de l'onde se produit. Ils ont considéré le débit maximal comme étant le débit de projet et qui correspond à une hauteur maximale de l'onde.

Les auteurs préconisent que pour de plus grandes valeurs de θ ($\theta > 10^\circ$), les résultats devront être vérifiés vis-à-vis de l'engorgement et ceci vu que l'écoulement à l'aval du convergent peut être proche de l'écoulement critique, et donc un ressaut hydraulique ondulé ($1 < F < 1,7$), peut se produire dans le rétrécissement. Un tel phénomène doit être écarté.

La conception du convergent linéaire est basée sur une valeur minimale du nombre de Froude aval $F_1 > F_3 > 2$.

II.7. Etudes effectuées au département Hydraulique de l'E.N.P :

II.7.1. Etude de BERREKSI, A et BOUHADJI, N (1993) : [3]

BERREKSI et **BOUHADJI** ont présenté une thèse d'ingénieur, qui avait pour objectif la simulation des écoulements à surface libre dans les transitions.

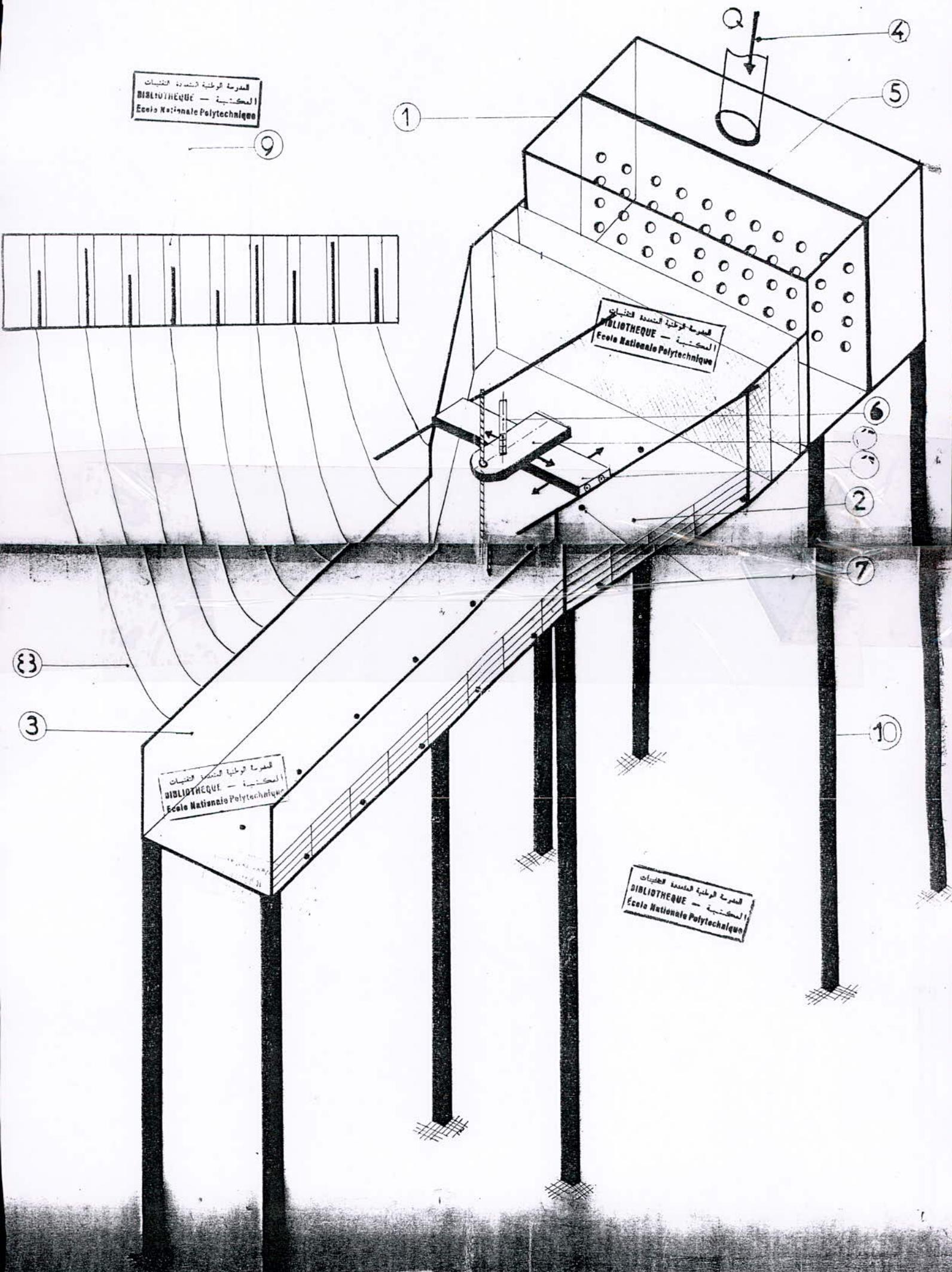
En se basant sur la forme différentielle des équations de saint-venant et les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Liquide incompressible.
- Distribution hydrostatique des pressions.
- Répartition uniforme des vitesses transversales.
- Faible pente de fond du canal.

- Les pertes de charge générales sont les mêmes que dans le cas d'un mouvement permanent et uniforme de même profondeur.

FIGURE:01 :

MODELE PHYSIQUE



- 
- 1- Réservoir
 - 2- Convergent
 - 3- Canal prismatique
 - 4- Alimentation en eau
 - 5- Plaque tranquillisante
 - 6- Chariot
 - 6' - partie de chariot permettant le déplacement suivant X.
 - 6'' - partie de chariot permettant le déplacement suivant Y
 - 7- Prise de pression
 - 8- Flexible
 - 9- piézomètre
 - 10- Support du modèle physique

Figure (37) : modèle physique

- 1- Château d'eau
- 2- Pompe
- 3- Réservoir
- 4- Modèle physique
- 5- Piézomètre
- 6- Vanne

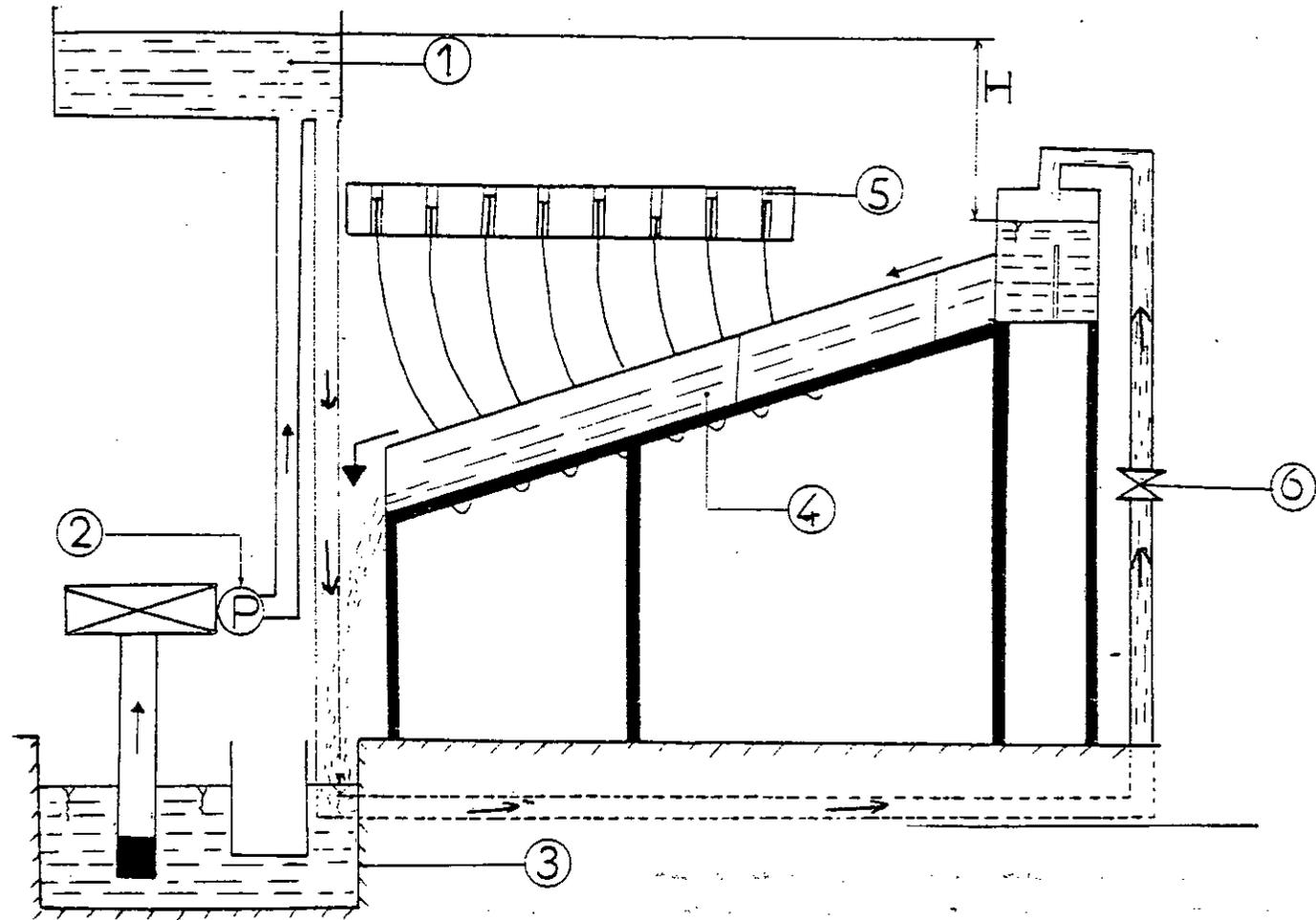


Figure (38) : Plan général de l'installation expérimentale.

Les caractéristiques dimensionnelles du canal sont (figure 39, page 52) :

- Une largeur de 50cm, une longueur de 40cm, une hauteur des parois latérales de 20cm.

IV.2.3. La transition :

Deux transitions ont été réalisées : un convergent symétrique et non symétrique

IV.2.3.1. Convergent symétrique : Le convergent symétrique utilisé est en forme d'entonnoir (variation linéaire de la section transversale), de caractéristiques dimensionnelles (figure 39, page 52) :

- La largeur amont est de 50cm, la largeur aval est de 25cm, la longueur est de 70cm, l'angle de déviation des murs latéraux est de 10° , la hauteur des murs de latéraux est de 30cm.

IV.2.3.2. Convergent non symétrique : On garde le convergent ci-dessus et on lui ajoute une plaque en Plexiglas le long de l'axe de l'écoulement.

IV.2.4. Le deuxième canal prismatique :

Un canal prismatique allonge le convergent sur une longueur de 1,65m.

Le châssis du canal prismatique et du convergent est en fer. Il est surélevé par des supports et muni à son extrémité amont de deux charnières fixées au support du réservoir permettant d'avoir des différentes valeurs de pentes du radier.

La conception du convergent est réalisée tout en vérifiant la formule donnée par Hager et Bretz [11] :

$$\text{Arctg}(\theta) = 1/2F_1(b_1/b_2 - 1) \dots \dots \dots (29) \quad \text{pour } \theta < 10^\circ$$

Les caractéristiques géométriques du convergent citées précédemment vérifient bien l'équation donnée par Ippen & Dawson (§ II.2 page 13), $L = \frac{h_1 - h_3}{2\text{tg}\theta}$, on aura un écoulement non perturbé à l'aval (dans le deuxième canal prismatique).

- 1- Réservoir
- 2- le premier canal prismatique
- 3- convergent
- 4- le deuxième canal prismatique

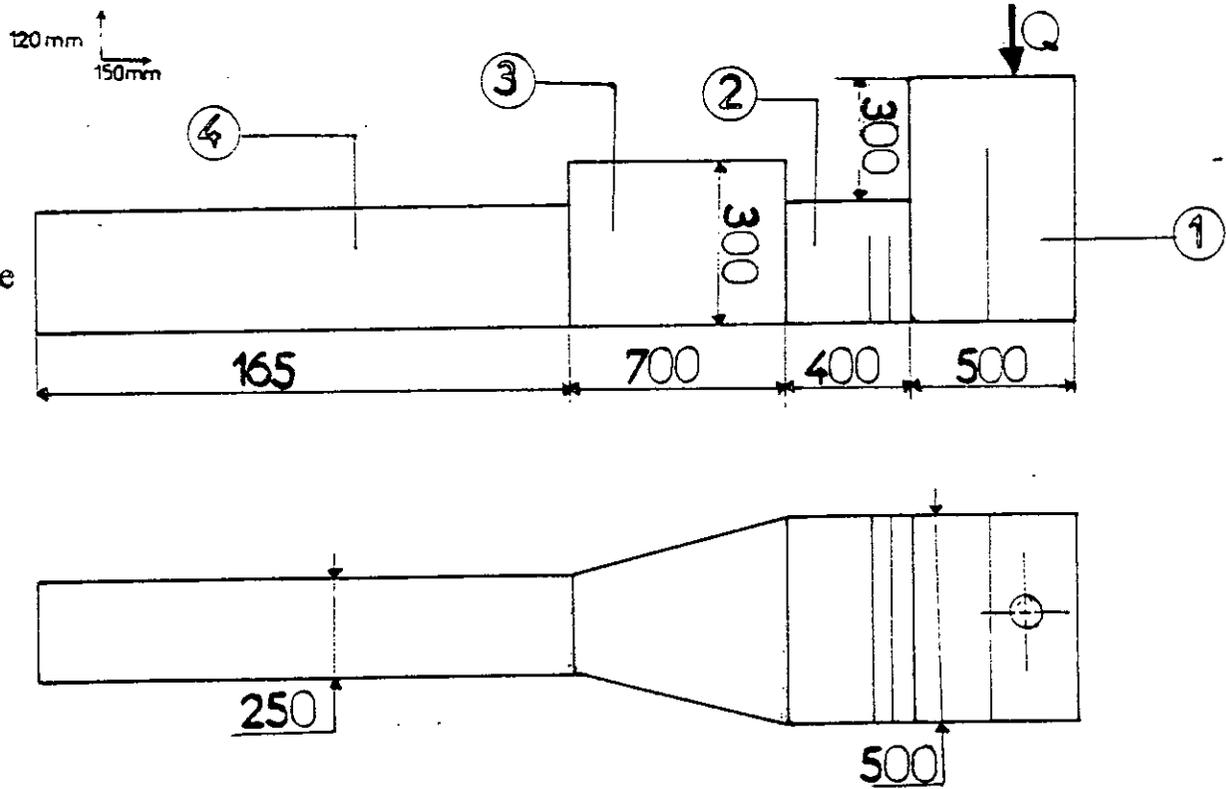


Figure (39) : Caractéristiques dimensionnelles

IV.3. Techniques de mesure :

IV.3.1. Mesure de la hauteur d'eau :

La mesure de la hauteur d'eau en différents points du modèle, est effectuée à l'aide :

- D'un tracé, sous forme de quadrillage est effectué sur les parois latérales du convergent. Ce tracé permet de mesurer directement la hauteur d'eau le long des parois latérales.
- La mesure de la hauteur d'eau dans le canal est réalisée à l'aide d'un limnimètre placé sur un chariot. Ce chariot permet le déplacement du limnimètre suivant la direction (X) et (Y). (figure40, page 54).

IV.3.2. Mesure de la pression au fond du canal :

La mesure de la pression au fond du canal s'effectue à l'aide de 40 prises de pression de diamètre de 3mm, réparties comme suit (figure 41, page 55) :

- 20 prises de pression placée le long de l'axe du canal.
- 20 prises de pression placée près des parois latérales.

Les prises de pression sont reliées à des piézomètres, fixés sur une plaque adjacente au modèle permettant la lecture directe de la pression en terme de hauteur d'eau.

Les coordonnées des prises de pression sont données dans le tableau 4(page 59).

IV.3.3. Mesure du débit :

La mesure du débit est effectuée par l'intermédiaire d'un appareil appelé "débitmètre non intrusif ICC - FLOWCHECK -" (figure42, page 56), préalablement étalonné.

IV.3.3.1. Présentation de l'appareil :

Le débitmètre non intrusif ICC est composé de :

- Un moniteur portable, un câble de raccordement, un capteur.

IV.3.3.2. Principe de fonctionnement : La mesure du débit de fluide, dans une canalisation est basée sur le principe de Doppler :

“ La variation de la fréquence du son est fonction de la vitesse relative entre une source de son et un objet qui se déplace “.

Dans notre cas, la variation de fréquence est directement proportionnelle à la vitesse relative entre le capteur fixé sur la canalisation et les particules transportées par le fluide.

IV.3.3.3. Conversion du débit :

Après avoir relevé plusieurs mesures et afin d'obtenir une moyenne significative de la vitesse du fluide, on applique la formule d'étalonnage pour convertir cette vitesse en débit :

$$Q = C. D^2. V \dots \dots \dots (30)$$

Où :

Q : débit du fluide en (L/min), V : vitesse exprimée en (m/sec), D : diamètre interne de la canalisation en (cm), C : constante donnée par le constructeur égale à : 4,71.

Les résultats obtenus sont vérifiés par étalonnage volumétrique.

IV.3.3.4. Mesure de la vitesse :

Comme des appareils de mesure de vitesse n'étant pas disponibles, nous avons calculé la vitesse moyenne à partir de la formule suivante :

$$V_m = Q / A \dots \dots \dots (31).$$

Où :

V_m : la vitesse moyenne d'écoulement en (m/sec), Q : débit d'écoulement en (L/min), A : section mouillée, elle se calcule soit par Planimétrie ou par intégration en utilisant la méthode des trapèzes.

- 1- Partie de chariot permettant le déplacement suivant X
- 2- Partie de chariot permettant le déplacement suivant Y
- 3- Convergent
- 4- Rail

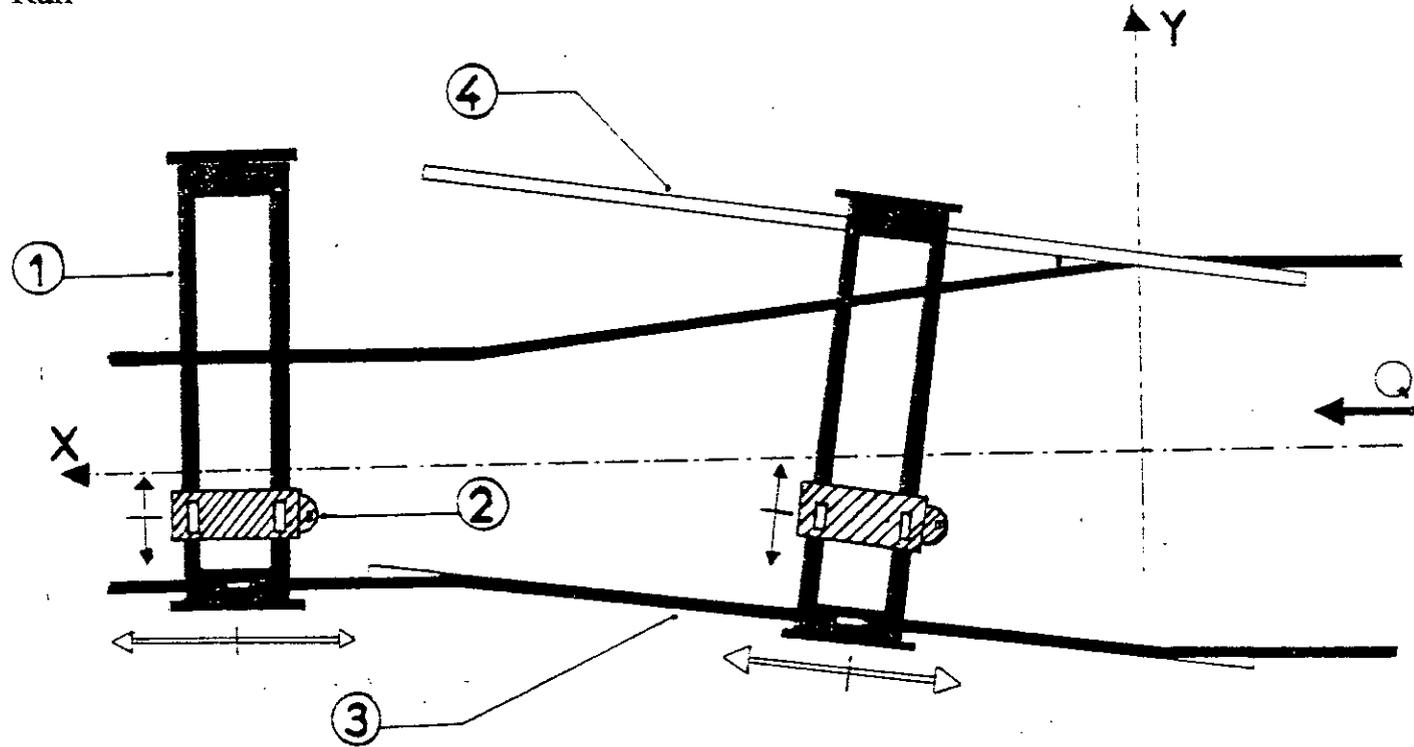


Figure (40) : Technique de mesure de la hauteur d'eau

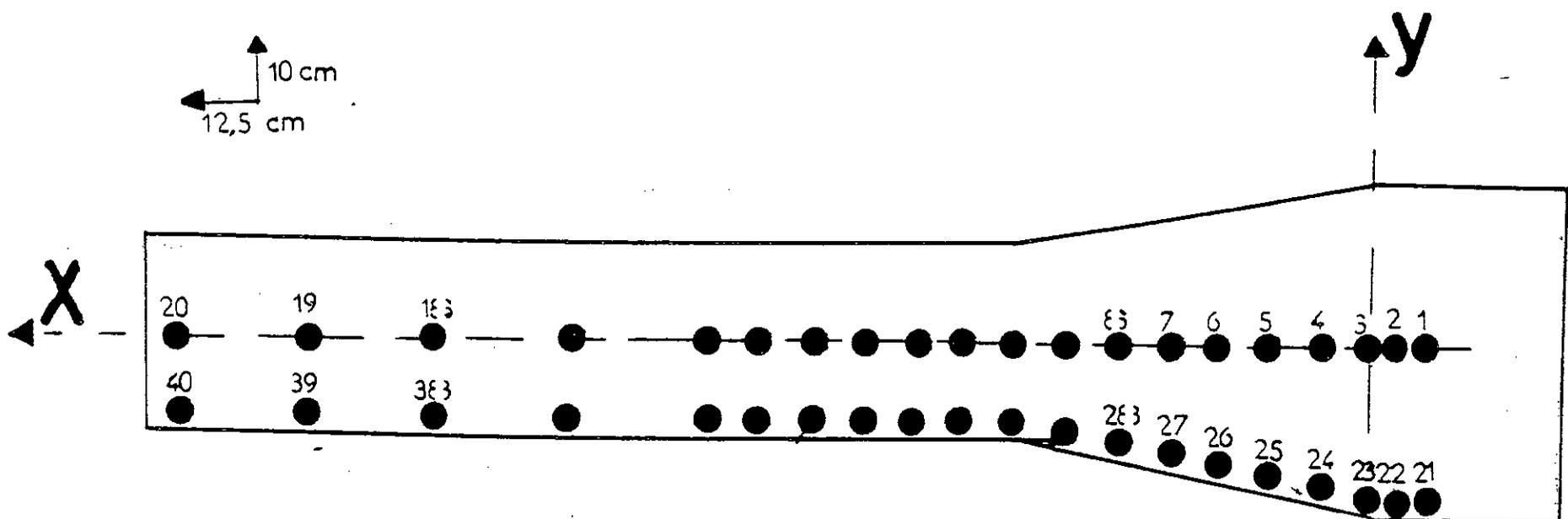


Figure (41) : Répartition des prises de pression

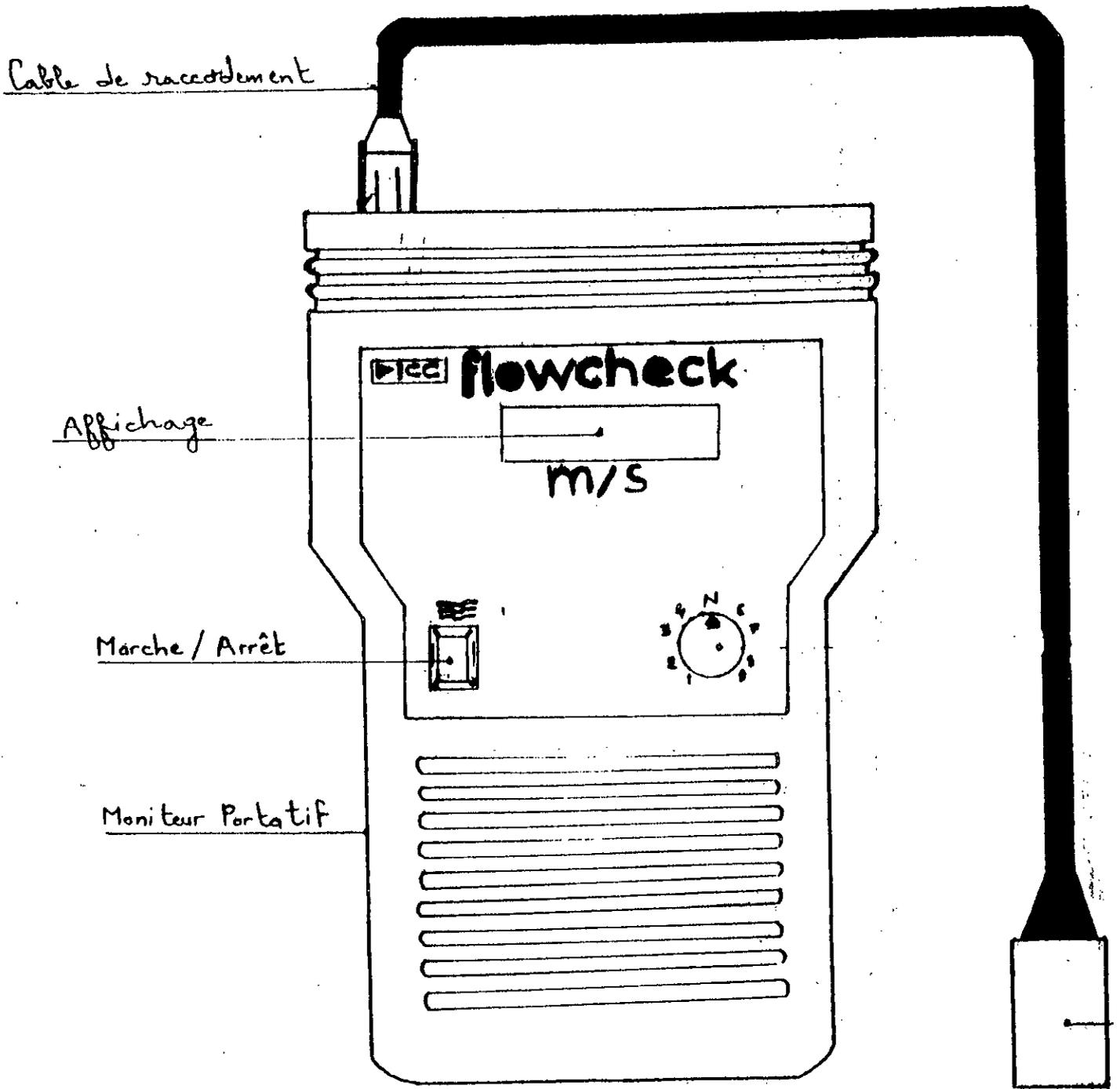


Figure (42) : Débitmètre intrusif - ICC-

Numéro D'orifices	X _(cm)	Y _(cm)
1	-10	0
2	-5	0
3	0	0
4	10	0
5	20	0
6	30	0
7	40	0
8	50	0
9	60	0
10	70	0
11	81	0
12	90	0
13	100	0
14	110	0
15	120	0
16	130	0
17	156	0
18	182	0
19	207	0
20	232,5	0

Numéro D'orifices	X _(cm)	Y _(cm)
21	-10	-23
22	-5	-23
23	0	-23
24	10	-21,5
25	20	-20
26	30	-18,5
27	40	-16,5
28	50	-15
29	60	-13
30	70	-12
31	81	-12
32	90	-12
33	100	-12
34	110	-12
35	120	-12
36	130	-12
37	156	-12
38	182	-12
39	207	-12
40	232,5	-12

Tableau (4) : les coordonnées des prises de pression

IV.4. Canevas de mesure :

Après avoir réalisé le premier modèle (convergent symétrique) nous avons effectué une première mise en eau, afin de détecter les lieux où les fuites sont les plus importantes.

- On fixe la pente.
- On ouvre la vanne d'alimentation des modèles pour faire varier le débit.
- Pour un débit donné, on mesure :
 - Les profondeurs d'eau.
 - Les pressions.
- Puis on change la pente et on refait le même canevas de mesure.

Pour chaque modèle nous avons considéré quatre pentes différentes ($\alpha=0^\circ, 5^\circ, 13.5^\circ$ et 38°).

On ouvre la vanne pour des différentes valeurs de débit à savoir : ($Q=5$ l/s ; 7 l/s ; 8.5 l/s).

La lecture de la hauteur d'eau et de la pression est effectuée une fois la stabilité de l'écoulement est atteinte.

On suit la même procédure de mesure pour le deuxième modèle (convergent non symétrique).

IV.5. Observations :

IV.5.1 Convergent symétrique :

- Pour une pente du radier d'angle (α) égale 0° :

Un essai préliminaire est réalisé sur un canal horizontal, avec un débit de 6 l/s. Au cours de cet essai, on observe l'apparition des ondes latérales à l'entrée du deuxième canal prismatique.

Après une courte distance, la ligne d'eau est devenue stable et non perturbée le long du canal prismatique.

En augmentant le débit ($Q = 7$ l/s), on observe une surface libre stable et décroissante dans le convergent. A l'amont du deuxième canal prismatique, la ligne d'eau présente des perturbations provenant de la formation des ondes latérales. L'intersection des fronts d'ondes ne provoque pas des perturbations considérables.

En augmentant le débit ($Q = 8.5$ l/s), la ligne d'eau devient stable dans le convergent. Elle décroît en fonction de la distance, la diminution se fait progressivement, aussi, pour ce débit les ondes latérales de faible amplitude se forment à l'entrée du deuxième canal prismatique et se propagent vers l'aval. Une surélévation d'eau est observée à la paroi à une distance

$x = 80$ cm, puis la ligne d'eau devient stable.

- Pour une pente du radier d'angle (α) égal à 5° ; trois débits ont été considérés, $Q = 5$ l/s ; $Q = 7$ l/s et $Q = 8.5$ l/s :

Pour $Q = 5$ l/s, des ondes transversales se forment dans le convergent, l'intersection des fronts d'ondes provoque une surélévation importante de la ligne d'eau. Les réflexions des fronts d'ondes s'effectuent dans le canal prismatique.

Pour un débit égal à 7 l/s on a relevé les observations suivantes :

Les ondes transversales se propagent vers l'aval. Il y a deux surélévations distinctes sur la ligne d'eau le long de l'axe de symétrie, la première à l'intersection des ondes latérales dans le convergent et la deuxième se trouve loin du convergent. La réflexion des fronts d'ondes au niveau des parois latérales s'effectue dans le canal prismatique et perturbe la surface libre.

Enfin, pour le débit $Q = 8.5$ l/s la surface libre est perturbée par la présence des ondes transversales, dans ce cas deux intersections des fronts d'ondes ont été observées, la première s'effectue à l'intérieur du convergent ($x = 50$ cm). La deuxième intersection est observée plus

loin dans le canal prismatique, mais elle ne provoque pas une surélévation importante. A l'entrée du canal prismatique, il y a une propagation d'onde latérale de faible amplitude provenant du convergent.

- Pour une pente du radier d'angle (α) égale à 13.5° ; trois débits ont été considérés :

Pour $Q = 5$ l/s, la surface libre est perturbée, l'intersection des ondes, provenant de l'entrée du convergent, s'effectue à l'extrémité aval du convergent. Les ondes se réfléchissent sur les parois latérales, provoquant un écoulement agité.

Pour $Q = 7$ l/s, on constate que l'intersection des ondes se déplace vers l'amont, elle s'effectue à $x = 70$ cm. On observe aussi l'apparition des poches d'air juste à la sortie du convergent.

De même, pour le débit de 8.5 l/s l'intersection des ondes dans le convergent se déplace vers l'amont, effectivement, elle est observée à $x = 68$ cm. La réflexion des ondes sur les parois latérales provoque une grande surélévation.

- Pour une pente du radier d'angle (α) égal à 38° ; trois débits ont été considérés :

Pour le premier débit $Q = 5$ l/s, la surface libre est relativement stable, et présente la formation des poches d'air juste à la sortie du canal convergent, aussi des ondes latérales de faibles amplitudes sont observées le long du canal convergent.

L'intersection des ondes, s'effectue à l'aval du convergent et entraîne une surélévation de la hauteur d'eau prolongée sur une distance de 30 cm.

Pour le débit de 7 l/s, la surface libre est fortement perturbée le long du canal à cause de l'existence de l'entraînement d'air.

L'intersection des ondes latérales, s'effectuant au niveau de l'axe du deuxième canal prismatique, provoque une hauteur d'eau importante, prolongé vers l'aval.

Pour le débit de 8.5 l/s la surface libre est caractérisée par la présence de la mousse le long des fronts d'ondes jusqu'à leur intersection, mais au-delà, la mousse se prolonge le long de l'axe du canal.

A l'entrée du deuxième canal prismatique les poches d'air sont bien développées.

IV.5.2. Convergent non symétrique

- Pour une pente du radier d'angle (α) égal à 0° , on considère les trois débits suivants :

- $Q = 5$ l/s, 7 l/s et 8.5 l/s.

Pour $Q = 5$ l/s la surface libre présente la formation de plusieurs ondes stationnaires de faible amplitude, or dans le canal prismatique une onde latérale se propage et se réfléchit sur les parois latérales du modèle.

En augmentant le débit jusqu'à 7 l/s, on a tiré pratiquement les mêmes observations : l'existence des ondes stationnaires dans le convergent, la formation d'une onde latérale à la sortie du convergent qui se réfléchit loin sur la paroi opposée.

En augmentant le débit ($Q = 8.5$ l/s), la ligne d'eau est stable et décroissante dans le convergent, l'écoulement dans le canal prismatique présente des particularités du type ondes latérales.

- Pour une pente du radier d'angle α égal à 5° ; trois débits ont été considérés :

Pour le débit ($Q=5$ l/s), la surface libre est perturbée à cause de la présence des ondes superficielles et la propagation des ondes latérales du côté de la paroi déviée. La superposition de deux ondes engendre surélévation de la ligne d'eau le long de l'axe. Les ondes résultantes se réfléchissent sur les deux murs latéraux produisant une hauteur d'eau distincte.

Une intersection s'effectue à l'entrée du canal prismatique ($x = 80$ cm) engendrant une hauteur d'eau de 4.3 cm. Cette intersection produit une onde qui se propage vers l'aval et ne provoque pas des perturbations significatives.

En augmentant le débit ($Q= 7$ l/s) on note :

Juste à l'entrée du convergent, une onde latérale se propage de la paroi rectiligne vers la paroi opposée en créant une surélévation de la hauteur d'eau à la paroi latérale, ensuite elle se réfléchit sur l'autre paroi opposée du canal prismatique.

En augmentant le débit ($Q = 8.5$ l/s), on observe que la surface libre dans la zone de transition se compose de plusieurs losanges dues à l'interférence des ondes superficielles. L'onde qui prend naissance au début de la paroi déviée se réfléchit sur la paroi droite à $x = 50$ cm, puis, elle se réfléchit une deuxième fois sur la paroi droite du canal prismatique à $x = 90$ cm.

Au niveau des parois latérales, la ligne d'eau tend à décroître dans le convergent puis elle présente une surélévation dans le canal prismatique.

- Pour une pente du radier d'angle (α) égal à 13.5° , trois débits ont été considérés :

Pour le débit de 5 l/s, la surface libre présente des perturbations du type ondes transversales et se caractérise par la présence d'une onde latérale au début de la paroi déviée.

La rencontre de l'onde latérale avec les ondes superficielles de faibles amplitudes est observée dans le canal convergent. Cela provoque des ondes dirigées vers les deux parois. La réflexion de ces ondes sur les parois s'effectue juste à la sortie du convergent.

En augmentant le débit de 7 l/s, l'onde qui prend naissance au début de la paroi déviée, se partage en deux ondes, l'une se réfléchit à la sortie de la paroi déviée et n'entraîne pas une perturbation distincte, l'autre se réfléchit sur la paroi opposée à la même section.

En augmentant le débit de 8.5 l/s, la surface libre devient fortement perturbée et présente l'entraînement d'air d'une façon importante. De même, l'onde provenant de l'entrée du convergent se réfléchit à la sortie du convergent sur la paroi du côté rectiligne. L'intersection entre l'onde réfléchi et l'onde négative se produit dans le canal prismatique, produisant une onde dirigée vers la paroi du côté déviée.

- Pour une pente du radier d'angle (α) égal à 38° , trois débits ont été considérés :

Pour un débit de 5 l/s, la surface libre présente des perturbations de type ondes superficielles, ainsi que l'entraînement d'air.

L'intersection des ondes s'effectue juste à la sortie du convergent et provoque une surélévation progressive le long de l'axe du canal prismatique.

En cours de cet essai, on a observé des poches d'air juste à la sortie du convergent.

En augmentant le débit ($Q= 7$ l/s), la surface libre présente de grandes perturbations. L'intersection des ondes superficielles s'effectue à $x = 67$ cm, on note aussi la présence du phénomène d'entraînement d'air et la formation des poches d'air.

En augmentant le débit ($Q= 8.5$ l/s) : la surface libre est fortement perturbée à cause de l'existence de la mousse, l'intersection des ondes superficiels avec l'onde latérale à $x = 67$ cm.

IV.6. Analyses et résultats :

On présente dans cette partie une analyse de l'écoulement dans le convergent symétrique et on traite l'effet de l'augmentation de la pente du radier sur les caractéristiques de l'écoulement.

Les résultats obtenus seront comparés avec des résultats expérimentaux, théoriques et numériques d'autres études antérieures.

IV.6.1. Convergent symétrique :

Pour une pente d'angle (α) égale à 0° : d'après les résultats obtenus dans cet essai, on remarque que :

-a) Les profils de la surface libre, le long de l'axe médian et de la paroi pour un débit de 8.5 l/s, représentées dans les figures (43) et (44) respectivement montre que la ligne d'eau décroît progressivement.

- D'après la figure (48) on constate que l'écoulement est fluvial le long du canal $F < 1$.
- Ces courbes présentent des formes semblables à celles obtenus par IPPEN et DAWSON[10]

-b) La variation de la pression le long de l'axe et de la paroi pour les débits 8.5 l/s et 5 l/s est donnée sur les figures (45) et (46). On remarque que le tracé suit l'allure de la ligne d'eau ce qui montre une distribution hydrostatique de la pression sans tenir compte des perturbations existantes sur la surface libre.

-c) La représentation de la variation de la vitesse le long de l'axe et de la paroi est donnée dans la figure (47). On constate que : la vitesse de l'écoulement diminue avec la profondeur.

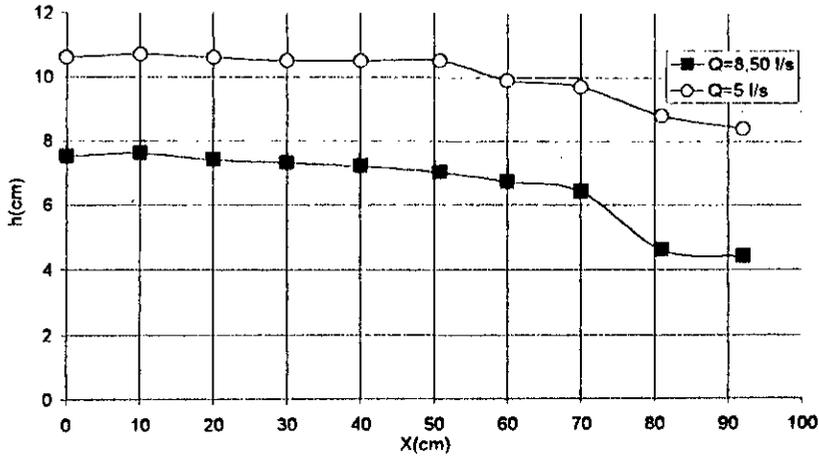
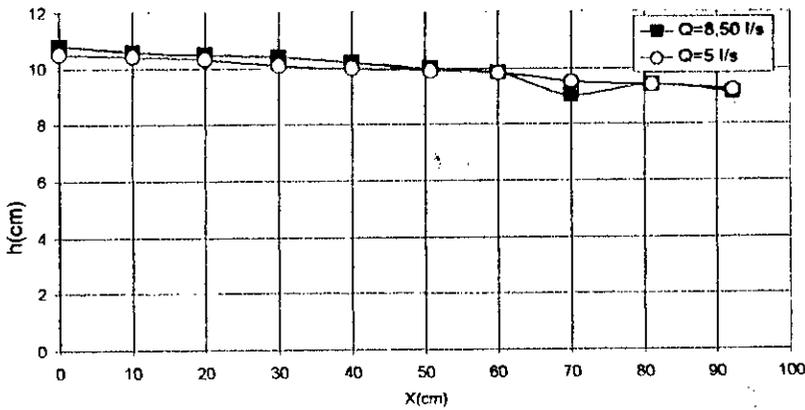


Figure (43): L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent symétrique pour $\alpha = 0^\circ$



Figure(44): L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent symétrique pour $\alpha = 0^\circ$

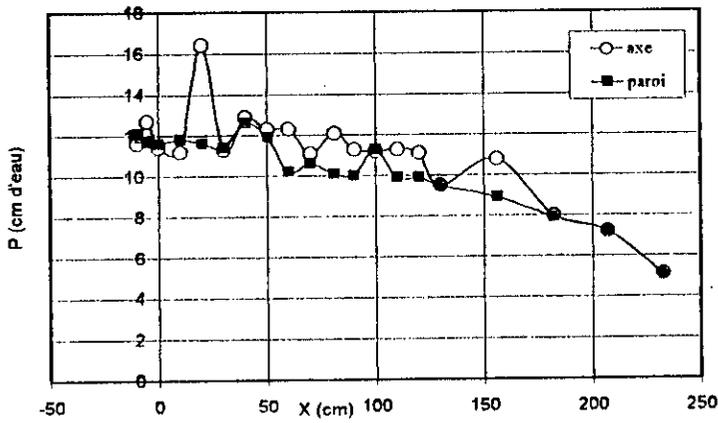


Figure (45) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 0^\circ$, $Q = 8.50$ l/s)

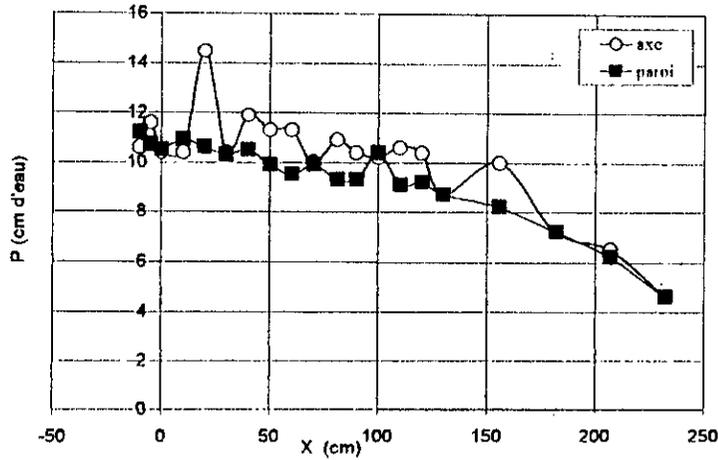


Figure (46): Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 0^\circ$, $Q = 5 \text{ l/s}$)

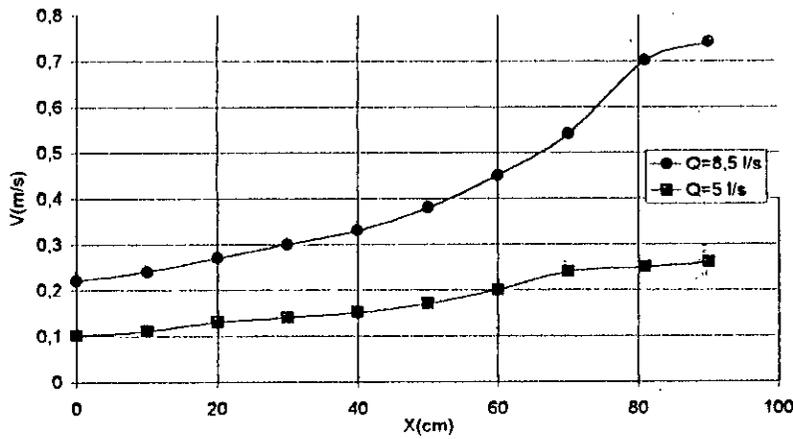


Figure (47): Profil de la vitesse dans un convergent symétrique horizontal

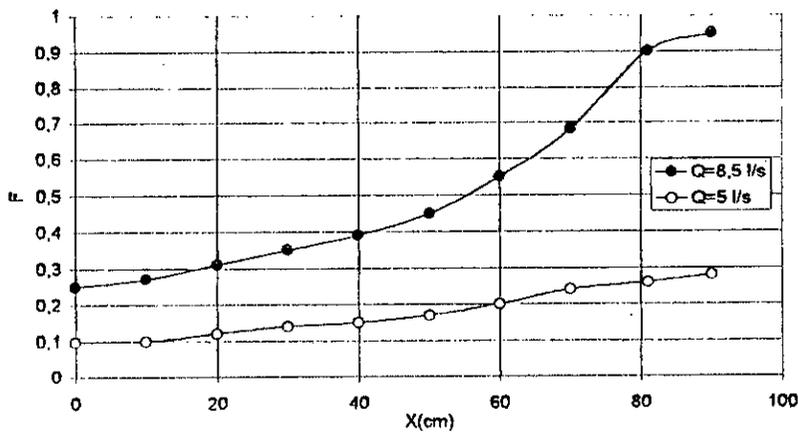


Figure (48): Variation de nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent symétrique horizontale

Pour une pente d'angle (α) égale à 5° :

-a) Les profils de la surface libre obtenus le long de l'axe lors d'un écoulement torrentiel (figure 55) sont illustrés dans les figures (49) et (50).

Pour les débits 5 l/s, 7 l/s et 8.5 l/s, les principales constatations sont :

- La ligne d'eau au niveau de l'axe de l'écoulement présente une surélévation brusque de la hauteur d'eau, cette surélévation dans le convergent se déplace vers l'amont en faisant augmenter le débit. Ces surélévations se traduisent par la présence d'intersection des fronts d'ondes.
- En ce qui concerne l'allure de la ligne d'eau le long de la paroi (figure 50), on constate qu'il y a une diminution progressive de la profondeur d'eau jusqu'à $x = 60$ cm, suivi d'une augmentation juste à la sortie du convergent.
- La surface libre dans le canal prismatique présente des perturbations, cela est dû à la réflexion des fronts d'ondes qui ne touche pas exactement les parois à la fin des transitions ce qui engendre un écoulement agité dans le canal prismatique.
 - b) Les profils de la variation de la pression gardent la même forme pour les trois débits.
- Une augmentation brusque de la profondeur d'eau provoque une diminution de la pression ce qui implique une distribution non hydrostatique de la pression, cela se traduit par la présence des perturbations sur la surface libre. (figure 51, 52 et 53)
 - c) D'après la figure (54) qui donne la variation de la vitesse de l'écoulement en fonction de l'abscisse x . On remarque l'augmentation de la vitesse qui a lieu exactement au niveau de la diminution de la profondeur.

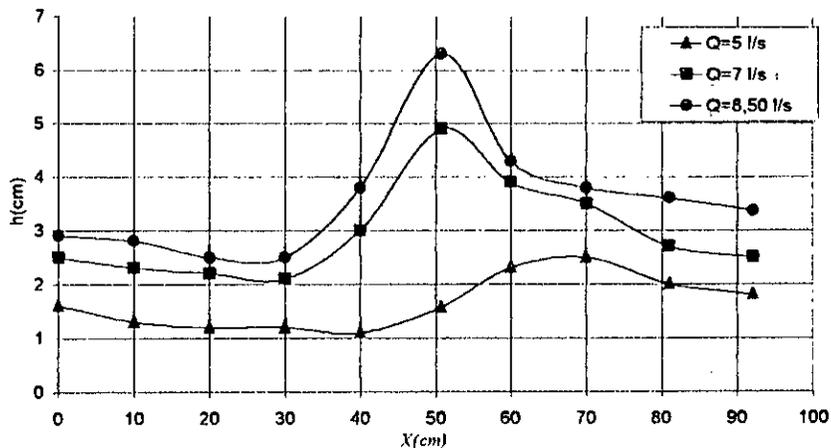


Figure (49): L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent symétrique pour $\alpha = 5^\circ$

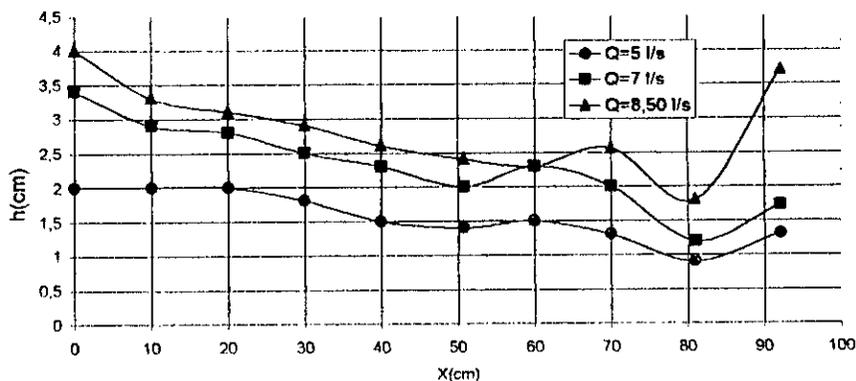


Figure (50): L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent symétrique pour $\alpha = 5^\circ$

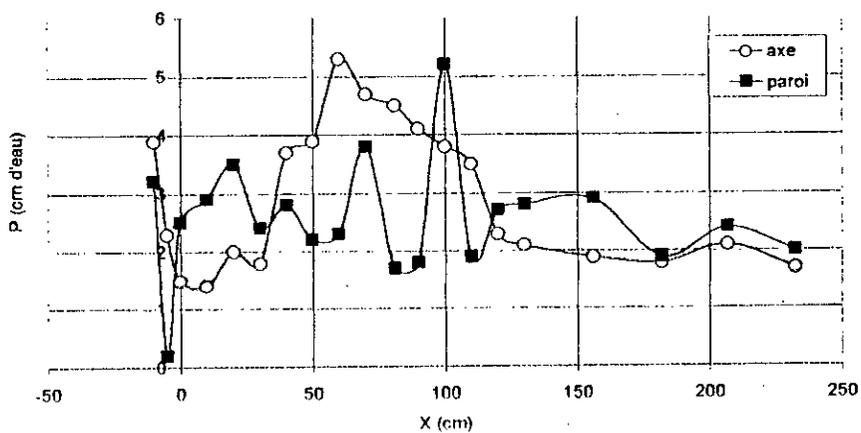


Figure (51): Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 5^\circ$, $Q = 5 \text{ l/s}$)

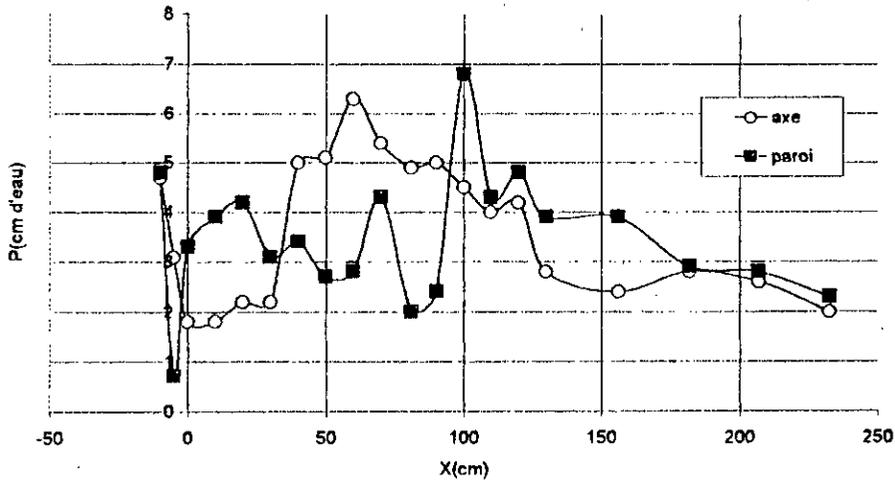


Figure (52) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = -5^\circ, Q=7 \text{ l/s}$)

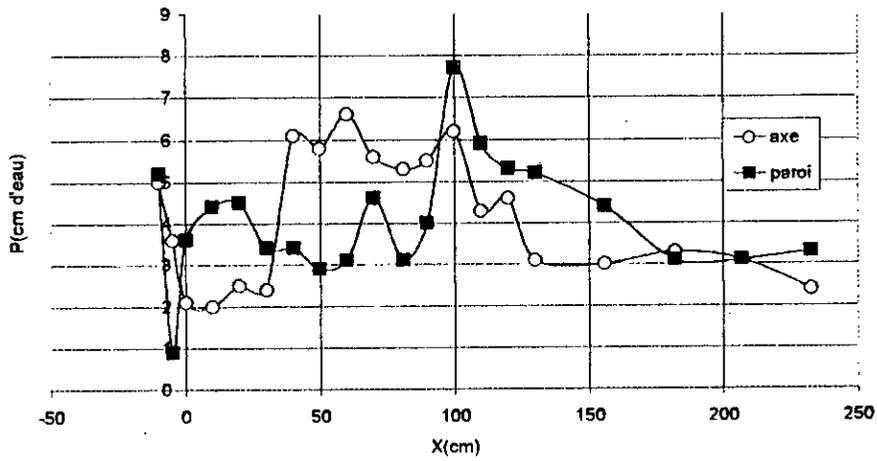
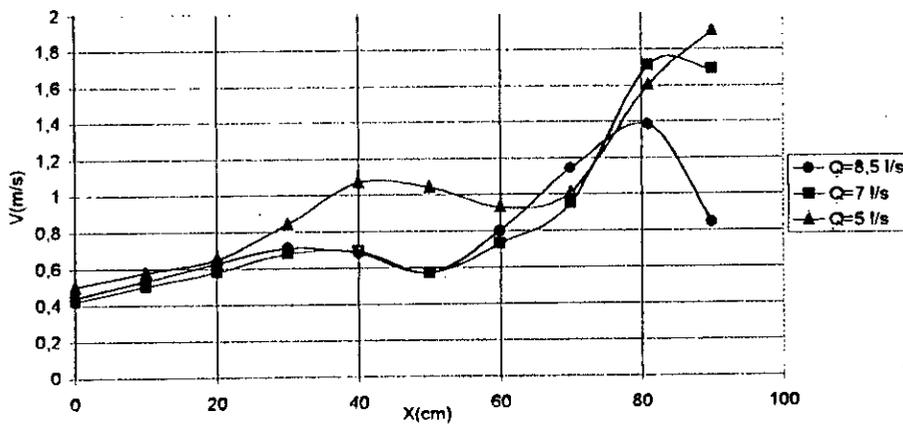


Figure (53) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = -5^\circ, Q=8.5 \text{ l/s}$)



Figure(54) : Profil de vitesse dans un convergent symétrique ($\alpha = 5^\circ$)

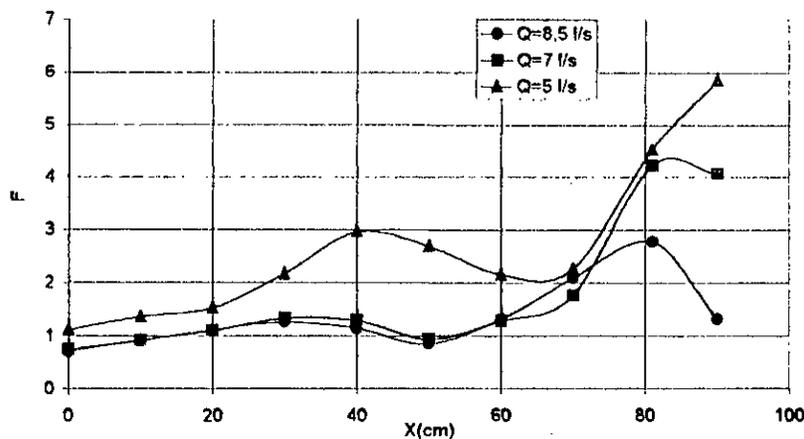


Figure (55): variation de nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent symétrique ($\alpha = 5^\circ$)

Pour une pente d'angle (α) égale à 13.5° :

-a) Les figures (56) et (57) donnent respectivement les profils de la ligne d'eau au niveau de l'axe et de la paroi lors d'un écoulement torrentiel (d'après la figure 62) pour les trois débits 5, 7, 8.5 l/s

A la lumière des résultats obtenus, on remarque au niveau de l'axe que :

- La surface libre tend à décroître jusqu'à l'abscisse $x = 60$ cm suivi d'une augmentation de la profondeur d'eau pour les trois débits.
- En augmentant le débit la surélévation se déplace vers l'aval.
- L'allure de ligne d'eau est ondulée dans le convergent puis elle se rabaisse brusquement à la sortie de la transition, cela se traduit par la formation des poches d'air.

-b) En ce qui concerne la variation de la pression le long de l'axe et de la paroi donnée sur les figures (58, 59 et 60) pour les débits 5, 7 et 8.5 l/s, l'allure diffère de celle de la ligne d'eau, cela revient au fait que la répartition de la pression n'est pas hydrostatique à cause de la présence de plusieurs phénomènes qui rendent la surface libre très perturbée à savoir les ondes transversales et l'entraînement d'air.

-c) En se basant sur les résultats représentés sur la figure (61), on constate que la vitesse augmente avec l'augmentation du débit.

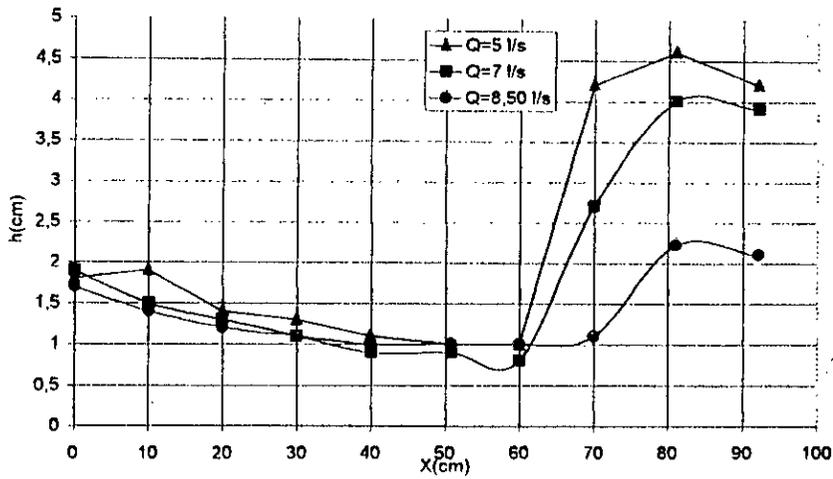


Figure (56) : L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent symétrique pour $\alpha=13.5^\circ$

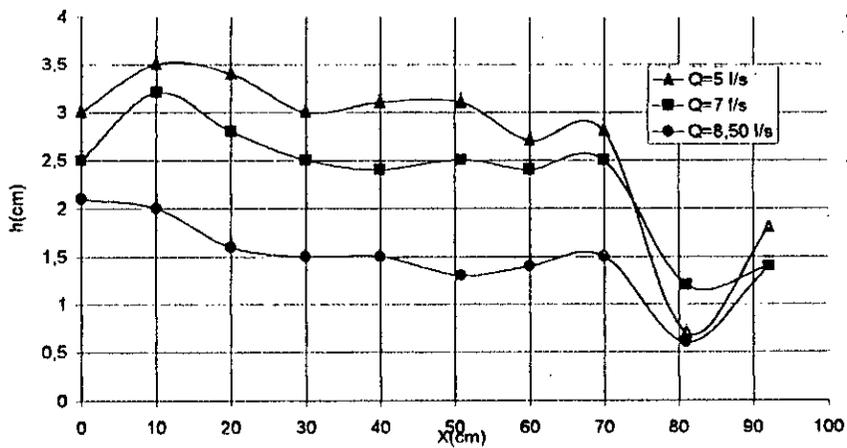


Figure (57) : L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent symétrique $\alpha=13.5^\circ$

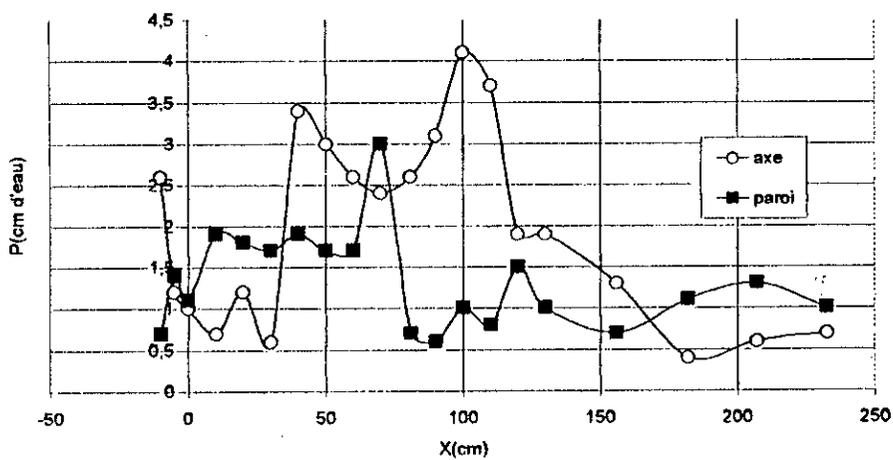


Figure (58) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha=13.5^\circ, Q=5 \text{ l/s}$)

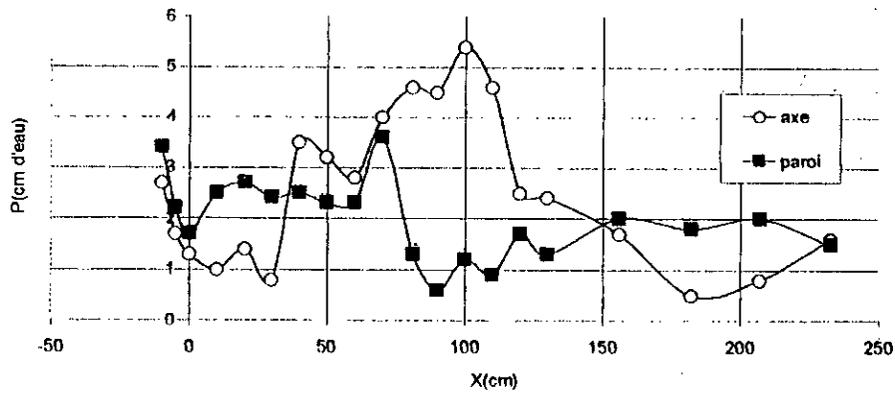


Figure (59) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 13,5^\circ, Q=7$ l/s)

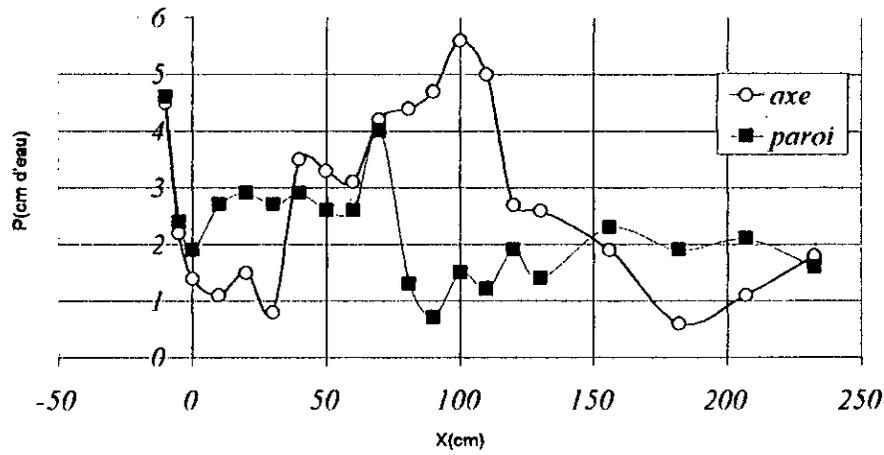


Figure (60) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 13,5^\circ, Q=8,5$ l/s)

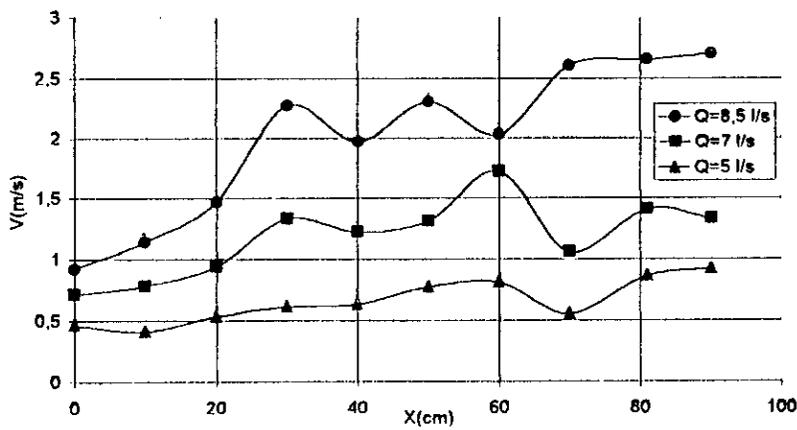
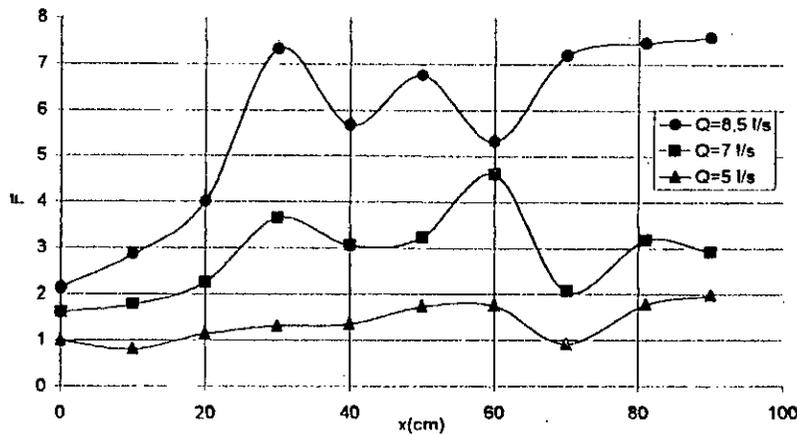


Figure (61) : profil de vitesse dans un convergent symétrique ($\alpha = 13,5^\circ$)



Figure(62) : Variation de nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent symétrique ($\alpha = 13,5^\circ$)

- Pour une pente du radier d'angle (α) égale à 38°
 - a) Les figures (63 et 64) donnent respectivement les profils de la ligne d'eau le long de l'axe de symétrie et la paroi latérale.
- Lors d'un écoulement torrentiel (figure 69) on remarque :
 - Au niveau de l'axe, la ligne d'eau décroît progressivement puis une surélévation de la hauteur se manifeste à la fin du convergent. La ligne d'eau se déplace vers l'amont en faisant augmenter le débit.
 - Au niveau des parois, la ligne d'eau est irrégulière et ondulée, elle présente plusieurs surélévations, cela se traduit par la naissance des ondes superficielles en plus du phénomène d'entraînement d'air.
 - A l'entrée du canal prismatique la ligne d'eau atteint son maximum juste à l'entrée du canal prismatique à cause de la présence des poches d'air.
- b) La variation de la pression est présentée dans les figures (65, 66 et 67), donnent ce qui suit :
 - L'allure du profil de la pression diffère de l'allure de celle de la ligne d'eau, d'où la répartition de la pression est non hydrostatique, on interprète ces résultats par l'irrégularité de la surface libre.
 - c) Dans la figure (68) on a représenté le profil de la vitesse, on remarque qu'elle varie proportionnellement avec le débit, elle atteint le pic à l'entrée du canal prismatique.

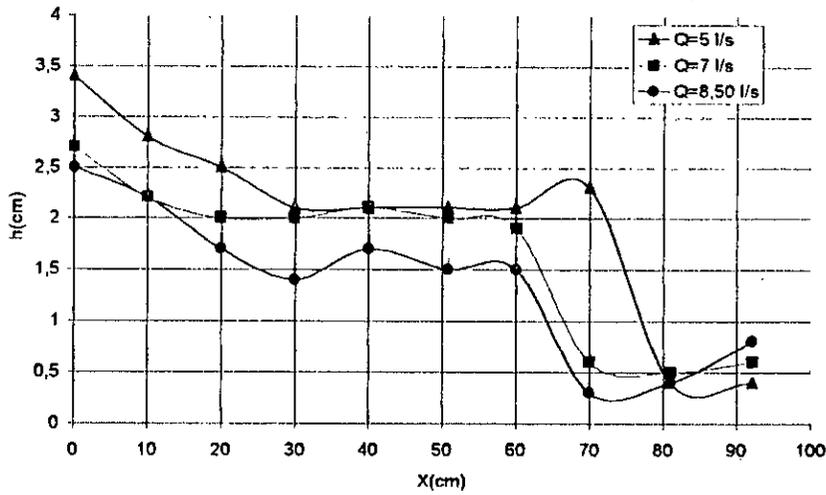


Figure (63) : L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent symétrique pour $\alpha = 38^\circ$

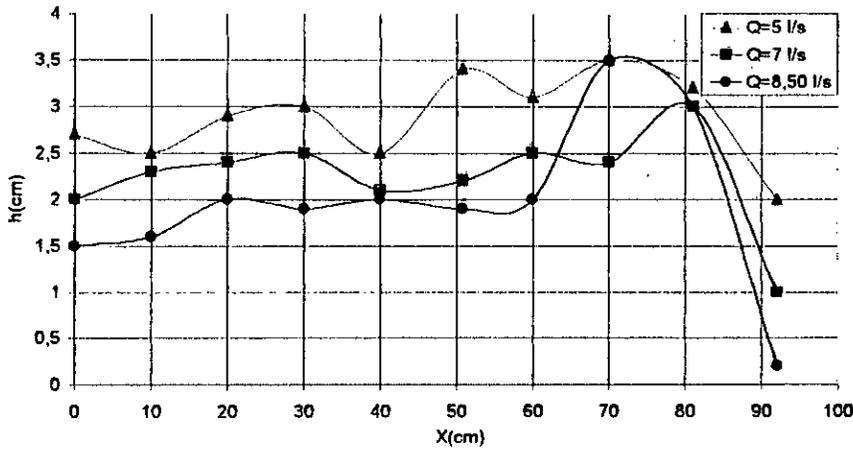


Figure (64) : L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent symétrique pour $\alpha = 38^\circ$

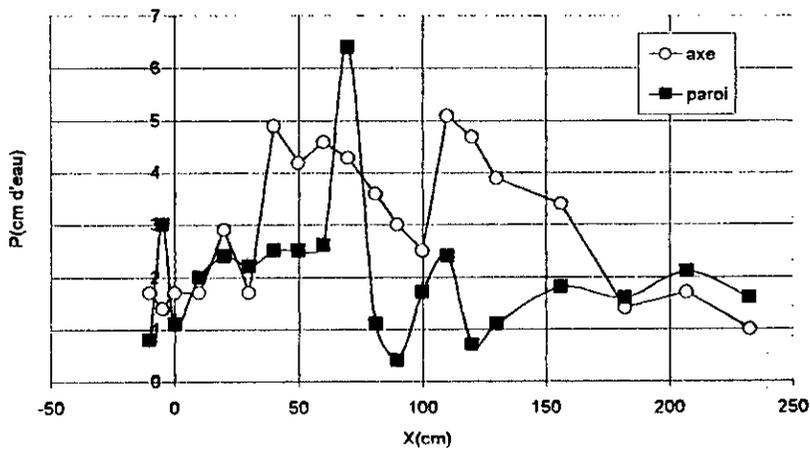


Figure (65) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 38^\circ$, $Q = 5$ l/s)

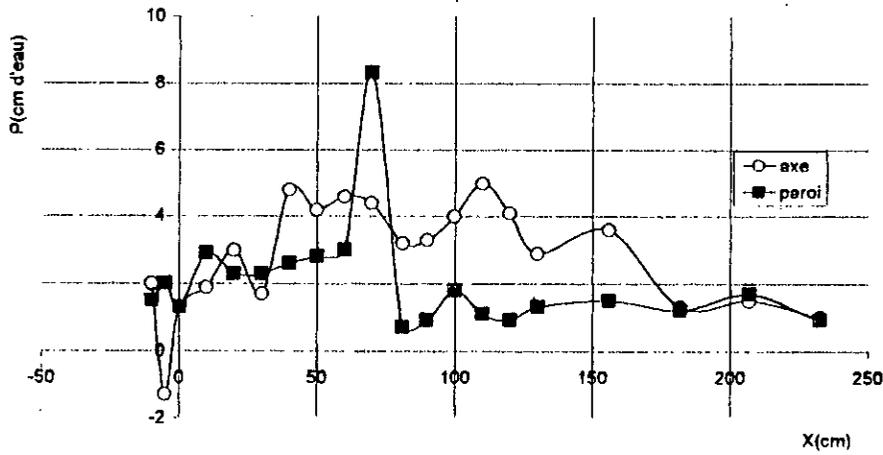
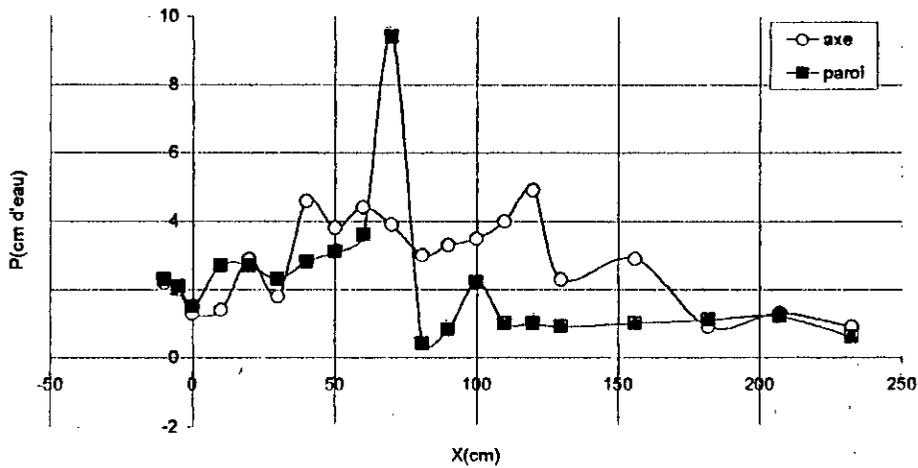
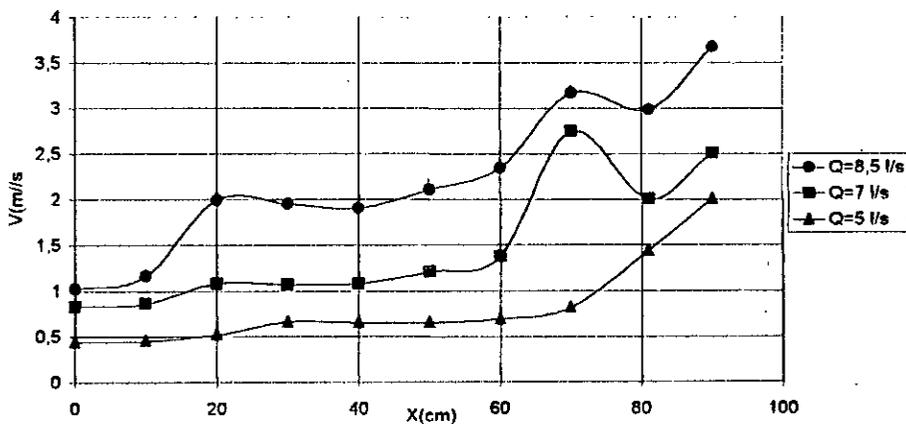


Figure (66): Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 38^\circ, Q=7 \text{ l/s}$)



Figure(67) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent symétrique ($\alpha = 38^\circ, Q=8.5 \text{ l/s}$)



Figure(68) : Profil de vitesse dans un convergent symétrique ($\alpha = 38^\circ$)

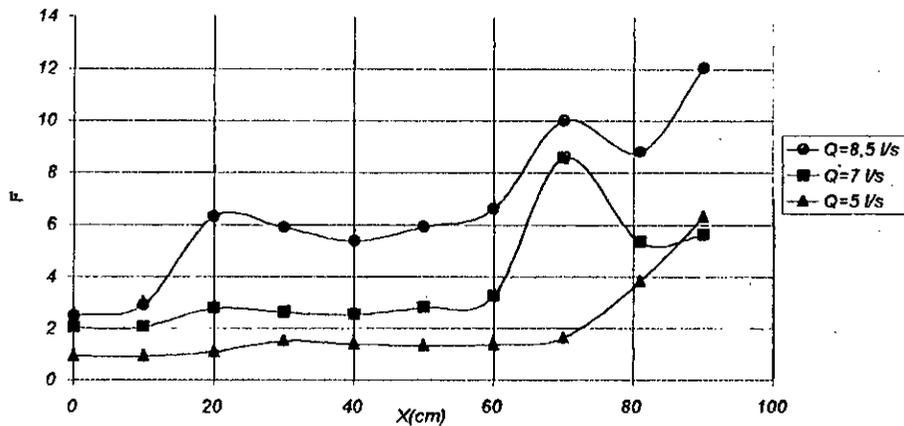


Figure (69) : Variation de du nombre de Froude dans un convergent symétrique ($\alpha = 38^\circ$)

IV.6.2. Convergent non symétrique :

Pour une pente d'angle (α) égale à 0° :

-a) D'après l'allure de la ligne d'eau le long de l'axe et de la paroi du canal (figures 70 et 71), on constate que la surface libre est stable dans le convergent, puis elle chute progressivement juste à la jonction. Ceci est la conséquence d'un écoulement fluvial (figure 76).

-b) Le profil de la pression le long du canal (figures 72, 73 et 74), présente une allure semblable à l'allure de la ligne d'eau ; donc la répartition de la pression est hydrostatique.

-c) La vitesse de l'écoulement (figure 75) augmente avec l'augmentation du débit, cette augmentation est proportionnelle avec la distance (x), elle atteint sa valeur maximale à la sortie de la transition.

- On note que, pour le débit de 8.5 l/s (figure 76), la surface libre dans le canal prismatique présente des ressauts ondulés ($1 < F < 1.7$).

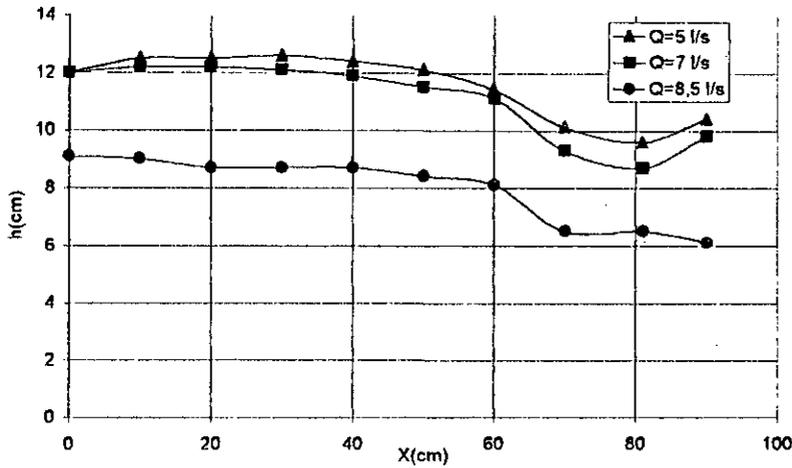
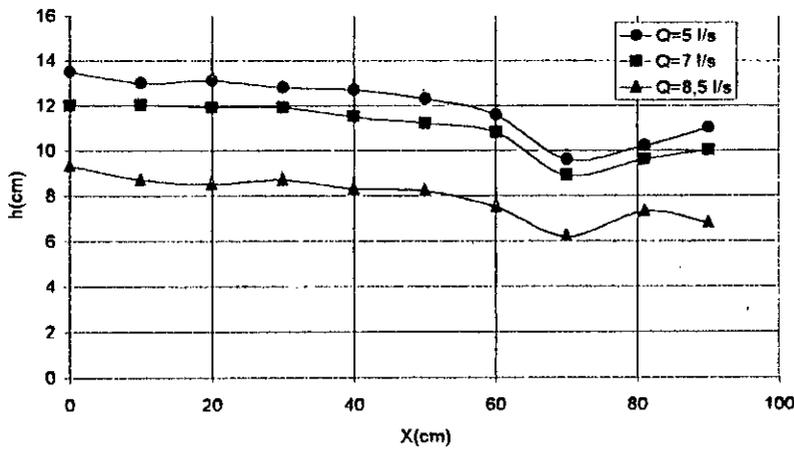


Figure (70): L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 0^\circ$



Figure(71) : l'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 0^\circ$

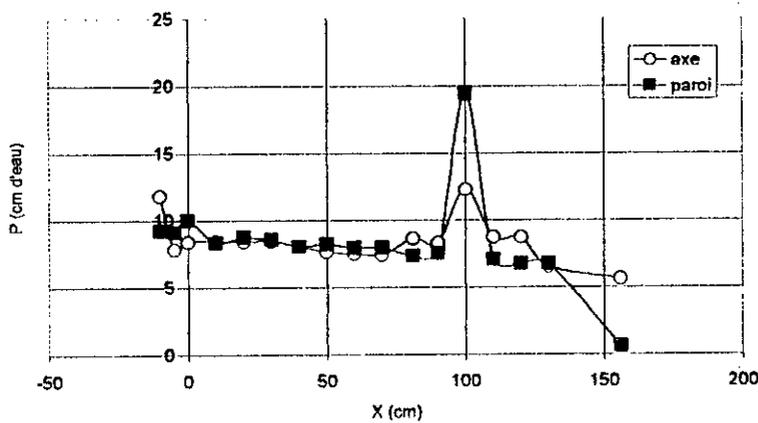


Figure (72) : Variation de la pression le long de la paroi et de l'axe dans un convergent non symétrique ($\alpha = 0^\circ$, $Q = 5$ l/s)

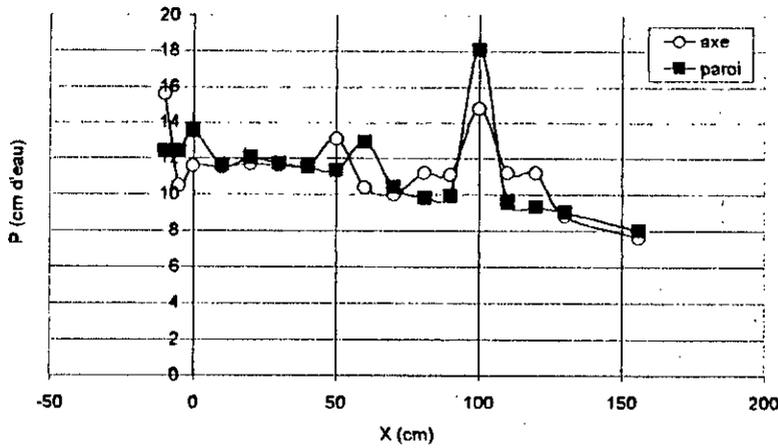


Figure (73) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 0^\circ$, $Q = 7$ l/s)

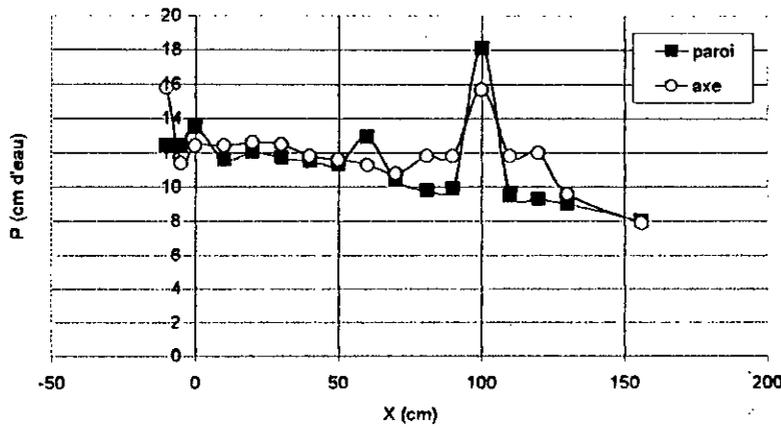
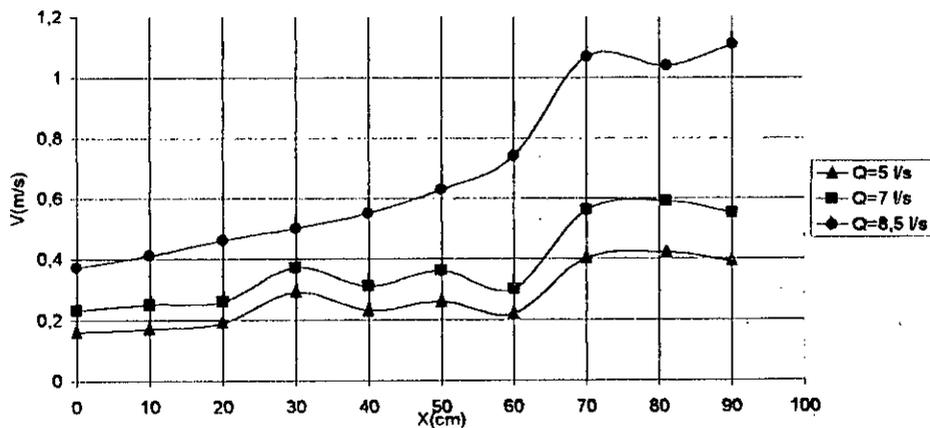
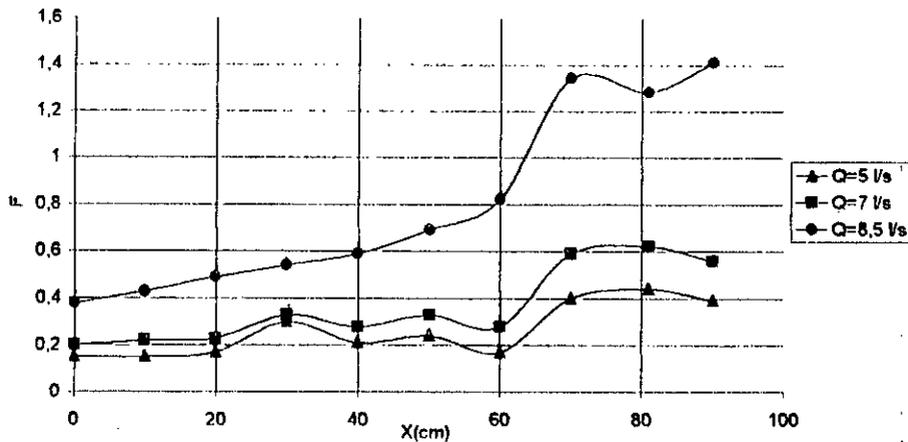


Figure (74) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 0^\circ$, $Q = 8,5$ l/s)



Figure(75) : Profil de vitesse dans un convergent non symétrique horizontal



Figure(76) : Variation du nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent non symétrique horizontal

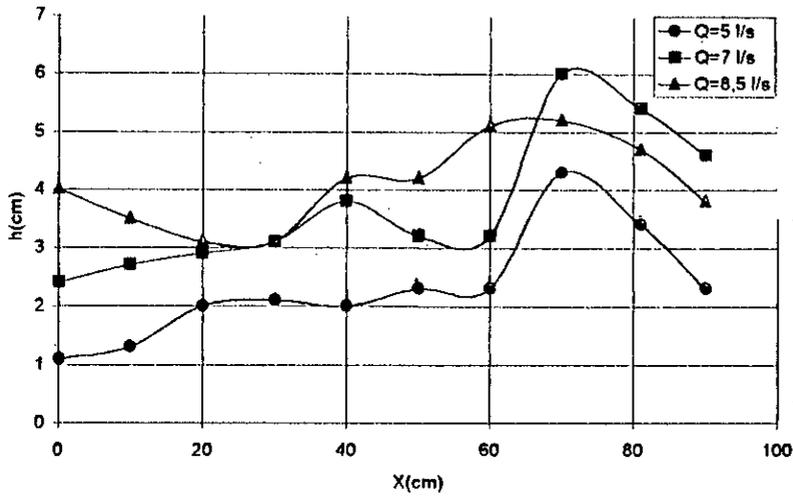
En augmentant l'angle (α) à 5° on a :

-a) Les figures (77 et 78) illustrent respectivement les profils de la ligne d'eau le long de l'axe de la paroi lors d'un écoulement supercritique (figure 83), on a :

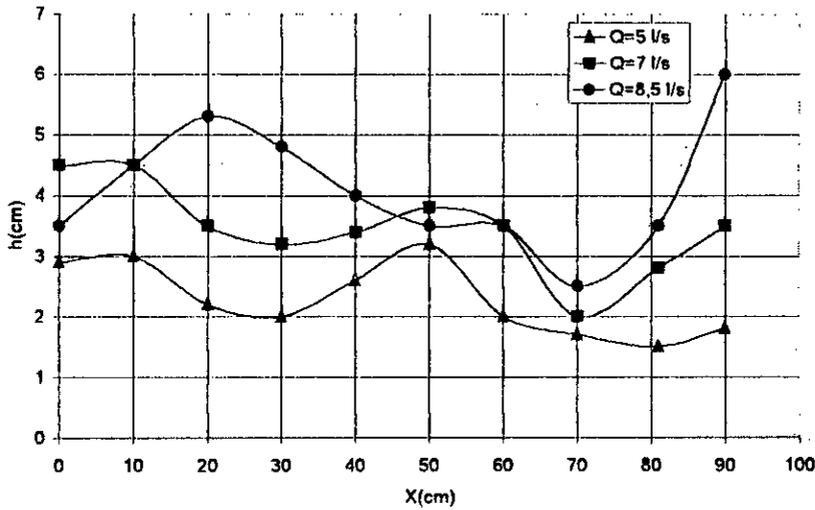
- La profondeur diminue en augmentant le débit.
- Au niveau de l'axe caractérisé par surélévation à l'entrée du canal prismatique, cela est dû à l'interférence des ondes superficielles.
- Juste à l'entrée du canal prismatique, la jonction a provoqué une chute de la ligne d'eau au niveau de la paroi.

-b) Dans ce cas, la répartition de la pression pour les différents débits (figures 79, 80 et 81) est non hydrostatique cela s'interprète par la présence des perturbations à la surface libre.

-c) La diminution de la vitesse a lieu exactement au niveau de la même section que l'augmentation de la hauteur. (figure 82)



Figure(77) :L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 5^\circ$



Figure(78) :L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 5^\circ$

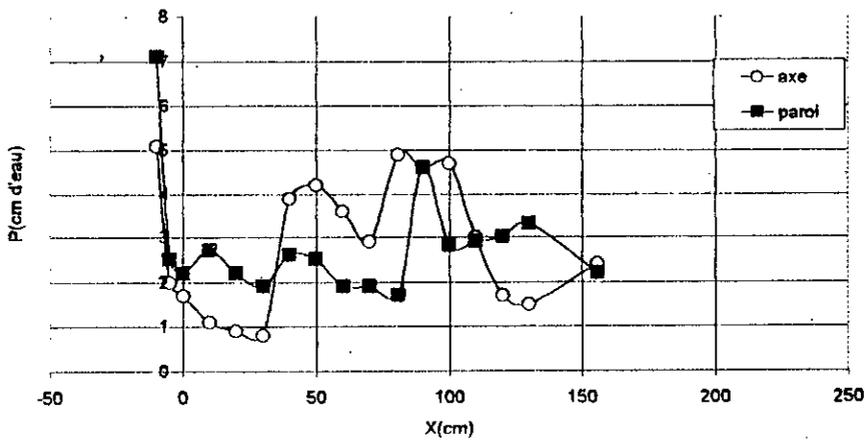


Figure (79) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 5^\circ$, $Q=5$ l/s)

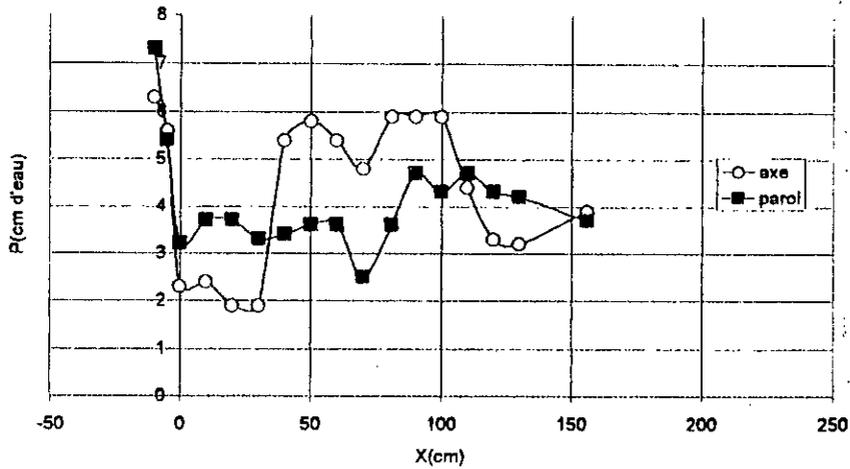


Figure (80) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 5^\circ, Q=7$ l/s)

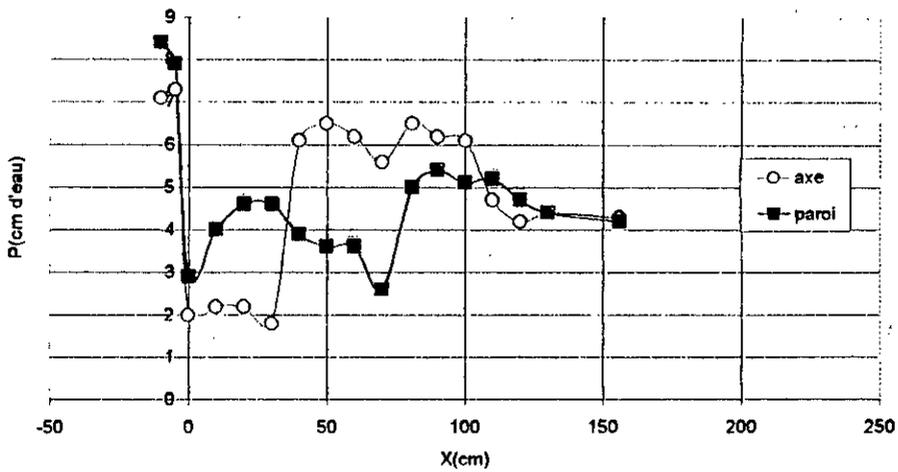


Figure (81) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 5^\circ, Q=8,5$)

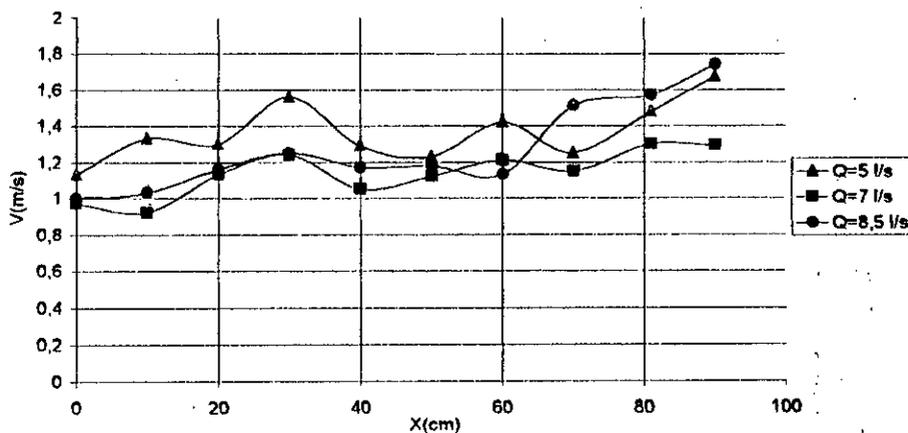


Figure (82) : Profil de vitesse dans un convergent non symétrique ($\alpha = 5^\circ$)

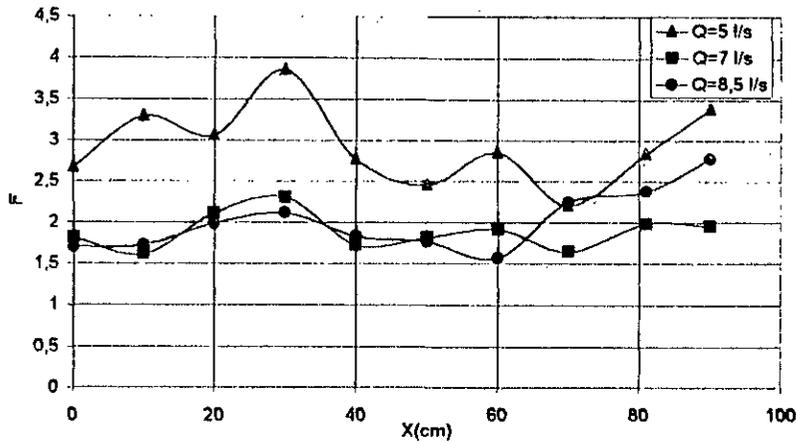


Figure (83): Variation du nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent non symétrique ($\alpha = 5^\circ$)

Pour une pente d'angle (α) égale à $13,5^\circ$:

Dans ce cas, l'écoulement est torrentiel (figure 90).

-a) Les côtes de la surface libre le long de l'axe (figure 84), augmente avec l'augmentation du débit, elles atteignent le pic dans la transition, cela s'explique par l'intersection des ondes latérales.

- Au niveau de la paroi (figure 85) la surface libre présente une forme très irrégulière, cela se justifie par la présence du phénomène de l'entraînement d'air.

-b) En ce qui concerne la répartition de la pression (figures 86, 87 et 88), elle n'est pas hydrostatique, une augmentation de la pression au niveau de l'axe entraîne une diminution au niveau de paroi.

-c) La vitesse de l'écoulement augmente proportionnellement avec le débit (figure 89).

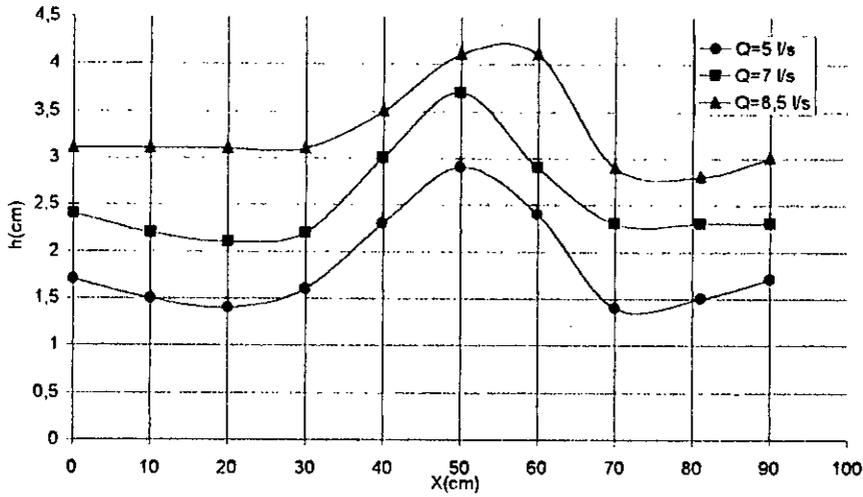


figure (84): l'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 13.5^\circ$

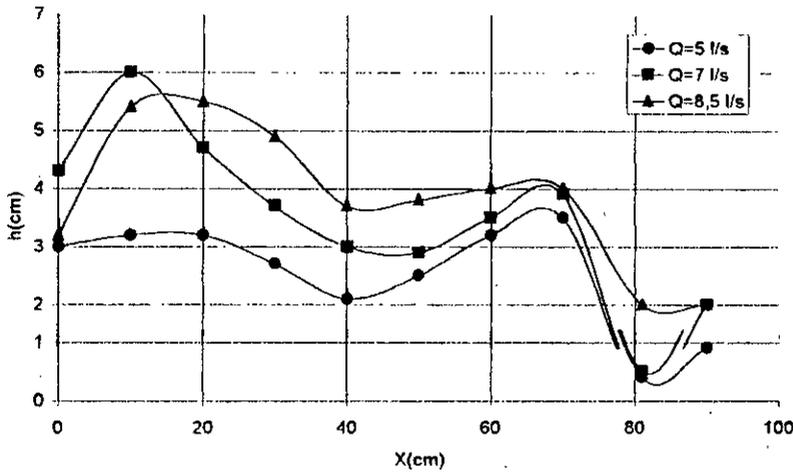


Figure (85) : L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 13.5^\circ$

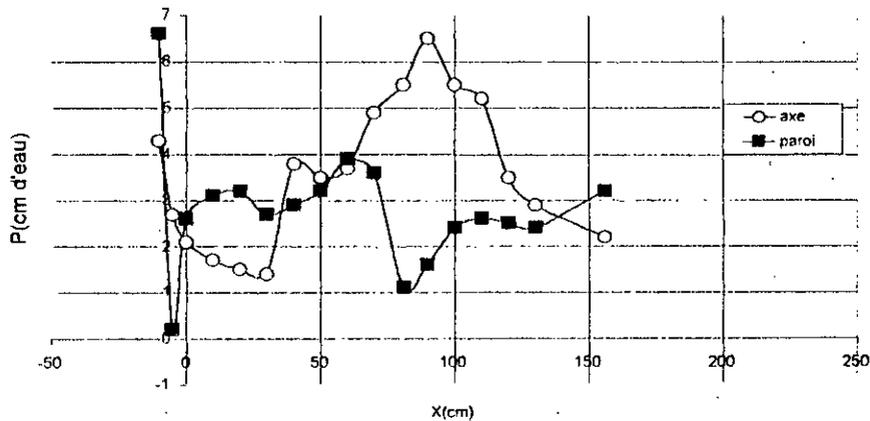


Figure (86): Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 13.5^\circ$, $Q = 5$ l/s)

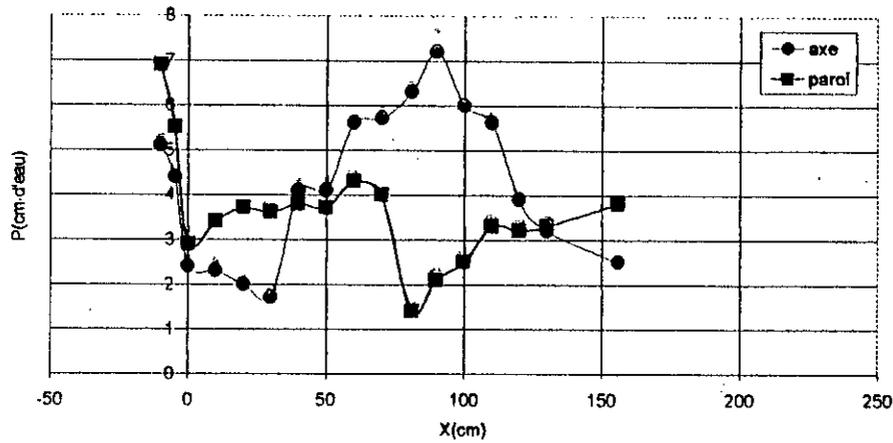


Figure (87) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 13,5^\circ, Q=7 \text{ l/s}$)

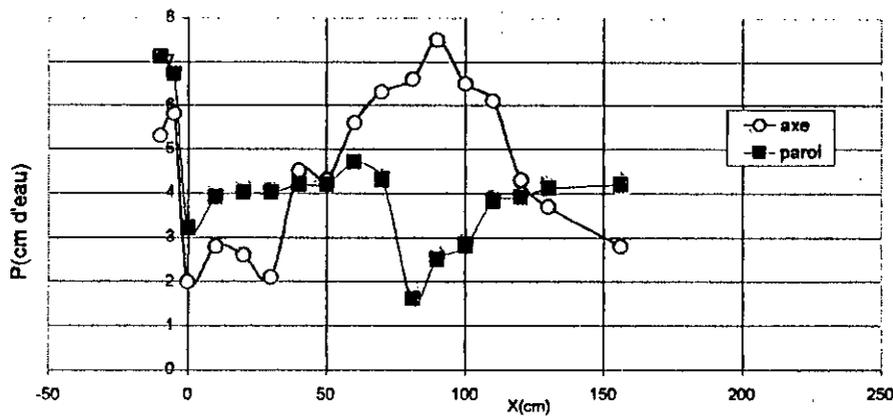


Figure (88) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 13,5^\circ, Q=8,5 \text{ (l/s)}$)

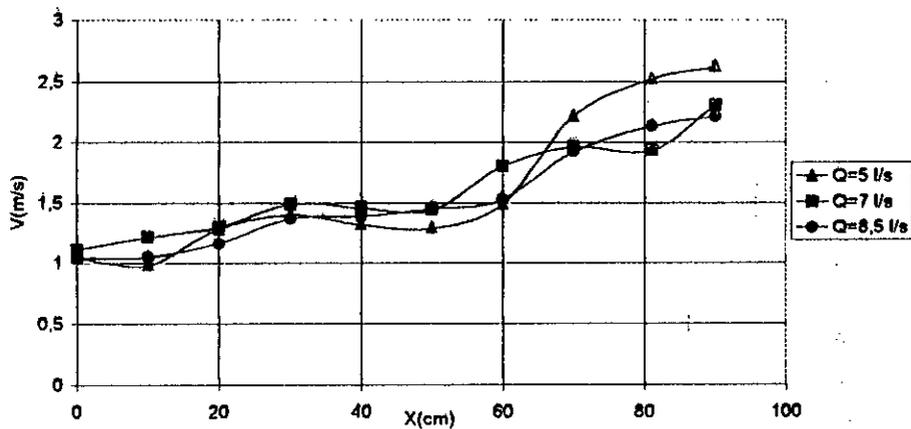


Figure (89) : Profil de vitesse dans un convergent non symétrique ($\alpha = 13,5^\circ$)

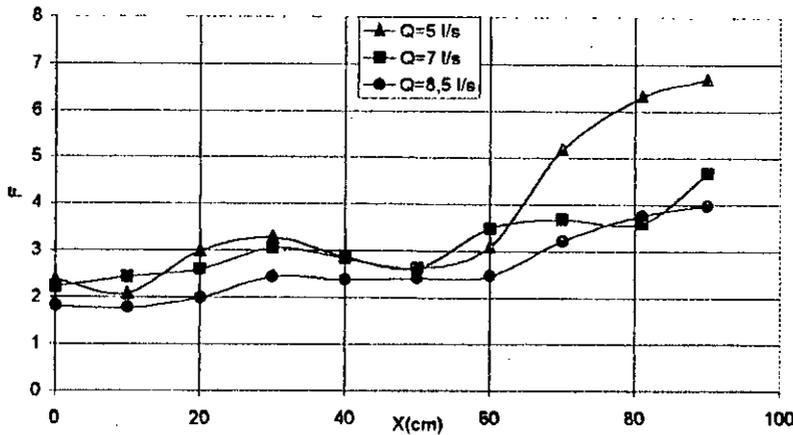


Figure (90): Variation du nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent non symétrique ($\alpha = 13.5^\circ$)

Enfin pour une pente d'angle (α) égale à 38° , on a un écoulement est supercritique (Figure 97).

- a) La ligne d'eau au niveau de l'axe (figure 91 et 92) est irrégulière qui a causé^{de} plusieurs surélévations à la surface libre le long du canal.
- b) La répartition de la pression reste toujours non hydrostatique, elle augmente avec l'augmentation du débit (figure 93, 94 et 95)
- c) Les perturbation qui règnent à la surface libre entraînent un profil de la vitesse très irrégulières. (figure 96)

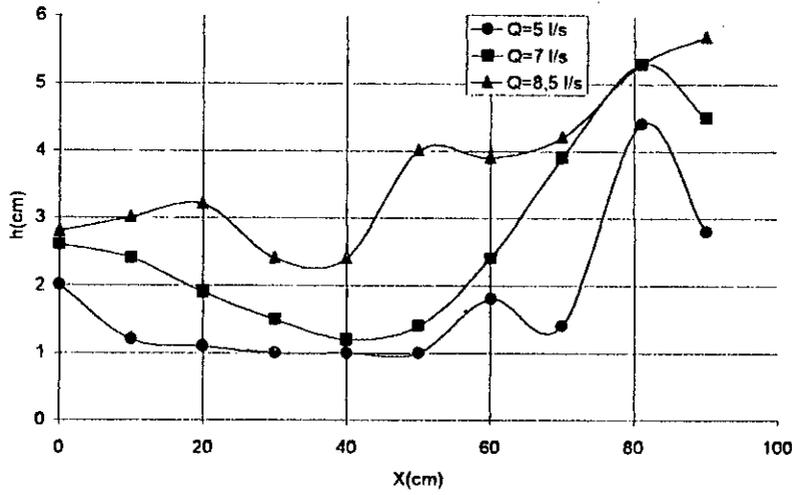


Figure (91) : L'allure de la surface libre le long de l'axe dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 38^\circ$

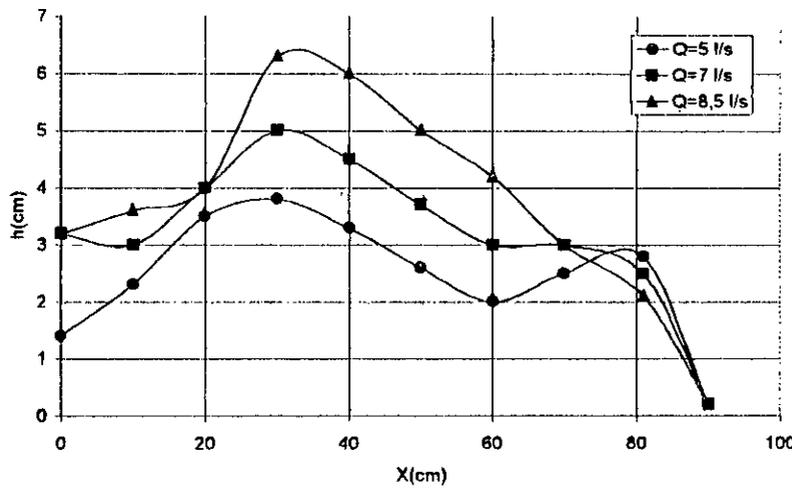


Figure (92) : L'allure de la surface libre le long de la paroi dans un convergent non symétrique pour $\alpha = 38^\circ$

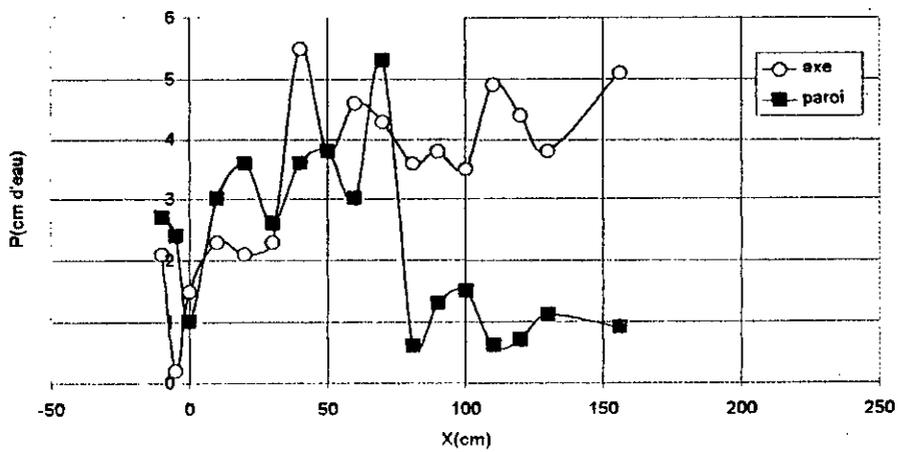


Figure (93) : Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 38^\circ$, $Q=5$ (l/s))

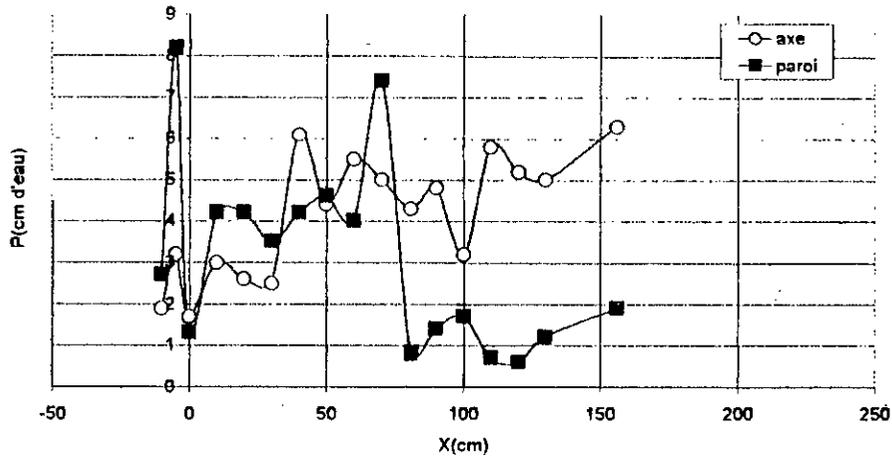


Figure (94): Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 38^\circ$, $Q=7$ l/s).

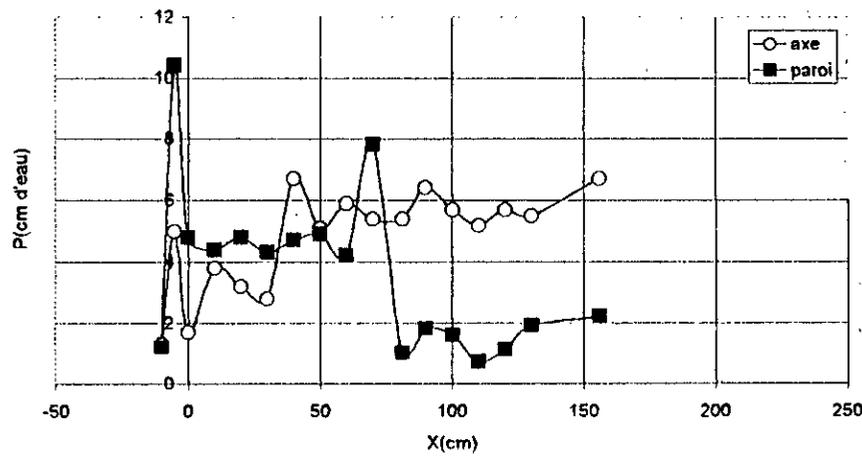


Figure (95): Variation de la pression le long de l'axe et de la paroi dans un convergent non symétrique ($\alpha = 38^\circ$, $Q=8.5$ l/s)

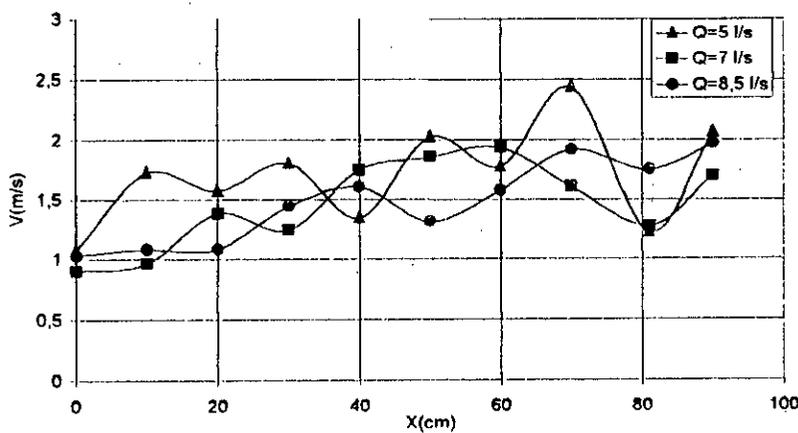


Figure (96): Profil de vitesse dans un convergent non symétrique ($\alpha = 38^\circ$)

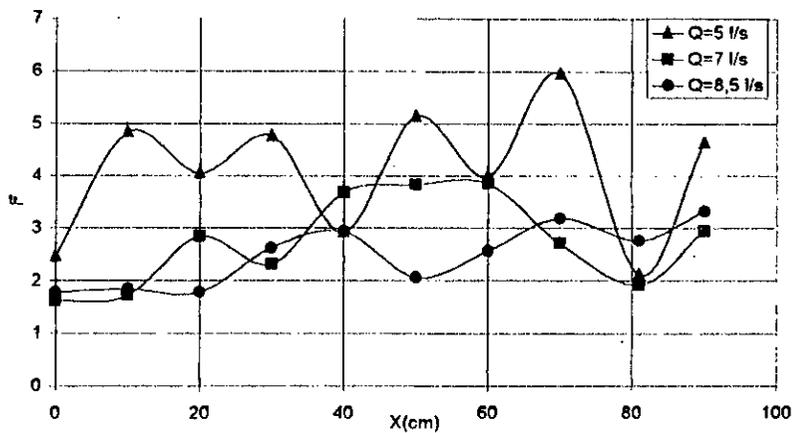


Figure (97): Variation du nombre de Froude de l'écoulement dans un convergent non symétrique ($\alpha = 38^\circ$)

Conclusion générale :

On a présenté dans ce travail, une étude sur les écoulements traversants un convergent à ciel ouvert à faible et à forte pente. Ce type d'écoulement est très complexe, du fait qu'il engendre des surfaces d'écoulements irréguliers et ondulés qui provoquent des ondes stationnaires à la surface libre.

La propagation de ces ondes vers l'aval cause ainsi un écoulement agité dans le canal prismatique aval.

Des essais ont été menés sur un modèle physique (convergent symétrique et non symétrique), permet la détermination de la ligne d'eau lors d'un écoulement en régimes fluvial et torrentiel. A la lumière des observations et des analyses obtenues, pour les deux variantes on conclut que :

- Lors d'un écoulement fluvial la ligne d'eau diminue progressivement dans la transition et la surface libre est stable, ainsi que la répartition de la pression est hydrostatique. Cet écoulement se manifeste dans le cas d'une pente faible du radier.

- L'augmentation de la pente provoque des perturbations à la surface à cause du développement des ondes transversales, et des ondes latérales dans le canal prismatique. Par conséquent, un écoulement très irrégulier à l'aval du convergent.

- La répartition de la pression est non hydrostatique, cela est la conséquence de l'existence des perturbations à la surface libre.

- A la limite des erreurs commises durant l'expérimentation on conclut que nos résultats se concordent avec les autres études faites antérieurement.

- Enfin, le recours à l'expérience est indispensable ceci laisse la voie ouverte à d'autres études pour des améliorations et la prise en compte plus rigoureuses des phénomènes qui règnent à la surface libre.

ANNEXE

I. Mesure de la hauteur de la ligne d'eau

I.a. Convergent symétrique

$\alpha=0^\circ$				
La hauteur de la ligne d'eau en cm				
X(cm)	Le long de l'axe		Le long de la paroi	
	Q=5 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=8.5 l/s
0	10.6	7.5	10.5	10.8
10	10.7	7.6	10.4	10.6
20	10.6	7.4	10.3	10.5
30	10.5	7.3	10.1	10.4
40	10.5	7.2	10	10.2
50	10.5	7	9.9	10
60	9.9	6.7	9.8	9.8
70	9.7	6.4	9.5	9
81	8.8	4.6	9.4	9.4
90	8.4	4.4	9.2	9.1

$\alpha=5^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	1.6	2.5	2.9	2	3.4	4
10	1.3	2.3	2.8	2	2.9	3.3
20	1.2	2.2	2.5	2	2.8	3.1
30	1.2	2.1	2.5	1.8	2.5	2.9
40	1.1	3	3.8	1.5	2.3	2.6
50	1.6	4.9	6.3	1.4	2.0	2.4
60	2.3	3.9	4.3	1.5	2.3	2.3
70	2.5	3.5	3.8	1.3	2.0	2.4
81	2	2.7	3.6	0.9	1.2	1.8
90	1.8	2.5	4.6	1	1.3	3.7

$\alpha=13.5^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	1.8	1.9	1.7	3	2.5	2.1
10	1.9	1.5	1.4	3.5	3.2	2
20	1.4	1.3	1.2	3.4	2.8	1.6
30	1.3	1.1	1.1	3	2.5	1.5
40	1.1	0.9	1	3.1	2.4	1.5
50	1	0.9	1	3.1	2.5	1.3
60	1	0.8	1	2.7	2.4	1.4
70	4.2	2.7	1.1	2.8	2.5	1.5
81	4.6	4.0	0.8	0.7	1.2	0.6
90	4.2	3.9	2.1	1.8	1.4	1.4

$\alpha=38^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	3.4	2.7	2.5	2.7	2	1.5
10	2.8	2.2	2.2	2.5	2.3	1.6
20	2.5	2	1.7	2.9	2.4	2
30	2.1	2	1.4	3	2.5	1.9
40	2.1	2.1	1.7	2.5	2.1	2
50	2.1	2	1.5	3.4	2.2	1.9
60	2.1	1.9	1.5	3.1	2.5	2
70	2.3	0.6	0.3	3.5	2.4	3.5
81	0.4	0.5	0.4	3.2	3	3
90	0.4	0.6	0.8	2	1	0.2

I.b. Convergent non symétrique

$\alpha=0^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	9.1	12	12	9.3	12	13.5
10	9	12.2	12.5	8.7	12	13
20	8.7	12.2	12.5	8.5	11.9	13.1
30	8.7	12.1	12.6	8.7	11.9	12.8
40	8.7	11.9	12.4	8.3	11.5	12.7
50	8.4	11.5	12.1	8.2	11.2	12.3
60	8.1	11.1	11.4	7.5	10.8	11.6
70	6.5	9.3	10.1	6.2	8.9	9.6
81	6.5	8.7	9.6	7.3	9.6	10.2
90	6.1	9.8	10.4	6.8	10	11

$\alpha=5^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	1.1	2.4	4	2.9	4.5	3.5
10	1.3	2.7	3.5	3.0	4.5	4.5
20	2	2.9	3.1	2.2	3.5	5.3
30	2.1	3.1	3.1	2	3.2	4.8
40	2	3.8	4.2	2.6	3.4	4
50	2.3	3.2	4.2	3.2	3.8	3.5
60	2.3	3.2	5.1	2	3.5	3.5
70	4.3	6	5.2	1.7	2	2.5
81	3.4	5.4	4.7	1.5	2.8	3.5
90	2.3	4.6	3.8	1.8	3.5	6

$\alpha=13.5^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	1.7	2.4	3.1	3	4.3	3.2
10	1.5	2.2	3.1	3.2	6	5.4
20	1.4	2.1	3.1	3.2	4.7	5.5
30	1.6	2.2	3.1	2.7	3.7	4.9
40	2.3	3	3.5	2.1	3	3.7
50	2.9	3.7	4.1	2.5	2.9	3.8
60	2.4	2.9	4.1	3.2	3.5	4
70	1.4	2.3	2.9	3.5	3.9	4
81	1.5	2.3	2.8	0.4	0.5	2
90	1.7	2.3	3	0.9	2	2

$\alpha=38^\circ$						
La hauteur de la ligne d'eau en cm						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
0	2	2.6	2.8	1.4	3.2	3.2
10	1.2	2.4	3	2.3	3	3.6
20	1.1	1.9	3.2	3.5	4	4
30	1	1.5	2.4	3.8	5	6.3
40	1	1.2	2.4	3.3	4.5	6
50	1	1.4	4	2.6	3.7	5
60	1.8	2.4	3.9	2	3	4.2
70	1.4	3.9	4.2	2.5	3	3
81	4.4	5.3	5.3	2.8	2.5	2.1
90	2.8	4.5	5.7	0.2	0.2	0.2

II.. Mesure de la pression

II. a) Convergent symétrique

$\alpha=0^\circ$				
Pression en cm d'eau				
X(cm)	Le long de l'axe		Le long de la paroi	
	Q=5 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=8.5 l/s
-10	10.6	11.6	11.2	12.1
-5	11.6	12.7	10.7	11.7
0	10.4	11.4	10.5	11.6
10	10.4	11.2	10.9	11.8
20	14.5	16.4	10.6	11.6
30	10.4	11.3	10.3	11.4
40	11.9	12.9	10.5	12.6
50	11.3	12.3	9.9	11.9
60	11.3	12.3	9.5	10.2
70	10.0	11.1	9.9	10.6
81	10.9	12.1	9.3	10.1
90	10.4	11.3	9.3	10
100	10.5	11.5	10.4	11.3
110	10.6	11.3	9.1	9.9
120	10.4	11.1	9.2	9.9
130	8.7	9.5	8.7	9.5
156	10.0	10.8	8.2	8.9
182	7.2	8.0	7.2	7.9
207	6.5	7.2	6.2	7.2
232.5	4.6	5.1	4.6	5.1

$\alpha=5^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	3.9	4.7	5	3.2	4.8	5.2
-5	2.3	3.1	3.6	0.2	0.7	0.9
0	1.5	1.8	2.1	2.5	3.3	3.6
10	1.4	1.8	2	2.9	3.9	4.4
20	2	2.2	2.5	3.5	4.2	4.5
30	1.8	2.2	2.4	2.4	3.1	3.4
40	3.7	5	6.1	2.8	3.4	3.4
50	3.9	5.1	5.8	2.2	2.7	2.9
60	5.3	6.3	6.6	2.3	2.8	3.1
70	4.7	5.4	5.6	3.8	4.3	4.6
81	4.5	4.9	5.3	1.7	2	3.1
90	4.1	5	5.5	1.8	2.4	4.0
100	4.5	4.5	5	5.2	6.8	7.7
110	3.5	4	4.3	1.9	4.3	5.9
120	2.3	4.2	4.6	2.7	4.8	5.3
130	2.1	2.8	3.1	2.8	3.9	5.2
156	1.9	2.4	3	2.9	3.9	4.4
182	1.8	2.8	3.3	1.9	2.9	3.1
207	2.1	2	3.1	2.4	2.8	3.1
232.5	1.7	2	2.4	2	2.3	3.3

$\alpha=13.5^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	2.6	2.7	4.5	0.7	3.4	4.6
-5	1.2	1.7	2.2	1.4	2.2	2.4
0	1	1.3	1.4	1.1	1.7	1.9
10	0.7	1	1.1	1.9	2.5	2.7
20	1.2	1.4	1.5	1.8	2.7	2.9
30	0.6	0.8	0.8	1.7	2.4	2.7
40	3.4	3.5	3.5	1.9	2.5	2.9
50	3	2.2	3.3	1.7	2.3	2.6
60	2.6	2.8	3.1	1.7	2.3	2.6
70	2.4	4	4.2	3	3.6	4
81	2.6	4.6	4.4	0.7	1.3	1.3
90	3.1	4.5	4.7	0.6	0.6	0.7
100	4.1	5.4	5.6	1	1.2	1.5
110	3.7	4.6	5	0.8	0.9	1.2
120	1.9	2.5	2.7	1.5	1.7	1.9
130	1.9	2.4	2.6	1	1.3	1.4
156	1.3	1.7	1.9	0.7	2	2.3
182	0.4	0.5	0.6	1.1	1.8	1.9
207	0.6	0.8	1.1	1.3	2	2.1
232.5	0.7	1.6	1.8	1	-1.5	1.6

$\alpha=38^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	1.7	2	2.2	0.8	1.5	2.3
-5	1.4	-1.3	2	3	2	2.1
0	1.7	1.3	1.3	1.1	1.3	1.5
10	1.7	1.9	1.4	2	2.9	2.7
20	2.9	3	2.9	2.4	2.3	2.7
30	1.7	1.7	1.8	2.2	2.3	2.3
40	4.9	4.8	4.6	2.5	2.6	2.8
50	4.2	4.2	3.8	2.5	2.8	3.1
60	4.6	4.6	4.4	2.6	3	3.6
70	4.3	4.4	3.9	6.4	8.3	9.4
81	3.6	3.2	3.0	1.1	0.7	0.4
90	3.0	3.3	3.3	0.4	0.9	0.8
100	2.5	4	3.5	1.7	1.8	2.2
110	5.1	5	4	2.4	1.1	1
120	4.7	4.1	4.9	0.7	0.9	1
130	3.9	2.9	2.3	1.1	1.3	0.9
156	3.4	3.6	2.9	1.8	1.5	1
182	1.4	1.3	0.9	1.6	1.2	1.1
207	1.7	1.5	1.3	2.1	1.7	1.2
232.5	1	1	0.9	1.6	0.9	0.6

II.b) Convergent non symétrique

$\alpha=0^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	11.8	15.6	15.8	9.2	12.4	13.3
-5	7.8	10.5	11.4	9.1	12.4	13.4
0	8.4	11.6	12.4	10	13.5	13.7
10	8.4	11.5	12.4	8.3	11.6	13
20	8.4	11.7	12.6	8.7	12.0	12.8
30	8.4	11.6	12.5	8.5	11.7	12.6
40	8	11.6	11.8	8	11.5	12.6
50	7.6	13.1	11.6	8.2	11.3	12.3
60	7.5	10.4	11.3	7.9	10.9	11.7
70	7.4	10	10.8	7.9	10.4	11.3
81	8.6	11.2	11.8	7.3	9.8	10.5
90	8.3	11.1	11.8	7.5	9.9	10.8
100	12.3	14.8	15.7	19.4	18.1	19
110	8.7	11.2	11.8	7	9.5	10.1
120	8.7	11.2	12	6.7	9.3	10
130	6.5	8.8	9.6	6.7	9	10
156	5.6	7.6	7.9	0.3	8	8.2

$\alpha=5^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	5.1	6.3	7.1	7.1	7.3	8.4
-5	2	5.6	7.3	2.5	5.4	7.9
0	1.7	2.3	2	2.2	3.2	2.9
10	1.1	2.4	2.2	2.7	3.7	4
20	0.9	1.9	2.2	2.2	3.7	4.6
30	0.8	1.9	1.8	1.9	3.3	4.6
40	3.9	5.4	6.1	2.6	3.4	3.9
50	4.2	5.8	6.5	2.5	3.6	3.6
60	3.6	5.4	6.2	1.9	3.6	3.6
70	2.9	4.8	5.6	1.9	2.5	2.6
81	4.9	5.9	6.5	1.7	3.6	5
90	4.6	5.9	6.2	4.6	4.7	5.4
100	4.7	5.9	6.1	4.7	4.3	5.1
110	3	4.4	4.7	3	4.7	5.2
120	1.7	3.3	4.2	1.7	4.3	4.7
130	1.5	3.2	4.4	1.5	4.2	4.4
156	2.4	3.9	4.3	2.2	3.7	4.2

$\alpha=13.5^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	4.3	5.1	5.3	6.6	6.9	7.1
-5	2.7	4.4	5.8	3.3	5.5	6.7
0	2.1	2.4	2	2.6	2.9	3.2
10	1.7	2.3	2.8	3.1	3.4	3.9
20	1.5	2	2.6	3.2	3.7	4
30	1.4	1.7	2.1	2.7	3.6	4
40	3.8	4.1	4.5	2.9	3.8	4.2
50	3.5	4.1	4.3	3.2	3.7	4.2
60	3.7	5.6	5.6	3.9	4.3	4.7
70	4.9	5.7	6.3	3.6	4	4.3
81	5.5	6.3	6.6	1.1	1.4	1.6
90	6.5	7.2	7.5	1.6	2.1	2.5
100	5.5	6	6.5	2.4	2.5	2.8
110	5.2	5.6	6.1	2.6	3.3	3.8
120	3.5	3.9	4.3	2.5	3.2	3.9
130	2.9	3.2	3.7	2.4	3.3	4.1
156	2.2	2.5	2.8	3.2	3.8	4.2

$\alpha=38^\circ$						
Pression en cm d'eau						
X(cm)	Le long de l'axe			Le long de la paroi		
	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s	Q=5 l/s	Q=7 l/s	Q=8.5 l/s
-10	2.1	1.9	1.3	2.7	2.7	1.2
-5	0.2	3.2	5	2.4	8.2	10.4
0	1.5	1.7	1.7	1	1.3	4.8
10	2.3	3	3.8	3	4.2	4.4
20	2.1	2.6	3.2	3.6	4.2	4.8
30	2.3	2.5	2.8	2.6	3.5	4.3
40	5.5	6.1	6.7	3.6	4.2	4.7
50	3.8	4.4	5.1	3.8	4.6	4.9
60	4.6	5.5	5.9	3	4	4.2
70	4.3	5	5.4	5.3	7.4	7.8
81	3.6	4.3	5.4	0.6	0.8	1
90	3.8	4.8	6.4	1.3	1.4	1.8
100	3.5	3.2	5.7	1.5	1.7	1.6
110	4.9	5.8	5.2	0.6	0.7	0.7
120	4.4	5.2	5.7	0.7	0.6	1.1
130	3.8	5	5.5	1.1	1.2	1.9
156	5.1	6.3	6.7	0.9	1.9	2.2

III. Calcul de la vitesse et du nombre de Froude

III.a. convergent symétrique

$\alpha=0^\circ$						
X(cm)	Q=5 l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	0.1	10.6	0.097	0.22	7.61	0.25
10	0.11	10.59	0.1	0.24	7.56	0.27
20	0.13	10.5	0.12	0.27	7.37	0.31
30	0.14	10.39	0.14	0.3	7.27	0.35
40	0.15	10.38	0.15	0.33	7.18	0.39
50	0.17	10.23	0.17	0.38	7	0.45
60	0.2	9.74	0.2	0.45	6.6	0.55
70	0.24	9.54	0.24	0.54	6.3	0.68
81	0.25	8.92	0.26	0.7	4.9	0.9
90	0.26	8.58	0.28	0.74	4.6	0.95

$\alpha=5^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7 l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	0.5	2	1.11	0.42	3.31	0.73	0.44	3.87	0.7
10	0.58	1.86	1.36	0.5	3	0.91	0.53	3.46	0.9
20	0.65	1.8	1.53	0.58	2.8	1.09	0.63	3.16	1.1
30	0.84	1.5	2.16	0.68	2.6	1.33	0.71	3.06	1.26
40	1.07	1.3	2.96	0.69	2.83	1.29	0.68	3.51	1.14
50	1.04	1.5	2.68	0.57	3.75	0.93	0.57	4.62	0.84
60	0.93	1.86	2.15	0.73	3.3	1.27	0.8	3.68	1.31
70	1.01	2	2.25	0.95	2.9	1.96	1.14	2.99	2.08
81	1.6	1.25	4.52	1.71	1.64	4.22	1.38	2.47	2.77
90	1.9	1.06	5.83	1.69	1.65	4.06	0.84	4.06	1.31

$\alpha=13.5^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7 l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	0.46	2.17	0.98	0.71	1.96	1.60	0.92	1.85	2.13
10	0.41	2.63	0.80	0.78	1.93	1.77	1.14	1.61	2.85
20	0.53	2.19	1.13	0.94	1.73	2.25	1.47	1.35	4.00
30	0.61	2.09	1.30	1.33	0.96	3.64	2.27	0.96	7.31
40	0.63	2.20	1.34	1.22	1.59	3.05	1.97	1.21	5.66
50	0.77	2.01	1.72	1.31	1.65	3.22	2.3	1.16	6.75
60	0.81	2.15	1.74	1.72	1.40	4.59	2.03	1.46	5.31
70	0.55	3.64	0.91	1.06	2.64	2.06	2.6	1.31	7.18
81	0.86	2.34	1.77	1.41	1.98	3.16	5.8	0.6	8.67
90	0.92	2.20	1.96	1.33	2.10	2.90	2.7	1.27	7.57

$\alpha=38^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	0.44	2.28	0.92	0.83	1.68	2.02	1.02	1.68	2.48
10	0.45	2.39	0.92	0.86	1.75	2.05	1.16	1.58	2.91
20	0.52	2.25	1.09	1.08	1.50	2.78	1.99	1.00	6.29
30	0.66	1.92	1.5	1.07	1.66	2.62	1.95	1.11	5.87
40	0.65	2.16	1.39	1.08	1.80	2.54	1.9	1.25	5.37
50	0.65	2.39	1.32	1.20	1.81	2.82	2.1	1.26	5.91
60	0.69	2.53	1.37	1.37	1.77	3.25	2.34	1.26	6.59
70	0.81	2.5	1.62	2.74	1.02	8.57	3.16	1.08	9.99
81	1.43	1.4	3.82	2.00	1.40	5.34	2.98	1.15	8.78
90	2.00	1.01	6.29	5.44	0.51	2.40	3.67	0.93	12.03

III.b. convergent non symétrique

$\alpha=0^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	0.16	0.12	0.15	0.23	12.45	0.2	0.37	9.23	0.38
10	0.17	0.13	0.15	0.25	12.29	0.22	0.41	8.84	0.43
20	0.19	0.13	0.17	0.26	12.34	0.23	0.46	8.76	0.49
30	0.29	0.09	0.3	0.37	12.17	0.33	0.50	8.69	0.54
40	0.23	0.12	0.21	0.31	11.96	0.28	0.55	8.72	0.59
50	0.26	0.12	0.24	0.36	11.49	0.33	0.63	8.39	0.69
60	0.22	0.16	0.17	0.30	11.14	0.28	0.74	8.08	0.82
70	0.40	0.1	0.4	0.56	9.8	0.59	1.07	6.39	1.34
81	0.42	0.09	0.44	0.59	8.84	0.62	1.04	6.6	1.28
90	0.39	0.1	0.39	0.55	9.61	0.56	1.11	6.18	1.41

$\alpha=5^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	1.13	1.78	2.67	0.97	2.86	1.81	1	3.44	1.7
10	1.33	1.63	3.29	0.22	3.26	1.61	1.03	3.59	1.72
20	1.3	1.8	3.06	1.13	2.88	2.1	1.16	3.42	1.99
30	1.56	1.64	3.85	1.24	2.85	2.3	1.25	3.49	2.11
40	1.29	2.17	2.77	1.05	3.7	1.72	1.17	4.07	1.83
50	1.23	2.52	2.45	1.12	3.8	1.81	1.18	4.47	1.76
60	1.42	2.47	2.85	1.21	4	1.91	1.13	5.23	1.56
70	1.25	3.24	2.2	1.15	4.89	1.64	1.51	4.54	2.24
81	1.48	2.72	2.83	1.3	4.29	1.98	1.57	4.37	2.37
90	1.67	2.43	3.38	1.29	4.37	1.95	1.74	3.93	2.77

$\alpha=13.5^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	1.04	1.95	2.37	1.11	2.51	2.21	1.04	3.3	1.81
10	0.98	2.21	2.08	1.21	2.48	2.43	1.05	3.5	1.77
20	1.28	1.84	2.98	1.3	2.51	2.59	1.16	3.43	1.98
30	1.4	1.82	3.28	1.49	2.38	3.05	1.37	3.17	2.43
40	1.32	2.13	2.86	1.46	2.66	2.83	1.39	3.43	2.37
50	1.29	2.41	3.62	1.44	3.00	2.62	1.45	3.64	2.4
60	1.49	2.34	3.08	1.8	2.69	3.47	1.53	3.87	2.45
70	2.21	1.83	5.16	1.96	2.86	3.66	1.92	3.56	3.21
81	2.52	1.6	6.3	1.93	2.9	3.58	2.13	3.21	3.75
90	2.62	1.54	6.67	2.3	2.43	4.66	2.21	3.11	3.96

$\alpha=38^\circ$									
X(cm)	Q=5 l/s			Q=7l/s			Q=8.5 l/s		
	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F	V(m/s)	h(cm)	F
0	1.07	1.89	2.46	0.9	3.11	3.61	1.03	3.33	1.78
10	1.72	1.27	4.83	0.96	3.16	1.71	1.08	3.44	1.84
20	1.57	1.51	4.04	1.38	2.37	2.83	1.08	3.72	1.77
30	1.80	1.43	4.76	1.24	2.87	2.31	1.44	3.02	2.62
40	1.34	2.11	2.92	1.74	2.25	3.67	1.6	2.99	2.93
50	2.02	1.55	5.13	1.85	2.35	3.82	1.31	4.06	2.06
60	1.77	1.98	3.98	1.93	2.52	3.84	1.57	3.69	2.55
70	2.43	1.67	5.95	1.60	3.51	2.7	1.91	3.6	3.18
81	1.22	3.43	2.11	1.27	4.44	1.91	1.74	3.95	2.75
90	2.06	1.99	4.64	1.69	3.33	2.93	1.96	3.5	2.31

Bibliographie

- [1] **ABSI,R., RETIEB,S., BELHADJ,O. et BENMAMAR,S.** "Modélisation et simulation numérique des problèmes de diffraction bidimensionnelle d'un mascaret en régime instationnaire". Thèse d'Ingeniorat d'Etat ,ENP, Alger ,1994.
- [2] **AMGHAR,D ., MORSA,I , M ., ET BELHADJ,O.,** "Modélisation par éléments finis des écoulements à surface libre dans les transitions ". Thèse d'Ingéniorat d'Etat, ENP, Alger,1995.
- [3] **BERREKSI,A., BOUHADJI, A., et BELHADJ, O.,** " Simulation et analyse des écoulements bidimensionnels à surface libre en zones de transitions". Thèse d'Ingéniorat ENP, Alger, 1993.
- [4] **BERREKSI.A. ,BENMAMAR ,S.** "Simulation des écoulements à surface libre dans les canaux à faible et à forte pente à géométrie variable", thèse de magistère, ENP,ALGER, 1998.
- [5] **CARLIER ,M** "Hydraulique générale et appliquée" Edition Eyrolles, Paris ,1972.
- [6]**CHANSON,H.** " Ressaut hydraulique ondulés : mythe et réalité", La Houille Blanche N° 7,1975.
- [7] **CHOW, V.T** " Open channal hydraulic" Edition MacGRAW-Hill Book co., New York, 1959.
- [8] **COMOLET.R.** "Mécanique expérimentale des fluides" Tome II ,1963.
- [9] **ENGELUND, F., and MUNCH-PETERSON, J.,** " Steady flow in contracted and expanded rectangular channels ", La Houille Blanche, vol. 8, No.4, pp. 464-474, 1953.
- [10]**GRAF, W.H. et ANTINAKER,M.S.** " Hydraulique Fluviale" Tome I , Ecoulement Permanent ,1993.
- [11] **HAGER, W.H.,** " Spillways. Shockwaves and air entrainment", Review and recommendation, Commission internationale des grands Barrages, CIGB, bulletin 81, Paris, 1992.
- [12] **IPPEN, A., T., and DAWSON, J., H.,** "Design of channels contractions", Symposium on High-Velocity Flow in Open Channels, Trans.Amer.Soc.Civ.Engrs.Vol.116, pp.326-346, 1951.
- [13] **IWAO OHTSU,YOUCIHI YASUDA, and HIVOCHI GOTOH**
"Journal of hydraulic engineering", february 1997.

- [14] MICHEL HUG "Mécanique des fluides appliqués", Edition EYROLLES, 1975.
- [15] MIZANUR RAHMAN, M. HANIF CHAUDRY, "Computation of flow in open-channel transition". Journal of hydraulic research Vol. 35 1997 N° 2.
- [16] OUKACHA, M., LECHEHEB, M., BILEK, A., BERREKSI, A., et BENMAMAR, S., "Détermination de la ligne d'eau dans les canaux non prismatiques et à forte pente". Thèse d'Ingénieur d'Etat, ENP, Alger, 1996.
- [17] SINGER, R.O. HAGER, W. "Construction Hydraulique : Ecoulement Stationnaires" presse polytechniques ROMANDES, volume 15, 1988.