

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider-Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences
Spécialité : **Hydraulique**
Option : **Hydraulique**

Thème

**Optimisation de la forme du déversoir en
touches de piano (PK-Weir) par voies
numérique et expérimentale**

Présenté par :

ATHMANI Bassem

Soutenue le : 16 /07/ 2019 devant le jury composé de :

DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Président	Université de Biskra
OUAMANE Ahmed	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
REMINI Boualem	Professeur	Examineur	Université de Blida
GHOMRI Ali	Maître de conférences	Examineur	Université de El Oued

RESUME.

Le déversoir en touche de piano (PK-Weir) permet un bon compromis entre le besoin d'une grande capacité de déversement et la largeur limitée de l'emplacement disponible sur le site de barrage. De plus, son faible coût par rapport aux déversoirs vannés, sa simplicité d'utilisation en font une solution intéressante.

Cette solution est également avantageusement utilisée dans des ouvrages de déversement ou de protection pour les canaux et usines hydroélectriques au fil de l'eau. Ces avantages ont incité plusieurs laboratoires de recherche et organismes du domaine des barrages à procéder à des études et essais hydrauliques sur des modèles physiques pour définir la forme optimale de PK-Weir. Cependant, la modélisation numérique de l'écoulement sur le PK-Weir qui peut aider au pré-dimensionnement du PK-Weir n'a fait l'objet que de quelques travaux réalisés essentiellement par EDF-France.

La géométrie du déversoir en touches de piano se caractérise par un nombre important de variables, ce qui ne permet pas la définition de la forme optimale par voie directe et nécessite le recours à l'expérimentation sur modèles réduits physiques, cependant, ceci nécessite la réalisation d'un nombre de modèles physiques très important qui implique des dépenses onéreuses et beaucoup du temps. Actuellement on peut recenser plus de 300 modèles physiques qui ont été testés dans plusieurs laboratoires sans pour autant définir une forme optimale du PK-Weir. La solution qui paraît possible est de faire recours à la modélisation numérique pour définir quelques formes optimales qui seront validés par quelques essais sur modèles physiques. Ceci permet de réaliser plusieurs tests sur modèles numériques dans un temps très court et à coût faible

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une contribution à l'étude de l'optimisation de la forme du PK-Weir par une modélisation numérique qui est réalisée essentiellement par le code Flow-3D. Une confrontation avec les résultats expérimentaux a été effectuée et a montré une convergence des résultats.

MOTS-CLÉS : Déversoir, Labyrinthe, Hausse fusible, PK-Weir, Écoulement, Modèles physiques, Modélisation numérique, Flow-3D.

Abstract

The piano key weir (PK-Weir) provides a good compromise between the need for a large discharge capacity and the limited width of the available location at the dam site. In addition, its low cost compared with weirs winnowed, its ease of use make it an interesting solution. This solution is also advantageously used in discharges works or protection for canals and hydroelectric factories along the water. These benefits have prompted several research laboratories and dam organizations to conduct hydraulic studies and tests on physical models to define the optimal form of PK-Weir. However, the numerical modeling of the flow on the PK-Weir, which can help the pre-dimensioning of the PK-Weir, has been the subject of only a few works done mainly by EDF-France.

A large number of variables, which does not allow the definition of the optimal form by direct route and requires the use of experimentation on physical models, characterizes the geometry of the weir in piano keys, however, this requires the realization a number of very important physical models that involve expensive expenses and a lot of the time. Currently more than 300 physical models can be identified that have been tested in several laboratories without defining an optimal form of PK-Weir. The solution that seems possible is to resort to numerical modeling to define some optimal forms that will be validated by some tests on physical models. This makes it possible to carry out several tests on numerical models in a very short time and at low cost.

This work is part of a contribution to the study of the PK-Weir shape optimization by a numerical modeling, which is realized essentially by the Flow-3D code. A comparison with the experimental results was carried out and showed a convergence of the results.

KEYWORDS: Spillway, Labyrinth, Fuse gate, PK-Weir, Flow, Physical Models, Numerical Modeling, Flow-3D.

ملخص.

يوفر الهدار (PK-Weir) حلاً جيداً بين الحاجة إلى سعة انسكاب كبيرة والعرض المحدود للموقع المتاح في موقع السد. بالإضافة إلى ذلك ، فإن كلفتها المنخفضة مقارنة بالهدارات الصمامة وسهولة الاستخدام ، تجعلها حلاً مثيراً للاهتمام. يستخدم هذا الحل المميز أيضاً في منشآت التصريف أو الحماية للقنوات والمصانع الكهرومائية على طول مجاري المياه. هذه الفوائد دفعت العديد من مختبرات البحوث والمنظمات الخاصة بالسدود إلى إجراء دراسات واختبارات هيدروليكية على النماذج الفيزيائية لتحديد الشكل الأمثل لـ PK-Weir ، مع ذلك فإن النمذجة الرقمية للتدفق على PK-Weir والتي يمكن أن تساعد في تحديد أبعاد PK-Weir كانت موضوعاً لعدد قليل من الأعمال التي قامت بها EDF-France بشكل أساسي.

تتميز هندسة الهدار بمفاتيح البيانات بعدد كبير من المتغيرات ، والتي لا تسمح بتعريف الشكل الأمثل بالطريق المباشر وتتطلب استخدام التجارب على النماذج المادية ، في حين ان هذا يقتضي تحقيق عدد من النماذج المادية الهامة للغاية التي تتطلب نفقات باهظة الثمن والكثير من الوقت. حالياً يمكن تحديد أكثر من 300 نموذج مادي تم اختباره في العديد من المختبرات دون تحديد الشكل الأمثل لـ PK-Weir الحل الذي يبدو ممكناً هو اللجوء إلى النمذجة الرقمية لتحديد بعض الأشكال المثلى التي سيتم التحقق من صحتها من خلال بعض الاختبارات على النماذج المادية. هذا يجعل من الممكن إجراء العديد من الاختبارات على النماذج العددية في وقت قصير للغاية و بتكلفة منخفضة هذا العمل يندرج في إطار المساهمة في دراسة تحسين شكل PK-Weir من خلال النمذجة الرقمية التي انجزت أساساً بواسطة كود Flow-3D ، وتم إجراء مقارنة مع النتائج التجريبية وأظهرت تقارب النتائج.

كلمات مفتاحية : هدار، PK- Weir, Labyrinthe, Hausse fusible، جريان ، النماذج المادية ، النمذجة العددية ، Flow-3D.

Remerciements

En guise de préambule à la présentation des résultats de ma recherche, je ressens la nécessité persistante d'exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je commencerai par remercier la personne qui m'a permis de mettre mon petit pied dans le monde de la recherche, mon Directeur de thèse. Merci à Monsieur le Professeur OUAMANE Ahmed, Professeur à la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Biskra, pour son aide, ses orientations et ses conseils fructueux. J'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute, de compréhension et de patience à mon égard tout au long de ce travail.

Il m'est agréable de remercier les membres du jury, Pr Débabèche Mahmoud, Pr Remini Boualem et Dr Ghomri Ali qui ont bien voulu lire et juger ce modeste travail. Qu'ils daignent accepter ma reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse.

Je tiens également à remercier la société Italienne d'ingénierie XC-Engineering qui m'ont accueilli et aidé. Que Messieurs Alessandro Incognito, Stefano Mascetti et Filippo Palo trouvent ici la preuve de mon profond respect.

Au cours de ces cinq dernières années, j'ai également eu l'occasion de travailler avec des personnes formidables. Je pense notamment à remercier le Pr LABADI Abdellah Seddik , le Pr DEBABECHE Mahmoud et Dr IZZRECH Kamilia.

Mes sincères remerciements vont aussi à Messieurs Mr BENAÏSSA Sahraoui, Mr SEKKOUR Ilyes, Mr BELAABED Faris et Mr LAIADI Adil pour leurs encouragements et leur soutien moral. Ils ont par ailleurs montré un intérêt constant à l'avancement de mes travaux.

Que dire alors de mes parents... ils m'ont offert la possibilité de rêver grand et d'accomplir certains de ces doux rêves. Merci pour votre rigueur et tout l'amour que vous m'avez donné, J'ai une grosse pensée aussi pour mes trois sœurs et mon petit frère et mes deux beaux-frères.

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

Tout seul, on va vite.....

Mais ensemble, on va plus loin.

Alors merci à tous :)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les garde et les protège.

A mes adorables sœurs Nassima, Ikram, Aya

A mon frère Imad Eddine et mes deux beaux-frères.

A tous ceux qui me sont chères et à tous ceux qui m'aiment et à tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

Bassem Athmani.

Table des matières

Remerciements

Table des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction Générale.....1

Chapitre 1. État de l'art

1.1	Introduction	7
1.2	Rappel sur les différents types de déversoirs	7
1.2.1	Déversoir rectiligne	7
1.2.1.1	Déversoir à crête mince.....	7
1.2.1.2	Déversoir à crête épaisse.....	8
1.2.1.3	Déversoir standard (Creager)	9
1.2.2	Déversoirs non rectilignes	9
1.2.2.1	Déversoir en labyrinthe	9
1.2.2.2	Déversoir en hausses fusibles	13
1.2.2.3	Déversoir en touches de piano (PK-Weir)	15
1.3	Travaux sur la modélisation numérique appliquée aux déversoirs	21
1.3.1	Modélisation d'un déversoir rectiligne (Creager)	21
1.3.2	Modélisation d'un déversoir non rectiligne (Labyrinthe)	31
1.3.3	Modélisation d'un déversoir non rectiligne (PK-Weir)	36
1.3.4	Application de la modélisation 3D à des ouvrages existants	49
1.3.4.1	Barrage de Malarce	49
1.3.4.2	Barrage de Balaroud.....	51
1.4	Conclusion	52

Chapitre 2. Théorie de base du code Flow-3D appliquée à la modélisation de l'écoulement à surface libre

2.1	Introduction	56
2.2	Equations fondamentales	56
2.2.1	Equation de conservation de la masse (équation de continuité).....	57
2.2.2	Equation de la quantité de mouvement :	58
2.3	Modélisation de la surface libre	59
2.3.1	La méthode VOF	59
2.4	Conclusion	61

Chapitre 3. Optimisation et validation du modèle numérique

3.1	Introduction	64
3.2	Procédure de simulation	64
3.2.1	Présentation du code de calcul Flow-3D®	64
3.2.2	Reconstruction 3D de la géométrie des PK-Weirs	65

3.2.3	Génération du maillage	66
3.2.4	Conditions initiales et aux limites	67
3.3	Optimisation du modèle numérique	68
3.3.1	Test de la largeur	68
3.3.4	Test du maillage	74
3.4	Validation du modèle numérique	77
3.4.1	Vue générale du modèle réduit physique	78
3.4.2	Validation des tests de la largeur du PK-Weir avec un seul élément et maillage mono-bloc.	80
3.4.3	Validation des tests du maillage avec configuration du maillage multi-bloc.....	81
3.5	Conclusion	82
<hr/> Chapitre 4. Optimisation de la forme du déversoir en PK-Weir <hr/>		
4.1	Introduction	86
4.2	Sensibilité des paramètres	87
4.2.1	Effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i).....	88
4.2.2	Effet de la largeur des alvéoles.....	97
4.3	Comparaison aux résultats expérimentale	106
4.4	Conclusion	109
Conclusion Générale.....		110
Bibliographie.....		113

Table des Figures

1.1:Schéma de l'écoulement sur un déversoir à crête mince.	8
1.2: Déversoirs à seuil épais.	8
1.3: Déversoir standard (Creager).	9
1.4: Schéma d'un déversoir non rectiligne.	10
1.5: Schéma d'un déversoir en labyrinthe (Lux et al. 1984).	11
1.6: Déversoir en labyrinthe arrondies en amont.	12
1.7: Déversoir en labyrinthe de forme Trapézoïdale.	12
1.8: Courbe de conception des déversoirs en labyrinthe en fonction de h/P et L/W (a : forme triangulaire, b : forme trapézoïdale) (Hay & Taylor, 1970).	13
1.9: Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995)	14
1.10: Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995)	14
1.11: Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995).	14
1.12: Types du PK-Weir. (Epicum et al. 2013)	16
1.13; Paramètres fondamentaux sur une PK-Weir– Vue 3D (Pralong et al. 2011).	17
1.14: Paramètres fondamentaux sur un PK-Weir.	17
1.15: Détail des coupes transversales des crêtes PK-Weir (Pralong et al. 2011).	17
1.16:Vue en plan du paramètre L sur une PK-Weir (à gauche)	17
1.17: Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P (Ouamane et al., 2006a).	19
1.18: Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane et al., 2006a).	19
1.19: Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane et al. 2006a).	20
1.20:Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane, 2006b). ...	21
1.21: Vue d'ensemble du maillage et du déversoir standard en 2D (D.K.H. Ho et al., 2001).	22
1.22: Contours de pression et vecteurs de vitesse à t=0s, t=1.5s et t=15s (H/H _d =1,33) (D.K.H. Ho et al., 2001).	23
1.23: Comparaison des résultats de pression mesurés et calculé pour 3 différentes charges (D.K.H. Ho et al., 2001).	24
1.24: Vecteurs de vitesse (m/s) sur la crête de l'évacuateur de crue (H/H _d =1,33) (D.K.H. Ho et al., 2001).	24
1.25:Dimensions du déversoir et les paramètres de l'écoulement (Savage et al. 2001)	25
1.26: Dimensionnement du maillage pour le déversoir standard (Savage et al. 2001)	25
1.27: Comparaison des débits normalisés (Savage et al. 2001).	26
1.28: Relative Percent Error in Discharge Using Physical Model as Basis (Savage et al. 2001).	26
1.29: Vérification de la débitance 2D de seuils Creager – Adéquation des résultats de calcul avec une marge (Laugier et al., 2009).	27
1.30: Modélisation numérique de la noyade aval d'un seuil Creager / Comparaison avec la bibliographie (à gauche). Contour de vitesse (à droite), (Laugier et al., 2009).	27
1.31: Vérification de la débitance 3D du seuils Creager (Laugier et al., 2009).	28
1.32: Position de la ligne d'eau – comparaison calcul numérique / données expérimentales (Laugier et al., 2009).	29
1.33: Champs de pression sur le seuil pour des différentes charges : comparaison du calcul numérique avec les données expérimentales. (Laugier et al., 2009).	30
1.34: Exemples d'études de sensibilité du maillage (Laugier et al., 2009).	30
1.35: Exemples d'études de sensibilité du maillage (Laugier et al., 2009).	31

1.36: Vue plant du labyrinthe à 2 cycles (Savage et al., 2004).	31
1.37: Maillage de calcul avec multi-blocs ; a) Vue latérale b) perspective avec la moitié du maillage enlevée (Savage et al., 2004).	32
1.38: Courbe de débit : des deux modèles physiques, CFD (Computational Fluid Dynamics) et théorique (Savage et al., 2004).	32
1.39: Erreur relative entre CFD, théorie, utilisant le modèle physique comme référence (Savage et al., 2004).	33
1.40: écoulement sur le labyrinthe et l'endroits des sections (H = 8,85 ft) (Savage et al., 2004).	33
1.41: a) Pressions dans la section A-A b) Vitesse dans la section A-A (H = 8,85 ft) (Savage et al., 2004).	34
1.42: Coupe transversale des vitesses dans la coupe B-B (H = 8,85 ft) (Savage et al., 2004).	34
1.43: Comparaison des résultats numériques pour un labyrinthe dans un canal avec les résultats expérimentaux de Lux et de Tullis (Savage et al., 2006).	35
1.44: Modèle numérique, y compris le maillage de calcul, les surfaces limites et le fluide simulé (Crookston et al., 2012).	35
1.45: Cd (α°) en fonction HT/P (Crookston et al., 2012).	36
1.46: Paramètres du PK-Weir, géométrie et maillage considérés (un ½ inlet et ½ outlet), résultats de la modélisation numérique Flow-3D® (Laugier et al. 2010).	36
1.47: Modèle réduit d'un PK-Weir type A (Laugier et al. 2010).	37
1.48: Résultats en débits spécifiques comparés (Flow-3D / Lempérière) (Laugier et al. 2010).	37
1.49: Variation du rapport de la largeur inlet/outlet (Pralong et al., 2011).	38
1.50: Coefficient de débit en fonction de rapport W_i/W_o (Pralong et al., 2011).	38
1.51: Variation de la section transversale du PK-Weir (Pralong et al., 2011).	38
1.52: Débit spécifique en fonction de longueur du porte-à-faux (Pralong et al., 2011).	39
1.53: Section transversale - Mise en œuvre des réhausses (Pralong et al., 2011).	39
1.54: Schéma d'épaisseur du voile T_s (Laugier et al., 2011).	40
1.55: Perte de capacité de la décharge par rapport à l'épaisseur du voile (Laugier et al., 2011).	41
1.56: Vue 3D de PK-Weir Type D, labyrinthe rectangulaire et déversoirs PK-Weir Type A (Ho Ta Khanh et al. 2012).	41
1.57: De gauche à droite : PK-Weir de type A, PK-Weir type D et labyrinthe rectangulaire (Ho Ta Khanh et al. 2012).	42
1.58: Comparaison entre les courbes d'évaluation : q_s (en $m^3/s.m$) en fonction des charges amont H_d/H_u (Ho Ta Khanh et al. 2012).	42
1.59: Exemple du résultat du modèle numérique et expérimental (Athmani et al., 2014).	43
1.60: Coefficient de débit en fonction de la charge relative (Athmani et al., 2014).	43
1.61: Schéma et dimensions du modèle physique du PK-Weir (à gauche : PK-Weir 1 normale, au milieu : avec extension triangulaire PK-Weir 2, à droite : avec extension du demi-cercle PK-Weir 3), sens d'écoulement de gauche à droite (Oertel et al., 2015).	44
1.62: Exemples du modèle numérique et expérimental pour PK-Weir 3, (a) fichier de géométrie STL, (b) conditions aux limites, (c) vitesses d'écoulement (modèle numérique), (d) Les limites de la surface d'eau (modèle expérimentale) (Oertel et al., 2015).	45
1.63: Coefficients de débits des modèles expérimentaux et numériques (Oertel et al., 2015).	45
1.64: Déverseurs non linéaires à un cycle. A : RL, b : PK, c : TPK (Safarzadeh et al. 2016).	46
1.65: Bloc du maillage cartésien non uniforme et conditions aux limites (Safarzadeh et al. 2016).	46

1.66: Comparaison du coefficient de débit des déversoirs en TPK, PK et RL (Safarzadeh et al. 2016).....	46
1.67: Schémas tridimensionnels de PKW 0.05 pour divers débits (Bremer et al., 2017).	47
1.68: Coefficient de débit Cd (Bremer et al., 2017).	47
1.69: Crête du PK-Weir scindée en trois parties selon la disposition des parois (Han Hu et al., 2018).....	48
1.70: Barrage Malarce (EDF, 2013).....	49
1.71: Modélisation 3D et modèle réduit du PK-Weir de Malarce (Laugier et al. 2010).....	49
1.72:Modèle réduit du barrage Malarce (EDF, 2011-2012).....	50
1.73:Débit spécifique du PK-Weir de Malarce (Laugier et al. 2010).	50
1.74: Modèle réduit du barrage Balaroud (Sadegh et al., 2016).	51
1.75: Modèles proposés des guideaux du barrage Balaroud (Sadegh et al., 2016).	51
1.76: Modèle d'écoulement à travers les modèles pour une période de retour de 1000 ans (Sadegh et al., 2016).....	52
1.77:Comparaison des débits pour les modèles des guideaux (Sadegh et al., 2016).	52
2.1: Volume élémentaire de fluide.....	56
2.2: Bilan des flux sur un volume élémentaire de fluide.	57
2.3: Schéma de la méthode VOF.....	60
3.1. Configuration et notations	65
3.2: Maillage structuré.....	66
3.3. Détail de la position des conditions aux limites (P : Specified pressure, S : Symmetry et W : Wall).....	67
3.4.Photographies des modèles réduits et comparaisons modèle réduit / modèle numérique FLOW-3D® des courbes de débitance (a) : PK-Weir de type A ; (b) : PK-Weir de Malarce).	69
3-5. Configuration (a) Un élément du PK-Weir, (b) Six éléments du PK-Weir.....	70
3-6. Comparaison entre le modèle avec 1 élément et 6 éléments.....	72
3-7. Comparaison des temps de calcul en fonction du nombre d'élément de PK-Weir.....	73
3-8. (a) Maillage mono bloc, (b)- Maillage multi bloc	74
3-9. Comparaison entre maillage Mono-Bloc et Multi-Bloc	75
3-10. Comparaison entre résolution du maillage : a- Multi-blocs, b- Mono-bloc.....	76
3-11. Temps de calcul pour l'étude de sensibilité du maillage	76
3.12: Capteur de niveau à ultrason.....	78
3-13:Débitmètre électromagnétique.....	78
3-14. Débitmètre à ultrason	78
15: Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits.	79
3-16. Vue en 3D du modèle expérimental.....	80
3.17: Comparaison des résultats numériques avec ceux obtenus par voie d'expérimentation sur modèle physique de PK-Weir avec un seul élément et en maillage mono-bloc.	80
3-18. Comparaison entre débit expérimental et calculé par Flow-3D® avec configuration du maillage multi-bloc	81
4.1: Modèle de PK-Weir : (a) avec porte-à-faux amont, (b) sans avec porte-à-faux amont ...	88
4.2. Effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i).....	89
4.3: Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_h/P=0.68$).	91
4.4. Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_h/P = 0.17$).	93
4.5. Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_h/P = 0.34$).	94
4.6. Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_h/P = 0.5$).	95
4.7: Débits spécifique Q_s calculées pour $W_i / W_o = 1$	99
4.8: Débits spécifique Q_s calculées pour $W_i / W_o = 1.2$	100
4.9: Débits spécifique Q_s calculées pour $W_i / W_o = 1.5$	101

4.10: Coupes Y-Z de l'écoulement sur le PK-Weir ($B_o/B_i=1_h/P=0.34$).....	103
4.11: Coupes Y-Z de l'écoulement sur le PK-Weir ($B_o/B_i=3_h/P=0.34$).....	104
4.12: Coupes Y-Z de l'écoulement sur le PK-Weir ($B_o/B_i=6_h/P=0.34$).....	105
4.13: Modèle réduit n° 2.....	106
4.14: Modèle réduit n° 1.....	106
4.15: Modèle réduit n°3.....	106
4.16: Résultats en débits spécifiques comparés (Flow-3D / Expérimental).....	107
4.17: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux	107

Liste des Tableaux

1.1: Nomenclature des paramètres fondamentaux de la géométrie du PK-Weir (Pralong et al. 2011).....	16
1.2: Comparaison du débit et de la vitesse moyenne.	24
1.3: Comparaison entre débit mesuré et calculé (Laugier et al. 2010).	28
1.4: La géométrie de labyrinthe (Savage et al., 2006).....	34
1.5: Caractéristiques géométriques des modèles réduits (Crookston et al., 2012).....	35
1.6: Comparaison entre modèle physique et numérique (Laugier et al. 2010).	37
1.7: Gain en débit spécifique comparé au PK-Weir modèle A (Pralong et al., 2011).	40
1.8: Caractéristiques géométriques du modèle réduit (Athmani et al., 2014).	43
1.9: Répartition des débits le long du crête d'un élément du PK-Weir (Han Hu et al., 2018).	48
3-1. Caractéristiques géométriques du modèle réduit	70
3-2. Caractéristiques du modèle numérique par onglet de l'interface de Flow-3D®	71
3-3. Comparaison entre le modèle avec 1 élément et 6 éléments.....	72
3-4. Temps de calcul pour en fonction de la charge et la largeur du modèle.....	73
3-5. Temps de calcul pour l'étude de sensibilité du maillage	77
3-6. Résultats numérique et validation par des données expérimentales.....	81
3-7. Comparaison entre débit expérimental et calculé par Flow-3D® entre débit expérimental et calculé par Flow-3D® avec configuration du maillage multi-bloc.....	82
4.1 : Configurations et paramètres géométriques des PK-Weirs testés pour l'effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i).....	88
4.2: Résultats des débits spécifiques en [$l.s^{-1}.m^{-1}$] pour les différentes configurations testées.....	89
4.3: Configurations et paramètres géométriques des combinaisons entre les rapports B_o/B_i et W_i/W_o	97
4.4: Configurations et paramètres géométriques des modèles choisis pour la validation expérimentale	106
4.5: Comparaison entre les résultats (Q_s) physiques et numériques.	108

Nomenclature

A_x	Aire fractionnaire pour un écoulement dans la direction x	cm^2
A_y	Aire fractionnaire pour un écoulement dans la direction y	cm^2
A_z	Aire fractionnaire pour un écoulement dans la direction z	cm^2
B	Longueur des parois latéraux du PK-Weir ($B=B_b+ B_i+ B_o$)	cm
B_b	Longueur de base du PK-Weir	cm
B_i	Longueur du porte-à-faux amont	cm
B_o	Longueur du porte-à-faux aval	cm
b_x	Pertes de débit dans des milieux poreux dans la direction x	l/s
b_y	Pertes de débit dans des milieux poreux dans la direction y	l/s
b_z	Pertes de débit dans des milieux poreux dans la direction z	l/s
C_d	Coefficient du débit	
f_x	Accélérations de la viscosité	
f_y	Accélérations de la viscosité dans la direction y	
f_z	Accélérations de la viscosité dans la direction z	
g	Gravité	m/s^2
G_x	Accélérations de la pesanteur dans la direction x	m/s^2
G_y	Accélérations de la pesanteur dans la direction y	m/s^2
G_z	Accélérations de la pesanteur dans la direction z	
h	Charge d'eau sur le déversoir	cm
h^*	Charge totale	cm
L	Longueur total développée du déversoir	cm
L_u	Longueur développée de l'unité PK-Weir : $L_u=W_i+W_o+2B+2T_s$	
n	Nombre des éléments du PK-Weir. $n = L / W$	
P	Hauteur du déversoir	cm
P_p	Hauteurs de réhausse	cm
Q	Débit volumique	l/s
Q_{lab}	Débit du déversoir en labyrinthe	l/s
Q_{lin}	Débit du déversoir linéaire	l/s
Q_s	Débit unitaire	$l/s/m$

R_{DIF}	Terme de diffusion turbulente	
R_{SOR}	Source de masse	
r_m	Rayon de référence fixe	<i>cm</i>
S_i	Pente de la radier de l'alvéole amont	
S_o	Pente de la radier de l'alvéole aval	
t	Temps de calcul	<i>Heure</i>
T_s	Épaisseur des parois	<i>cm</i>
u	Vitesse dans la direction x	<i>m/s</i>
v	Vitesse dans la direction y	<i>m/s</i>
w	Vitesse dans la direction z	<i>m/s</i>
V_F	Fraction du volume	<i>cm³</i>
W_i	Largeur de l'alvéole amont (Intel)	<i>cm</i>
W_o	Largeur de l'alvéole aval (Outlet)	<i>cm</i>
W_t	Largeur totale du déversoir	<i>cm</i>
W_u	Largeur d'unité du PK-Weir	<i>cm</i>
B_o/B_i	Rapport de longueur des porte-à-faux	
h/p	Charge relatif	
L/W	Ratio de l'aspect vertical	
W_i/W_o	Rapport de largeurs des alvéoles	
Δx	Taille de cellule dans la direction x	<i>m</i>
Δy	Taille de cellule dans la direction y	<i>m</i>
Δz	Taille de cellule dans la direction z	<i>m</i>
ρ	Masse volumique du fluide	<i>Kg/m³</i>
σ	Tenseur de Contraintes	
μ	Viscosité dynamique	
τ	Contraintes visqueuses	

Introduction générale

1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Face aux contraintes économiques croissantes et aux conséquences du changement climatique, les ingénieurs souhaitent maintenir en service leurs barrages en sécurité sur des périodes de plus en plus étendues. Pour assurer la fonctionnalité de ces ouvrages hydrauliques en toute sûreté, la réhabilitation ou le réaménagement des évacuateurs de crues des barrages existants, devient un enjeu majeur. Dans ce sens, en 2003, une nouvelle forme de déversoir non rectiligne baptisée Piano Keys Weir (PK-Weir) a été développée par Hydrocoop-France en collaboration avec le Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de BISKRA (ALGERIE). Ce nouveau type de déversoir a l'avantage d'être appliqué aux barrages en terre et sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux. Le PK-Weir permet l'évacuation des débits spécifiques jusqu'à $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, en multipliant au moins par trois le débit d'un déversoir Creager, sa construction est simple et facile et peut être réalisé par des ressources locales de chaque pays (Ouamane et Lemprière, 2012).

Les avantages que représente le déversoir en touches de piano ont incité les concepteurs des barrages à son application pour plusieurs barrages à travers le monde. Ce nouveau type de déversoir a fait l'objet d'application pour trois barrages en Algérie. Le nouveau barrage Ouljet Mellegue a été équipé d'un déversoir de type PK-Weir. Les deux autres barrages en projet correspondent à la réhabilitation de l'évacuateur de crues du barrage Babar et le barrage Ramdhane Djamel en projet.

De part ses avantages, le PK-Weir est caractérisé par un écoulement tridimensionnel, notamment la présence de divers phénomènes physiques compliqués qui apparaissent quand il est en plein fonctionnement. Ces phénomènes sont la conséquence du grand nombre de paramètres géométriques qui définissent le PK-Weir. Le manque d'évaluation de l'impact des paramètres géométriques qui définissent la configuration du PK-Weir rend difficile la définition de la forme optimale.

Depuis son développement, plusieurs études de recherche expérimentale ont été réalisées dans le but de comprendre et d'optimiser le comportement hydraulique de PK-Weir. Les travaux réalisés se sont intéressés essentiellement à l'étude des différents paramètres géométriques sur la performance hydraulique. Malgré les efforts au cours de ces dernières années, on peut dire qu'il est encore difficile de définir l'optimum des divers paramètres géométriques pour la conception de PK-Weir qui soit hydrauliquement et économiquement performant.

La définition de la forme optimale du PK-Weir nécessite plus d'essais sur des modèles physiques, ceci demande un nombre de modèles équivalents à la combinaison entre les huit paramètres géométriques qui définissent le PK-Weir. Pour réduire le nombre d'essai sur modèles physiques, il est possible de procéder à une présélection de l'optimum par voie de modélisation numérique. L'utilisation de cet outil dans la recherche nous permettra de gagner du temps et du coût. Son application permettra ainsi d'avoir une compréhension détaillée de l'écoulement sur le PK-Weir. Par ailleurs, les résultats seront validés par comparaison aux études expérimentaux.

Ainsi, l'objectif principal de cette thèse est de contribuer à l'analyse et l'étude de l'écoulement sur le PK-Weir par une modélisation numérique qui est réalisée essentiellement par le logiciel Flow-3D[®] et des études expérimentales réalisées sur des modèles physiques de PK-Weir. La finalité est de développer des outils prédictifs des résultats rapides et fiables. La satisfaction de cet objectif passe par la réalisation d'un ensemble de travaux d'optimisation permettant d'améliorer et de valoriser le savoir acquis pour d'autres études ultérieures.

Les travaux de recherche réalisés, à caractère numérique et expérimental, s'inscrivent dans deux axes principaux objectifs. Le premier consiste à élaborer et optimiser un modèle numérique puis valider ce dernier par des résultats expérimentaux. Le second vise à comprendre le comportement de l'écoulement et l'amélioration des performances hydrauliques du PK-Weir.

Pour atteindre ces objectifs, ces travaux de recherche sont scindés en quatre principaux chapitres:

Le premier chapitre traite l'état de l'art concernant les différents types de déversoirs et leur comportement hydraulique. Il couvre les travaux numériques et expérimentaux effectués jusqu'à nos jours dans le cadre de l'analyse et l'optimisation des paramètres géométriques de ces ouvrages. L'influence des paramètres géométriques sur le fonctionnement et la performance hydraulique sont décrits. De plus, la modélisation numérique de l'écoulement est présentée comme un outil important pour analyser et la compréhension des phénomènes hydrauliques.

Le second chapitre, décrit le nouvel outil de la modélisation numérique qui est présenté par le code Flow-3D produit par Flow Science, basé sur la méthode des volumes finis.

Le troisième chapitre concerne les modélisations numériques et la comparaison des résultats aux essais expérimentaux. Il décrit en détail la démarche de la simulation numérique, basée sur le code Flow-3D[®] pour prédire les charges sur le PK-Weir et les débits évacuée. D'autre part, des optimisations au niveau des deux étapes de simulations numériques sont effectuées pour

améliorer le modèle numérique. Enfin, pour juger la capacité du code, les résultats sont comparés aux résultats obtenus par les différents essais réalisés sur des modèles physiques.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la définition de l'optimum entre deux paramètres géométriques du PK-Weir, la largeur des alvéoles et la longueur des porte-à-faux. Pour atteindre cet objectif, ce chapitre est scindé en deux parties, la première concerne l'étude de l'effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i) sur la capacité d'évacuation. La seconde partie s'est intéressée à la combinaison des deux paramètres géométriques: la longueur des porte-à-faux et la largeur des alvéoles et la définition de leur effet sur le comportement hydraulique du PK-Weir.

Dans la conclusion générale, nous tentons de dégager les résultats marquants de notre contribution et de souligner l'intérêt de quelques orientations futures de nos travaux.

Chapitre 1

Etat de l'art sur la modélisation numérique
des déversoirs

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Rappel sur les différents types de déversoirs	7
1.2.1	Déversoir rectiligne	7
1.2.2	Déversoirs non rectilignes	9
1.3	Travaux sur la modélisation numérique appliquée aux déversoirs	21
1.3.1	Modélisation d'un déversoir rectiligne (Creager)	21
1.3.2	Modélisation d'un déversoir non rectiligne (Labyrinthe)	31
1.3.3	Modélisation d'un déversoir non rectiligne (PK-Weir)	36
1.3.4	Application de la modélisation 3D à des ouvrages existants	49
1.4	Conclusion	52

1.1 Introduction

Le caractère tridimensionnel des écoulements et la complexité de la géométrie de certains déversoirs justifient ainsi l'utilisation d'un outil de calcul 3D pour comprendre leur fonctionnement hydraulique. Le comportement hydraulique du déversoir est un sujet très vaste, ainsi, il est très difficile de lister de façon exhaustive l'ensemble des travaux relatifs à ce domaine. Pour avoir une compréhension de la performance hydraulique d'un déversoir, nous détaillerons quelques travaux ayant un rapport direct avec la présente étude. L'analyse bibliographique, développée dans ce chapitre, regroupe des résultats d'expérience et des travaux de modélisation de l'écoulement sur les différents types de déversoir.

Plan du chapitre : Nous rappelons brièvement dans une première partie (Section [1.1](#)) les types de déversoir et les différentes formes. Nous présenterons ensuite dans la section [1.2](#) quelques travaux de recherche liés à la simulation numérique de l'écoulement sur les différents types de déversoir. Enfin, nous justifions les orientations de notre contribution tant au niveau du programme expérimental que des essais de modélisation et de simulations mis en œuvre.

1.2 Rappel sur les différents types de déversoirs

Selon la ligne de crête, on peut distinguer deux types du déversoir. La première catégorie regroupe les déversoirs rectilignes et la seconde catégorie regroupe les déversoirs non rectilignes (crête discontinue en plan).

1.2.1 Déversoir rectiligne

1.2.1.1 Déversoir à crête mince

Généralement, nous utilisons ce type de déversoir pour mesurer le débit dans les laboratoires ou au niveau des stations de surveillance. Ce type de déversoir à paroi mince (Figure 1.1) se caractérise par la largeur W_t , sa hauteur P et sa hauteur d'eau H , de ce dernier on déduit le débit Q par la formule de débit établie par Poleni (1717) qui s'écrit :

$$Q = CW_t H \sqrt{2gH}$$

Où C est le coefficient de débit et g l'accélération de pesanteur.

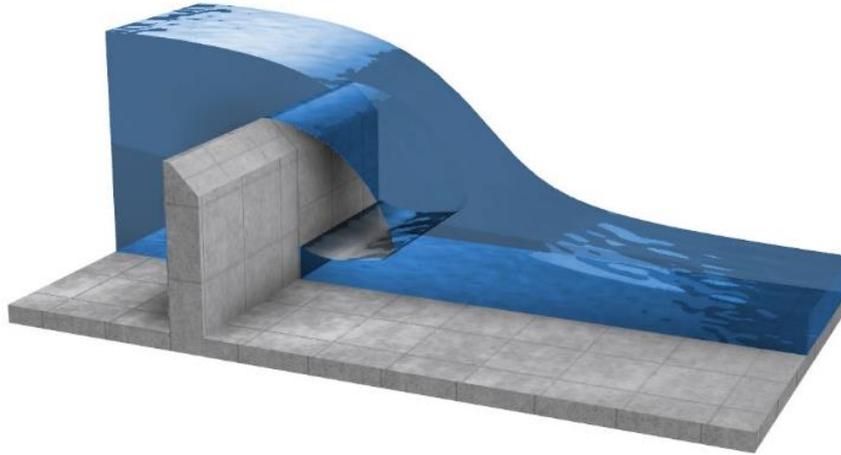


Figure 1.1: Schéma de l'écoulement sur un déversoir à crête mince.

Selon les conditions d'écoulement, plusieurs formules sont proposées pour déterminer le coefficient de débit C , on peut citer, Bazin (1888), Rehbock (1929), S.I.A. (1947) Hay et Markland (1958) et White (1977).

1.2.1.2 Déversoir à crête épaisse

Ce type de déversoir peut faire partie dans les évacuateurs de crues des barrages sous forme de seuil large ou en blocs fusibles (Figure 1.2). Comme la longueur transversale de la crête est la caractéristique principale de la différence entre le déversoir à crête mince et le déversoir à crête épaisse, le coefficient de débit sera différent et dépend de l'épaisseur de la paroi. Le débit qui transite par le déversoir à seuil épais est calculé par la formule du déversoir à mince paroi avec un coefficient de correction K . Ainsi, la formule devient

$$Q = Ck W_t H \sqrt{2gH}$$

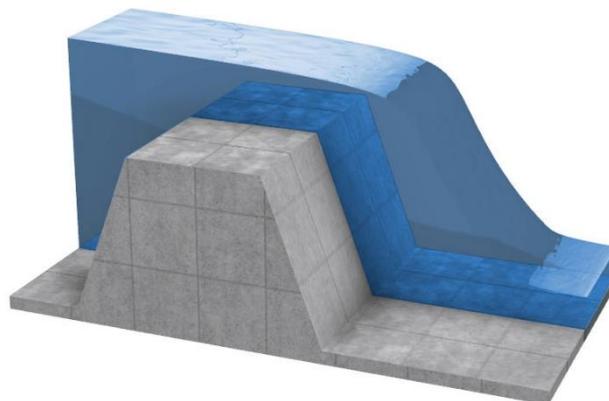


Figure 1.2: Déversoirs à seuil épais.

1.2.1.3 Déversoir standard (Creager)

Les avantages de ce type de déversoir viennent de sa forme (Figure 1.3) qui permet une amélioration des conditions de l'écoulement et d'éviter l'effet négatif de la vibration causée par les zones de sous-pression. Sa capacité d'évacuation peut être calculée à partir de la formule de Poleni.

$$Q = \mu W_t h \sqrt{2gh}$$

où, μ est le coefficient de débit du déversoir standard.

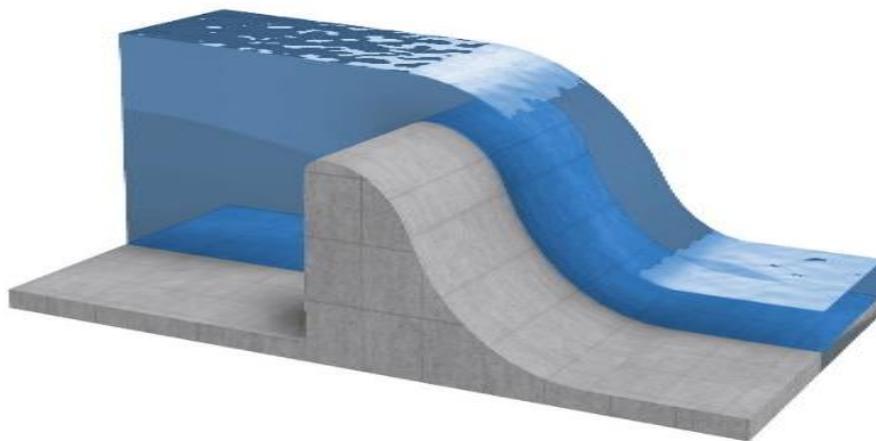


Figure 1.3: Déversoir standard (Creager).

1.2.2 Déversoirs non rectilignes

Les déversoirs non rectilignes qui représentent la deuxième catégorie des déversoirs se caractérisent par une crête sous forme de ligne brisée (discontinue) en plan. Cette configuration de déversoir permet d'augmenter la longueur de la crête du déversoir pour donner une longueur du seuil plus grande que celle de l'emprise du déversoir. De ce fait, pour une charge amont donnée, la capacité de débit est augmentée par rapport aux structures de déversoirs linéaires traditionnels. Dans ce qui suit, on se limite aux cas les plus importants du point de vue de leur application dans les constructions hydrauliques. Il s'agit notamment du déversoir en labyrinthe, du déversoir en hausses fusibles et du déversoir en touches de piano (PK-Weir).

1.2.2.1 Déversoir en labyrinthe

Ce type de déversoir représente une structure idéale pour faire passer des fortes crues à des charges comparativement faibles ; souvent utilisé lorsque la largeur de l'emprise est limitée ou

lorsque les conditions de charges maximales sont réduites. Le mode d'écoulement sur ce type de déversoir selon Lux & Hinchliff (1985) passe par quatre phases :

- Phase complètement aérée : Dans ce cas, la charge d'eau est faible, par conséquent, le débit tombe librement sur toute la longueur de la crête, l'épaisseur de la nappe et la profondeur d'eau à l'aval n'ont aucune influence sur la capacité du labyrinthe. Son rendement est idéal le coefficient de débit est maximal.
- Phase partiellement aérée : Une augmentation de la charge sur le déversoir provoque l'apparition d'une interférence de la nappe sur la crête qui se traduit par une réduction du coefficient du débit. Durant l'écoulement, on constate une abondance d'eau en amont et des poches d'air stables qui apparaissent sur le sommet du labyrinthe et le long de chaque paroi latérale.
- Phase de transition : En augmentant encore la charge amont, cette dernière engendre l'extension progressive de la zone déprimée. La nappe devient instable à cause de la présence des petites poches d'air en amont le long des murs latéraux. Cette phase se caractérise principalement par la discontinuité dans la courbe du coefficient du débit.
- Phase déprimée : Quand la charge d'eau amont atteint une valeur égale ou supérieure à la hauteur du déversoir, l'écoulement devient déprimé. Dans ce cas une nappe solide et non aérée se forme au-dessus de la crête, ce qui se répercute sur l'efficacité du labyrinthe qui s'approche à celle d'un déversoir linéaire ayant une largeur égale à celle de son emprise.

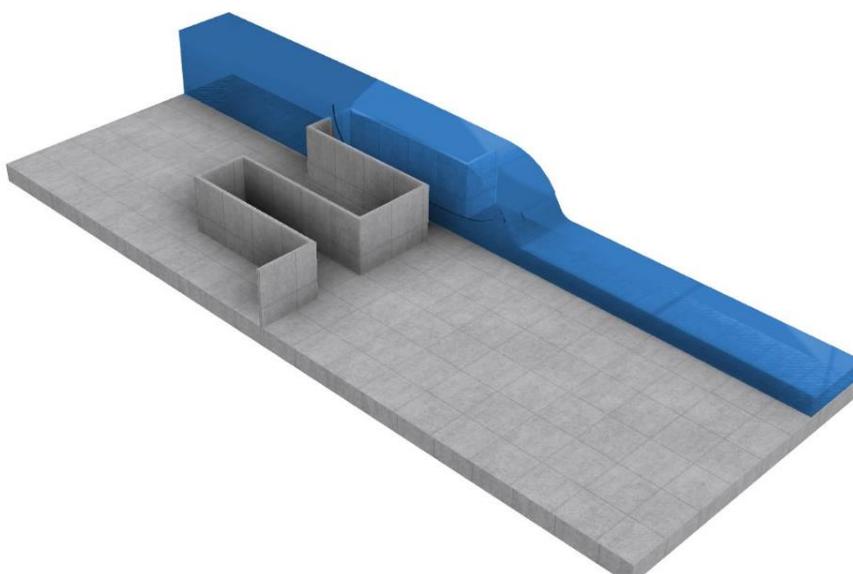


Figure 1.4: Schéma d'un déversoir non rectiligne.

Lux et al. (1984) ont défini les paramètres du déversoir en labyrinthe comme suit :

- α : Angle formé par le mur latéral et la direction de l'écoulement
- A : Demi-longueur des parois frontales
- B : Longueur du mur latérale
- D : Hauteur aval des parois
- h : Hauteur piézométrique en amont
- h_0 : Charge totale de chute
- H_d : Hauteur piézométrique en aval
- H_v : Charge cinétique d'approche en amont
- L : Longueur d'un cycle de crête
- P : Hauteur amont des parois
- T : Épaisseur de mur
- W : Largeur de cycle

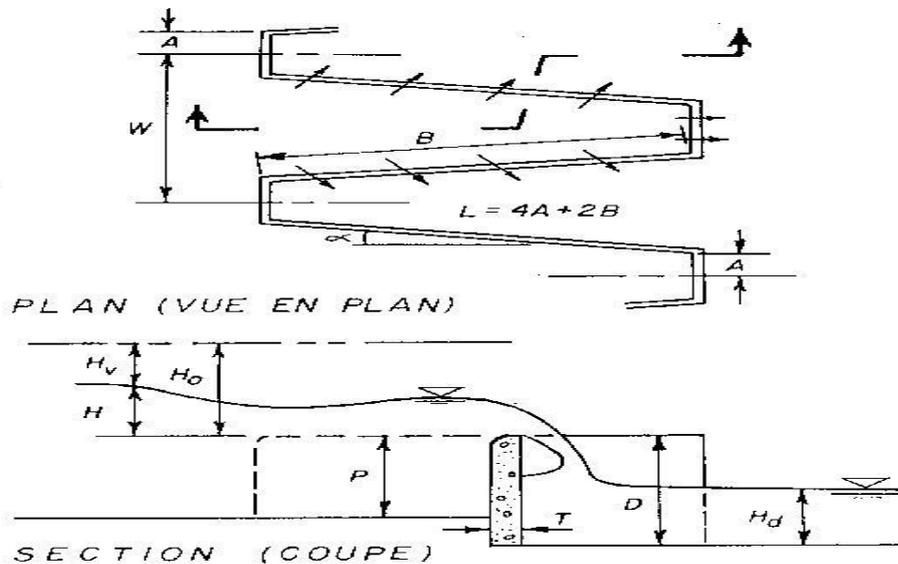


Figure 1.5: Schéma d'un déversoir en labyrinthe (Lux et al. 1984).

Selon la géométrie de la forme en plan du déversoir en labyrinthe on distingue plusieurs formes, trapézoïdales, triangulaires, rectangulaires, curvilignes ou la combinaison de deux de ces formes.

Cependant, la forme trapézoïdale symétrique est considérée comme la forme la plus avantageuse à cause des facilités de construction et de sa performance hydraulique.

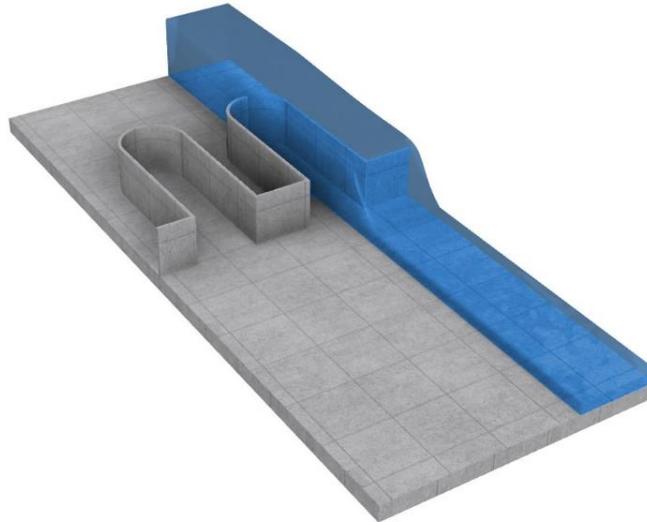


Figure 1.6: Déversoir en labyrinthe arrondies en amont.

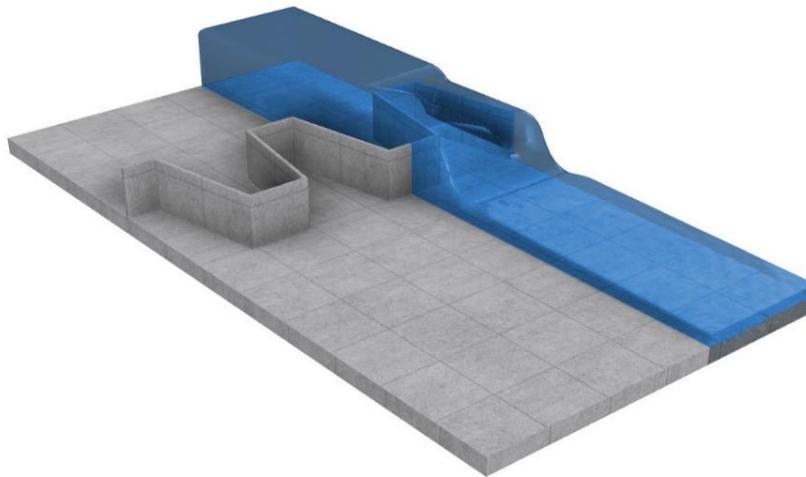


Figure 1.7: Déversoir en labyrinthe de forme Trapézoïdale.

La performance hydraulique a été définies par Hay et Taylor (1970), exprimée en termes de rapport du débit $q^* = \frac{Q_{Lab}}{Q_{Lin}}$, (Débit du déversoir en labyrinthe sur le débit du déversoir linéaire), en fonction de la charge relative h/p . Hay et Taylor (1970) ont introduit le rapport Q_L/Q_N pour développer des abaques pour des seuils horizontaux (forme trapézoïdale ou triangulaire), dans lesquelles ce rapport est fonction des paramètres L/W et h/P .

h/P : Rapport entre la charge sur le déversoir et la hauteur de pelle du déversoir.

L/W : Rapport entre la longueur totale de la crête du déversoir et la largeur totale du canal).

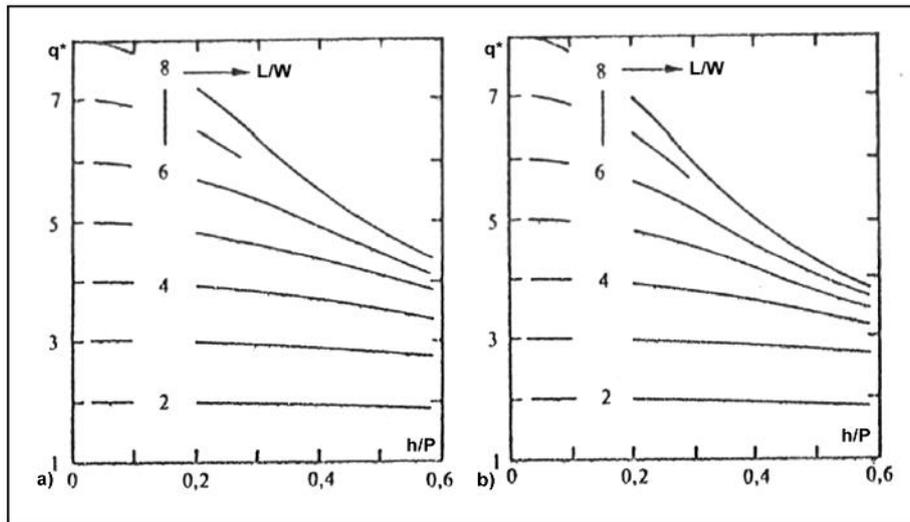


Figure 1.8: Courbe de conception des déversoirs en labyrinthe en fonction de h/P et L/W (a : forme triangulaire, b : forme trapézoïdale) (Hay & Taylor, 1970).

Il est à remarquer que, lorsque la hauteur d'eau déversée s'approche de zéro, le rapport Q_L/Q_N tend vers la valeur L/W (Figure 1.8).

1.2.2.2 Déversoir en hausses fusibles

Le déversoir en hausses fusibles correspond à une série d'éléments de forme trapézoïdale en plan posés l'un à côté de l'autre formant ainsi une crête non rectiligne. Ces éléments sont à la fois indépendants l'un de l'autre et auto-stables. Le but de ce système est d'accroître la performance d'un déversoir existant ou pour un nouveau barrage. Ce système a été inventé par François Lempérière en 1989, puis a été breveté par Hydroplus (Falvey et al, 1995). Il a été appliqué sur plus de 40 barrages dans plusieurs pays. Ce type de déversoir est une structure composée principalement par : un godet, un puits d'alimentation et une chambre de mise en pression au contact du seuil.

Dans les conditions normales de fonctionnement, les hausses fusibles agissent comme une barrière étanche. Pour des niveaux modérés de réservoir, l'eau coule au-dessus de la crête d'une manière similaire à celle d'un déversoir à seuil libre. Si le niveau du réservoir dépasse une valeur prédéterminée, l'eau s'écoule dans le puits d'entrée et provoque une pression de soulèvement dans la chambre ce qui déstabilise la hausse qui bascule automatiquement, laissant ainsi le passage à des grands débits dépassant le débit de dimensionnement de la stabilité de la hausse.

En générale, le débit évacué par les hausses fusibles est calculé selon la formule suivante :

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L_c h^{\frac{3}{2}}$$

Q : Débit

g : Accélération de la pesanteur

L_c : Longueur de la crête de la hausse fusible

h : Différence du niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête.

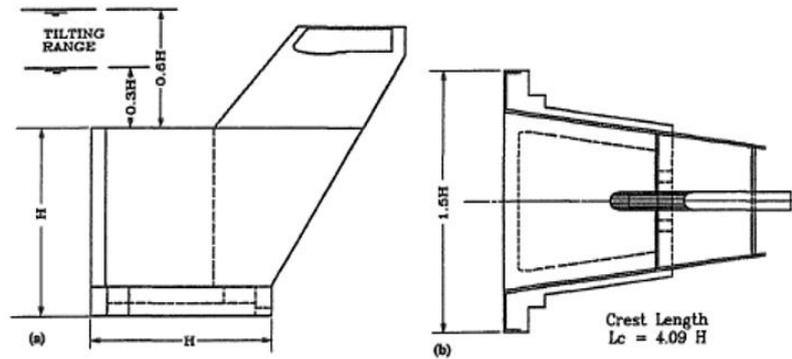


Figure 1.9: Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995)

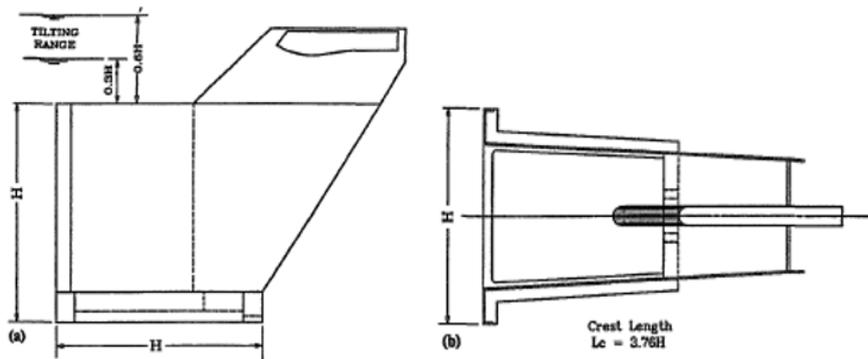


Figure 1.10: Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995)

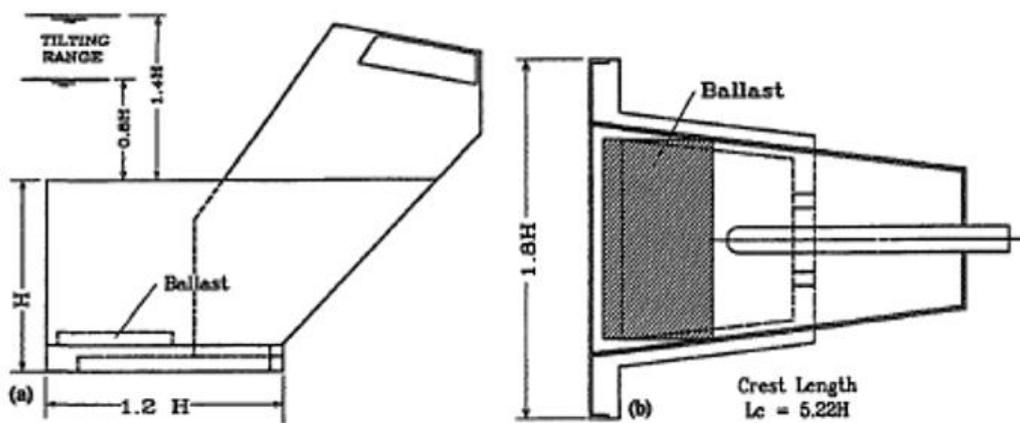


Figure 1.11: Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995)

Le coefficient du débit est une fonction de la longueur de la crête de la hausse et la hauteur d'eau en amont h rapportée à la profondeur totale de l'écoulement sur le seuil (Falvey, 1995). Ce coefficient diminue quand la charge sur la hausse fusible augmente. La meilleure équation convenable pour le coefficient du débit suit la loi de puissance suivante :

$$C_d = C_1 \left[\left(\frac{h}{H} \right) - C_2 \right]^{C_3}$$

La hauteur de la hausse fusible H et C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes déterminées expérimentalement pour les valeurs de h/H supérieures à 0,1. Le coefficient C_2 est un facteur de la tension superficielle qui devient négligeable quand la profondeur d'écoulement sur la hausse fusible augmente.

1.2.2.3 Déversoir en touches de piano (PK-Weir)

Récemment, une nouvelle forme de déversoir non rectiligne appelé le déversoir en touches de piano (PK-Weir) a été développé par Ahmed Ouamane (Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra en Algérie) et François Lempérière (Hydrocoop-France) (Lempérière et Ouamane 2003, et Ouamane et Lempérière 2006). Ce nouveau type de déversoir est caractérisé par :

- Des porte-à-faux amont et aval qui permettent d'avoir une longueur transversale de la crête supérieure à la base d'appui.
- Un radier incliné des alvéoles qui réduit la hauteur des murs latéraux.
- Par rapport au déversoir en labyrinthe, l'existence des porte-à-faux de PK- Weir est un avantage économique et hydraulique qui réduit la base d'appui et de garder la même longueur de la crête.

Selon Ouamane & Lempérière (2006), le PK-Weir peut être présentée sous quatre configurations selon l'existence des porte-à-faux :

- Type A : Avec deux portes à faux symétriques en amont et en aval.
- Type B : Avec uniquement des portes à faux en amont.
- Type C : Avec seulement des portes à faux en aval.
- Type D : Sans des porte-à-faux.

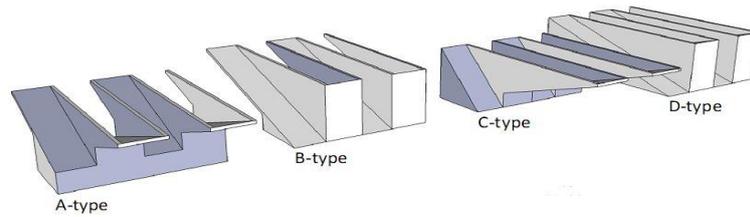


Figure 1.12: Types du PK-Weir. (Erpicum et al. 2013)

La géométrie du PK-Weir apparaît complexe, car elle comporte plusieurs paramètres. Afin d'unifier les notations, une nomenclature a été spécialement développée par plusieurs laboratoires (Pralong et al. 2011a). Vingt-trois paramètres ont été définis pour décrire la forme générale de la structure globale du PK-Weir figure 1.13 à 1.16 et tableau 1.1.

Tableau 1.1: Nomenclature des paramètres fondamentaux de la géométrie du PK-Weir (Pralong et al. 2011).

Symbole de paramètre	Désignation
B	Longueur amont-aval de la PK-Weir ($B=B_b+B_i+B_o$)
B_o	Longueur du porte-à-faux amont
B_i	Longueur du porte-à-faux aval
B_b	Longueur de base
B_h	Longueur de la crête de déversement mesurée depuis l'axe de la crête de la clé de sortie jusqu'à l'axe de la crête de la clé d'entrée (Figure I.35)
P_i	Hauteur de l'entrée d'entrée mesurée à partir de la crête PK-Weir
P_o	Hauteur de l'entrée de sortie mesurée à partir de la crête PK-Weir
P_b	Hauteur du niveau du radier à l'intersection de l'alvéole d'entrée et de l'alvéole de sortie
P_m	Différence entre P_i et P_b
S_i	Pente de la radier de l'alvéole amont
S_o	Pente de la radier de l'alvéole aval
W	Largeur totale de la PK-Weir
W_u	Largeur d'une unité PK-Weir
W_i	Largeur de l'alvéole amont
W_o	Largeur de l'alvéole aval
T_s	Épaisseur de la paroi
T_i	Épaisseur de la crête horizontale à l'extrémité de l'alvéole d'entrée
T_o	Épaisseur de la crête horizontale à l'extrémité de l'alvéole de sortie
L	Longueur total développée du déversoir
L_u	Longueur développée de l'unité PK-Weir : $L_u=W_i+W_o+2B_h+2T_s$
N_u	Nombre d'unités PK-Weir constituant la structure
n	Rapport de longueur développée de la PK-Weir : $n = L / W$
n_u	Rapport de longueur développée d'une unité PK-Weir : $n_u=L_u/W_u$

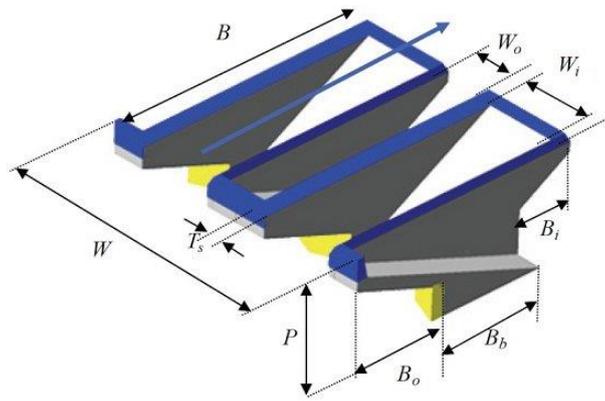


Figure 1.13; Paramètres fondamentaux sur une PK-Weir– Vue 3D (Pralong et al. 2011).

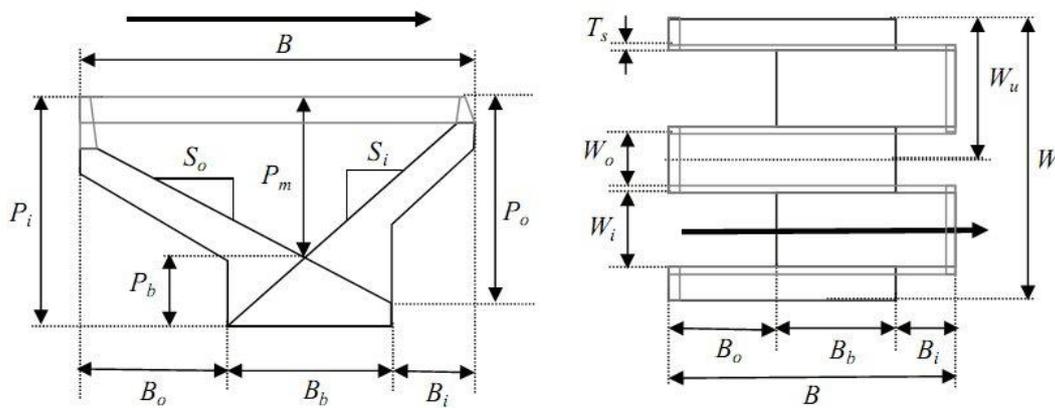


Figure 1.14: Paramètres fondamentaux sur un PK-Weir

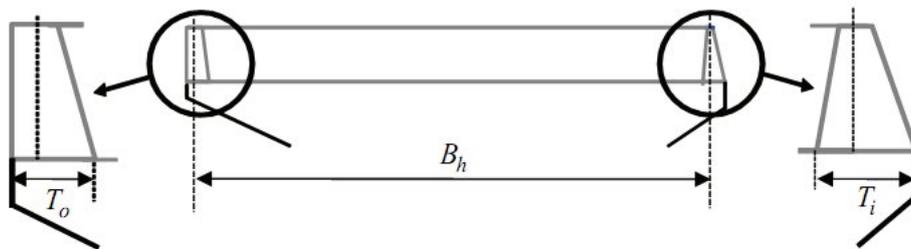


Figure 1.15: Détail des coupes transversales des crêtes PK-Weir (Pralong et al. 2011).

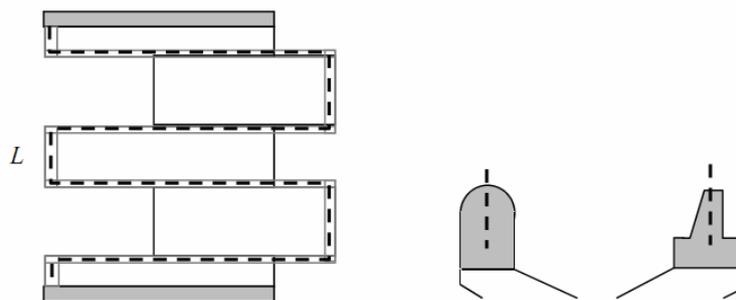


Figure 1.16: Vue en plan du paramètre L sur une PK-Weir (à gauche)

Le PK-Weir est caractérisé par une grande capacité d'évacuation de débit sous une charge relativement faible. Il permet l'évacuation des débits spécifiques jusqu'à $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et multiplie au moins par trois le débit d'un déversoir Creager. Ce type de déversoir se caractérise par plusieurs paramètres géométriques qui influent sur sa capacité d'évacuation, exprimée généralement par le coefficient de débit. Ce dernier, peut être exprimé en fonction des paramètres adimensionnels :

$$C_w = f\left(\frac{W}{P}, \frac{L}{W}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_o}{B_i}, \frac{h^*}{P}\right)$$

W/P : Ratio de l'aspect vertical.

L/W : Ratio de l'aspect longitudinal.

W_i/W_o : Rapport des largeurs des alvéoles.

B_o/B_i : Rapport des longueurs des porte-à-faux.

La charge totale correspond à la hauteur piézométrique ajoutée à la charge cinétique.

$$h^* = h + \frac{v^2}{2g}$$

Plusieurs études sur l'effet des paramètres géométriques sur la performance du PK-Weir ont été réalisées dans le monde pour comprendre son comportement hydraulique, optimiser sa conception et prouver ses avantages et inconvénients. Après les deux premières publications sur l'innovation du PK-Weir (Lempérière et Ouamane, 2003) et (Ouamane et Lempérière, 2006a) plusieurs études expérimentales ont été réalisées pour déterminer l'effet des différents paramètres géométriques sur l'écoulement du PK-Weir. Les premières études réalisées par Ouamane et Lempérière (2003 et 2006a), ont donné les premières informations sur l'effet des paramètres géométriques sur l'écoulement du PK-Weirs.

Des essais sur trois modèles de PK-Weir de même largeur de cycle et avec des hauteurs différentes indiquent que le coefficient de débit est dépendant du paramètre W/P. Autrement dit, la capacité d'évacuation est dépendante de la hauteur du PK-Weir.

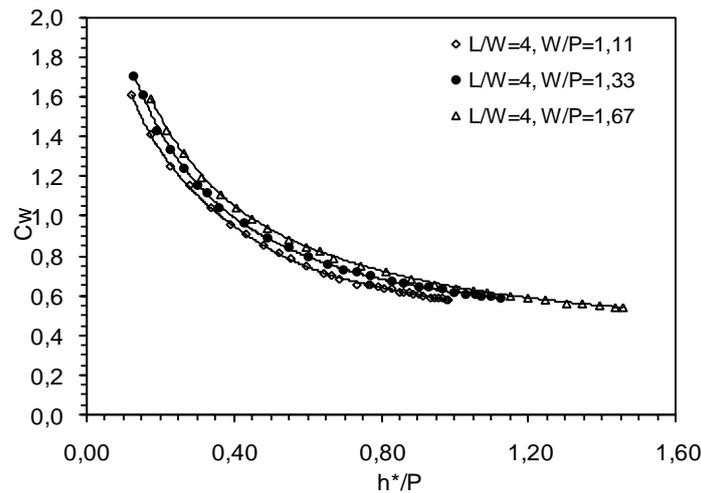


Figure 1.17: Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P (Ouamane et al., 2006a).

L'augmentation de 25 % de la hauteur des éléments étudiés, conduit à un gain de 6 % en termes de capacité d'évacuation (Figure 1.17).

Généralement, le ratio L/W qui exprime le rapport entre la longueur totale de la crête et la largeur du déversoir influe remarquablement sur l'écoulement. Ouamane et al. (2006a) ont présenté une étude expérimentale pour déterminer l'effet du ratio L/W sur l'écoulement du PK-Weir. Quatre configurations ont été testées ($L/W=4$, $L/W=6$, $L/W=7$ et $L/W=8,5$).

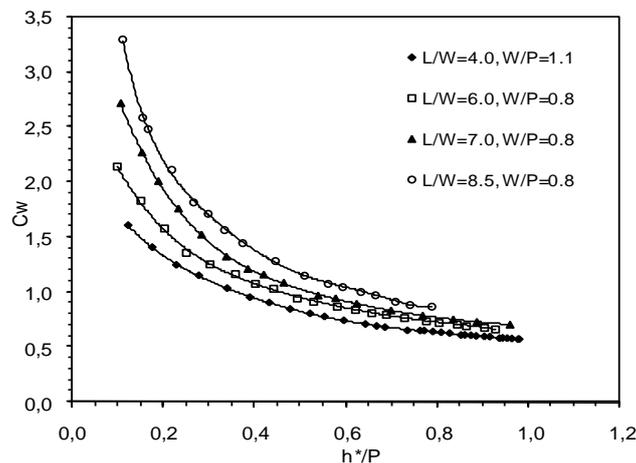


Figure 1.18: Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane et al., 2006a).

D'après les résultats qui sont montrés dans la figure 1.18 on remarque que l'augmentation de l'efficacité du PK-Weir diminue avec l'augmentation de la charge, ce qui implique une réduction de la performance qui est plus importante sur les déversoirs avec des grandes valeurs de L/W . Ces derniers ne sont rentables que pour les charges relatives inférieures à 0,3. Ainsi, le rapport optimal se situe entre $L/W = 5$ et 6.

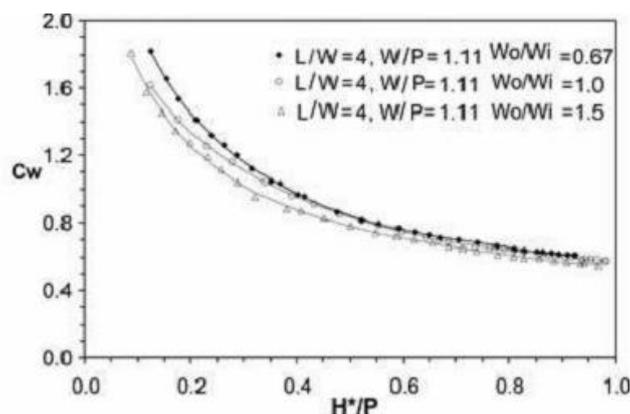


Figure 1.19: Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane et al. 2006a).

La forme rectangulaire des alvéoles amont et aval permet de distinguer trois configurations en plan, l'alvéole amont est supérieure à l'alvéole aval $W_i > W_o$, l'alvéole amont et l'alvéole aval ont la même largeur $W_i = W_o$ et l'alvéole amont est inférieure à l'alvéole aval $W_i < W_o$.

Ouamane et al. (2006a) ont présenté une étude expérimentale pour déterminer l'effet du ratio W_o/W_i sur l'écoulement du PK-Weir. À cet effet, trois cas ont été considérés ($W_o/W_i = 0.67, 1.0$ et 1.5).

Cette étude a montré que la disposition la plus avantageuse correspond à une largeur d'entrée supérieure à celle de la sortie (Figure 1.19). La largeur optimale de l'entrée est comprise entre 1,2 et 1,5 fois la largeur de la sortie.

L'impact de la longueur relative des porte-à-faux B_i/B_o , a été étudié selon trois configurations, la première avec des porte-à-faux amont plus longs que les porte-à-faux aval ($B_o=B/3, B_i=B/6, B_i/B_o=0.5$), la seconde configuration avec des porte-à-faux amont et aval identiques ($B_o=B_i=B/4, B_i/B_o=1$) et la dernière configuration avec seulement des porte-à-faux amont ($B_o=B/2, B_i=0, B_i/B_o=0$). Ces trois configurations ont été choisies pour des raisons de conception structurelle et de construction afin de déterminer les solutions les plus rentables (Figure 1.20).

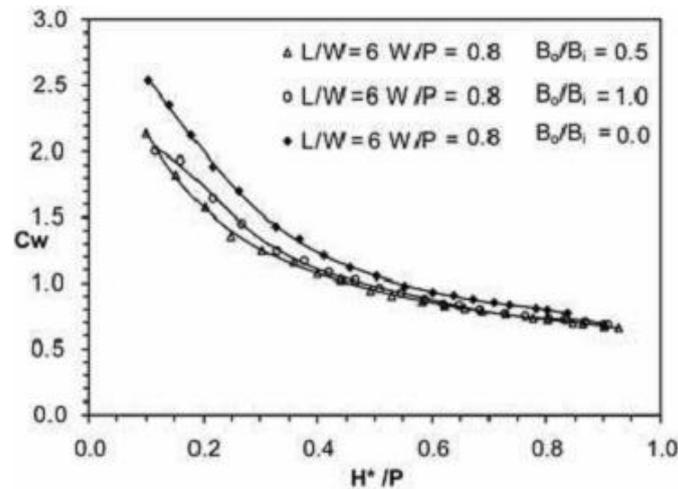


Figure 1.20: Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane, 2006b).

Ouamane et al. (2006b) ont montré que le modèle sans porte-à-faux aval ($B_0/B_i=0$) se caractérise par un rendement plus élevé que les modèles avec porte-à-faux aval. Par contre, le rendement du modèle avec porte-à-faux symétriques ($B_0/B_i = 1$) est plus grand que celui du modèle avec des porte-à-faux.

1.3 Travaux sur la modélisation numérique appliquée aux déversoirs

Cette synthèse bibliographique a pour objectif de regrouper les investigations menées sur les différents types de déversoirs. Nous détaillerons quelques travaux ayant un rapport direct avec notre étude, à savoir l'utilisation d'un code de calcul Flow-3D pour mieux comprendre le comportement hydraulique du déversoir et de l'optimiser.

1.3.1 Modélisation d'un déversoir rectiligne (Creager)

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études ont été réalisées afin d'approfondir la compréhension des phénomènes qui se produisent lorsque le déversoir est en plein fonctionnement. À cet effet, l'écoulement sur un déversoir standard sous différentes charges a été analysé par David et al. (2001). La modélisation en 2D et 3D a été étudiée. Dans le but de valider le modèle numérique, les résultats calculés ont été comparés avec des données publiées par US Army Corps of Engineers.

La figure 1.21 montre une vue d'ensemble du maillage et du déversoir standard. Le maillage est constitué de 95 cellules dans la direction x (horizontale) et 98 cellules dans la direction z (verticale).

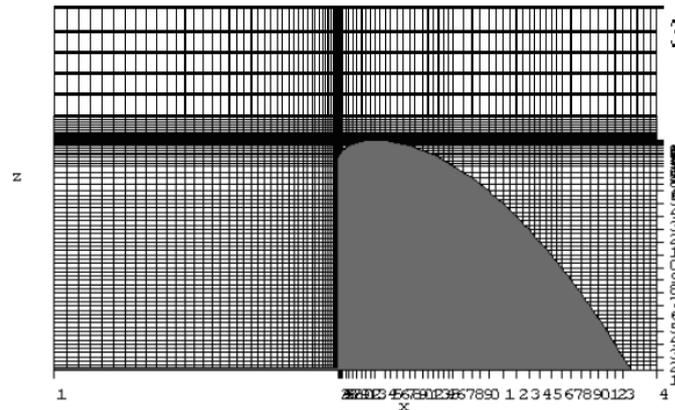


Figure 1.21: Vue d'ensemble du maillage et du déversoir standard en 2D (D.K.H. Ho et al., 2001).

Les dimensions du modèle étudié ont été choisies comme suit :

La limite gauche (en amont) : à 25 m de la crête.

La limite droite (en aval) : à 22 m de la crête.

La limite inférieure : à 18 m sous la crête.

La limite supérieure : à 14 m au-dessus de la crête.

Les conditions aux limites ont été supposées suivantes :

Limite amont: Hydrostatic pressure avec zero velocity; fluid height = H;

Limite aval : outflow ;

Limite supérieure : Symmetry.

Trois différentes charges relatives ($H/H_d = 1,33, 1,00$ et $0,50$) ont été testées. La séquence d'écoulement sur le déversoir est illustrée dans la figure 1.22. Cette figure montre les contours de pression (en Pa) et les vecteurs de vitesse (en m/s) à différents pas de temps pour le cas $H/H_d=1,33$. Les zones sombres reflètent la présence de grand nombre de vecteurs du vitesse (Signification de zone de grande vitesse d'écoulement).

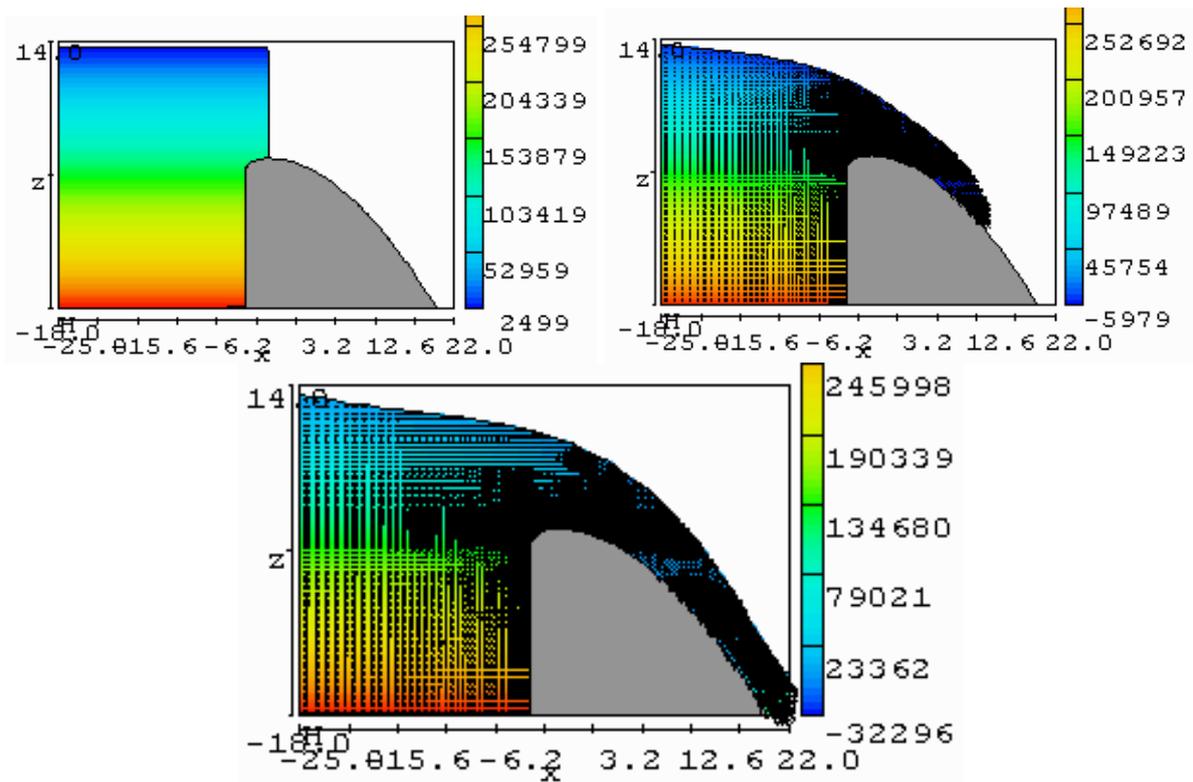


Figure 1.22: Contours de pression et vecteurs de vitesse à $t=0s$, $t=1.5s$ et $t=15s$ ($H/H_d=1,33$) (D.K.H. Ho et al., 2001).

La figure 1.23 montre la répartition de la pression le long de la crête à l'état d'équilibre. On peut observer que les résultats calculés ont donné une pression négative légèrement plus élevée, mais la tendance générale et les grandeurs sont en bon accord avec les données mesurées.

Les vecteurs de vitesse d'écoulement sur la crête à l'état d'équilibre pour $H/H_d=1,33$ sont illustrés sur la figure 1.24.

Le débit calculé et la vitesse moyenne (vitesse dans la direction x au niveau de l'axe de la crête) pour chaque cas sont présentés dans le tableau 1.2. On peut constater que les valeurs calculées sont surestimées par rapport aux résultats empiriques (de l'ordre de 10 à 20%).

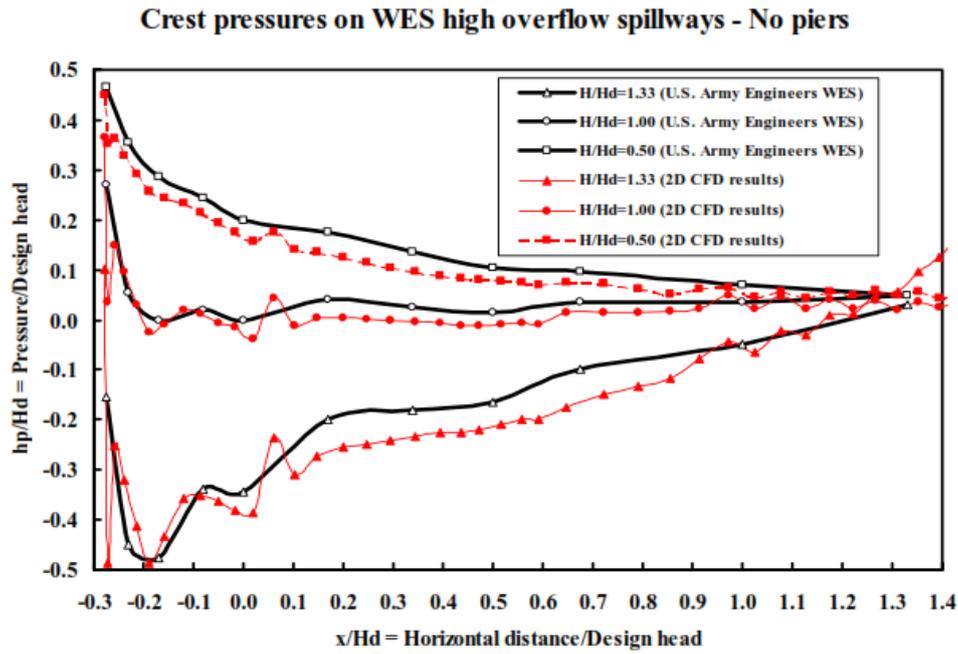


Figure 1.23: Comparaison des résultats de pression mesurés et calculé pour 3 différentes charges (D.K.H. Ho et al., 2001).

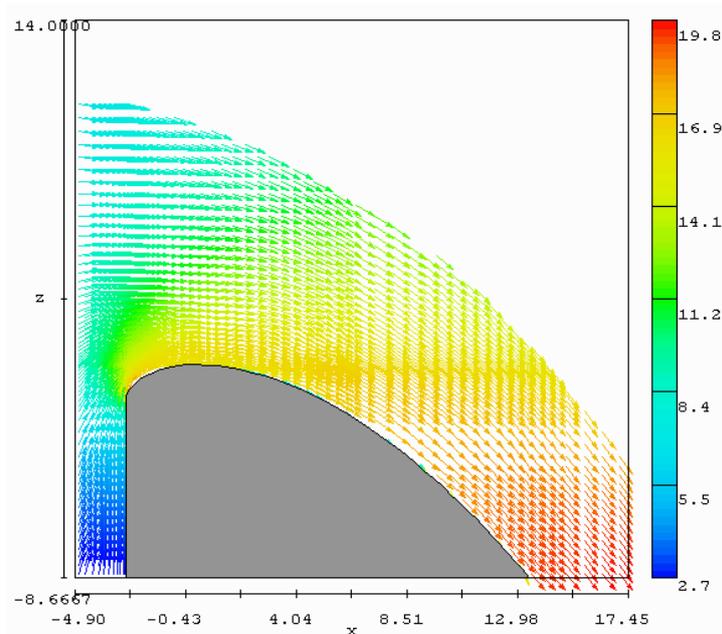


Figure 1.24: Vecteurs de vitesse (m/s) sur la crête de l'évacuateur de crue ($H/H_d=1,33$) (D.K.H. Ho et al., 2001).

Tableau 1.2: Comparaison du débit et de la vitesse moyenne.

H/H _d	Résultats empirique			Résultats de calcul			
	Q/L	D	Vel.	Q/L	Diff. (%)	Vel.	Dif. (%)
1.33	95.6	10.0	9.6	112.3	17	1.9	14
1.00	61.0	7.5	8.1	70.7	16	9.4	16
0.50	20.9	3.8	5.5	22.9	10	6.1	12

Q/L (m³/s/m), D = charge sur la crête, Vel. = Vitesse moyenne (m/s).

Savage et al. (2001) ont réalisé des études au laboratoire de recherche sur les eaux de l'Utah (UWRL) afin de comparer le débit d'écoulement sur un déversoir non contrôlé à l'aide d'un modèle physique, modèle numérique, et les courbes expérimentales obtenues à par l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE) et l'U.S. Bureau of Reclamation (USBR), pour aider l'ingénieur à choisir la méthodologie à suivre.

Pour comparer cette étude avec les données USBR et USACE existantes, un modèle de déversoir à crête standard (Maynard, 1985) a été utilisé. La géométrie de la crête est illustrée dans la figure 1.25.

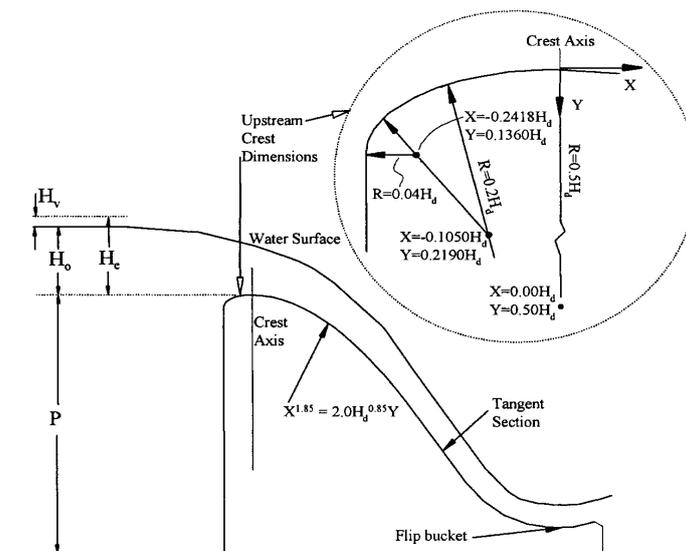


Figure 1.25: Dimensions du déversoir et les paramètres de l'écoulement (Savage et al. 2001)

Un maillage rectangulaire a été utilisé de longueur 3,9 m et de hauteur 1,2 m. Le déversoir a été placé à 1,52 m de l'extrémité aval. La convergence du maillage a été trouvée à une taille de cellule uniforme d'environ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 12,2$ mm. La figure 1.26 montre le maillage entourant le déversoir standard.

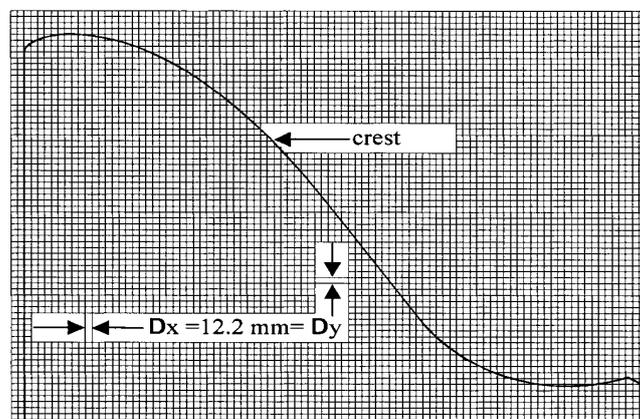


Figure 1.26: Dimensionnement du maillage pour le déversoir standard (Savage et al. 2001)

Les conditions aux limites ont été définies comme suit :

Parois latérales y : symmetry ; limite supérieure z : specified pressure avec une pression manométrique égale à zéro (atmosphérique) ; fond z— wall; x gauche : stagnation pressure basée sur la hauteur totale H sur la crête de l'évacuateur; et droite x : continueative.

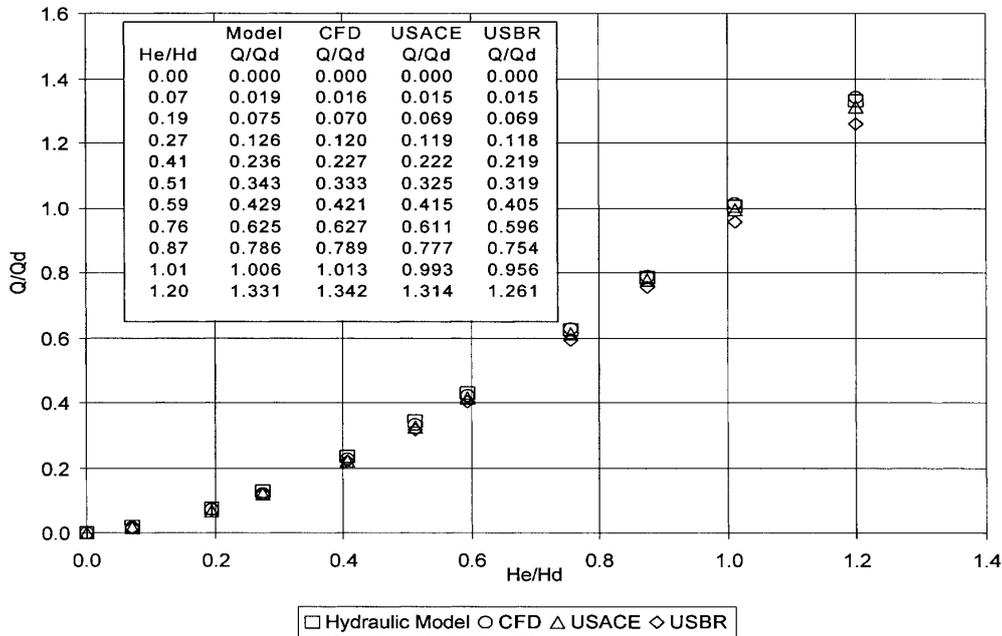


Figure 1.27: Comparaison des débits normalisés (Savage et al. 2001).

La comparaison des résultats du modèle physique avec celui du modèle numérique pour le déversoir standard est illustrée dans la figure 1.27. Les données USACE et USBR existantes ont également été ajoutés à titre de comparaison aux références existantes. L'erreur relative en débit est présentée sur la figure 1.28.

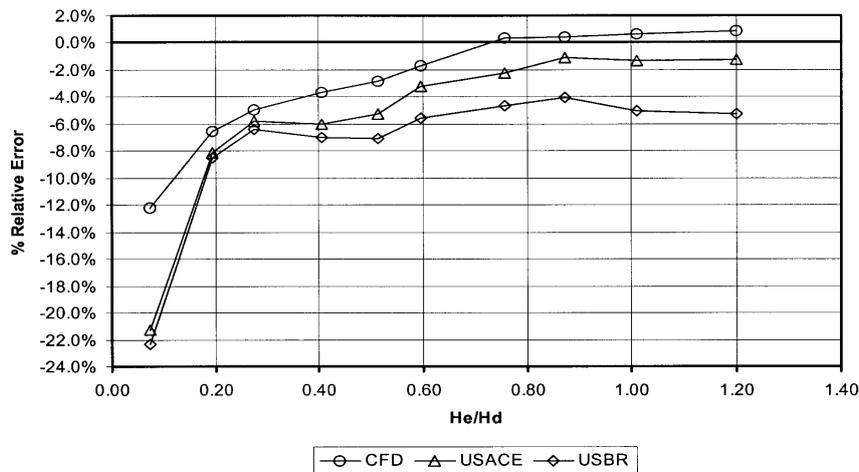


Figure 1.28: Relative Percent Error in Discharge Using Physical Model as Basis (Savage et al. 2001).

L'erreur relative montre que le modèle numérique concorde à moins de 1% avec le modèle physique pour $h_e / H > 0,7$. Le débit obtenu par l'USACE est similaire à celui obtenu par le modèle numérique mais avec un léger écart. Le débit de l'USBR montre une plus grande déviation.

Les travaux préliminaires de simulation numérique effectués par Laugier et al. (2009) par le biais du logiciel Flow-3D consistent à valider et évaluer la pertinence et la stabilité des résultats obtenus. La figure 1.29 illustre quelques résultats obtenus avec des modélisations 2D de seuil standard Creager.

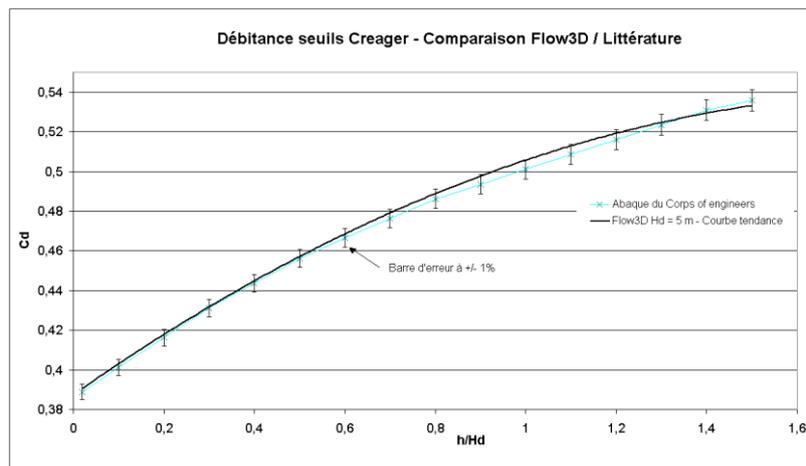


Figure 1.29: Vérification de la débitance 2D de seuils Creager – Adéquation des résultats de calcul avec une marge (Laugier et al., 2009).

Les résultats montrent un écart inférieur à 2% entre les calculs numériques et les références de la littérature. Des calculs 2D sur des seuils à géométrie non standard ont également montré une différence inférieure à 2% avec des résultats issus de modélisations sur modèle physique.

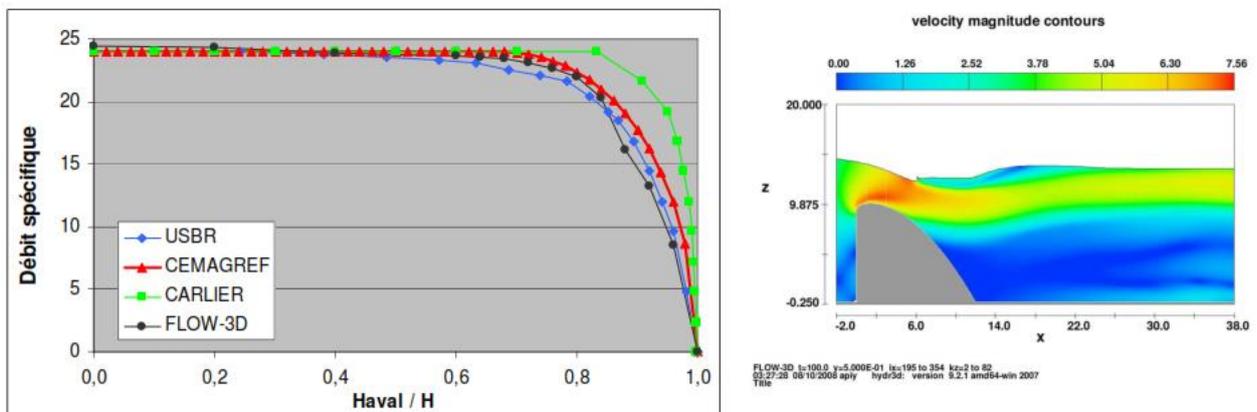


Figure 1.30: Modélisation numérique de la noyade aval d'un seuil Creager / Comparaison avec la bibliographie (à gauche). Contour de vitesse (à droite), (Laugier et al., 2009).

En complément, l'effet de la noyade aval sur la débitance des seuils profilés a été testé. Une adéquation très correcte entre les calculs numériques et les abaques été obtenue comme l'illustre la figure 1.30 qui compare les résultats obtenus avec Flow3D® avec plusieurs références tirées de la littérature.

La géométrie modélisée est un seuil virtuel de largeur infinie modélisé par une dizaine de mailles en largeur et des conditions de symétrie sur les côtés. La construction du modèle est initiée par une géométrie 2D, extrudée suivant l'axe profond afin de former le volume fluide 3D de l'écoulement. Deux maillages différemment raffinés, l'un dit grossier (Taille moyenne de 25 mm) et l'autre dit fin (Taille moyenne de 12 mm), sont construits (Figure 1.31).

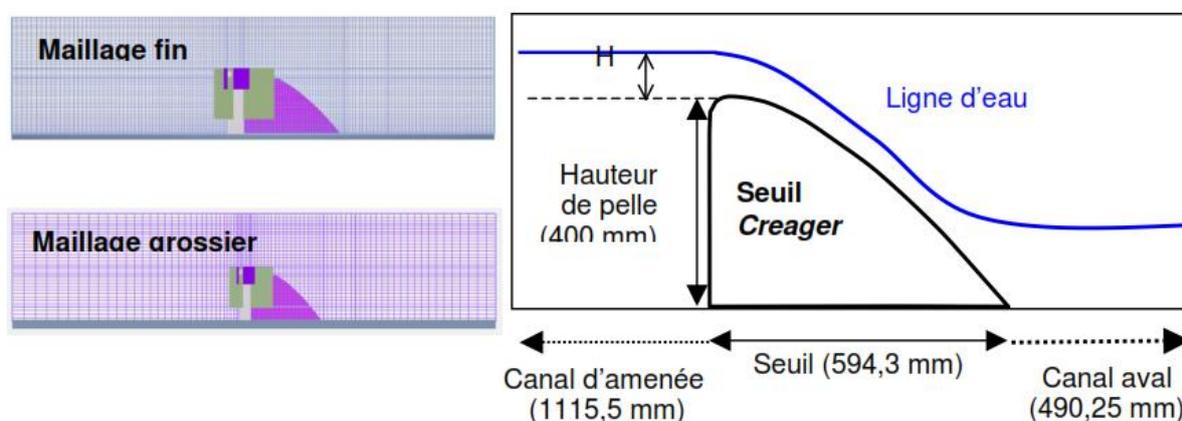


Figure 1.31: Vérification de la débitance 3D du seuils Creager (Laugier et al., 2009).

Le tableau ci-dessous présente la débitance du seuil calculé par le code Flow-3D et comparée à celle mesuré expérimentalement.

Tableau 1.3: Comparaison entre débit mesuré et calculé (Laugier et al. 2010).

Hauteur calculée	$h/H_d=0.492$		$h/H_d=0.955$		$h/H_d=1.241$	
C_d mesuré	0.446		0.485		0.502	
Maillage	Grossier	Fin	Grossier	Fin	Grossier	Fin
C_d calculé	0.459	0.446	0.498	0.486	0.510	0.503
Ecart débit	+2.9%	0%	+2.7%	+0.2%	+1.6%	+0.2%

Les résultats fournis par Flow-3D sont globalement très satisfaisants.

Laugier et al. (2009), ont utilisé la modélisation 3D pour étudier la position de la ligne d'eau sur le déversoir standard. Les figures ci-dessous représentent les lignes d'eau calculées par le code Flow 3D et comparées aux mesures expérimentales.

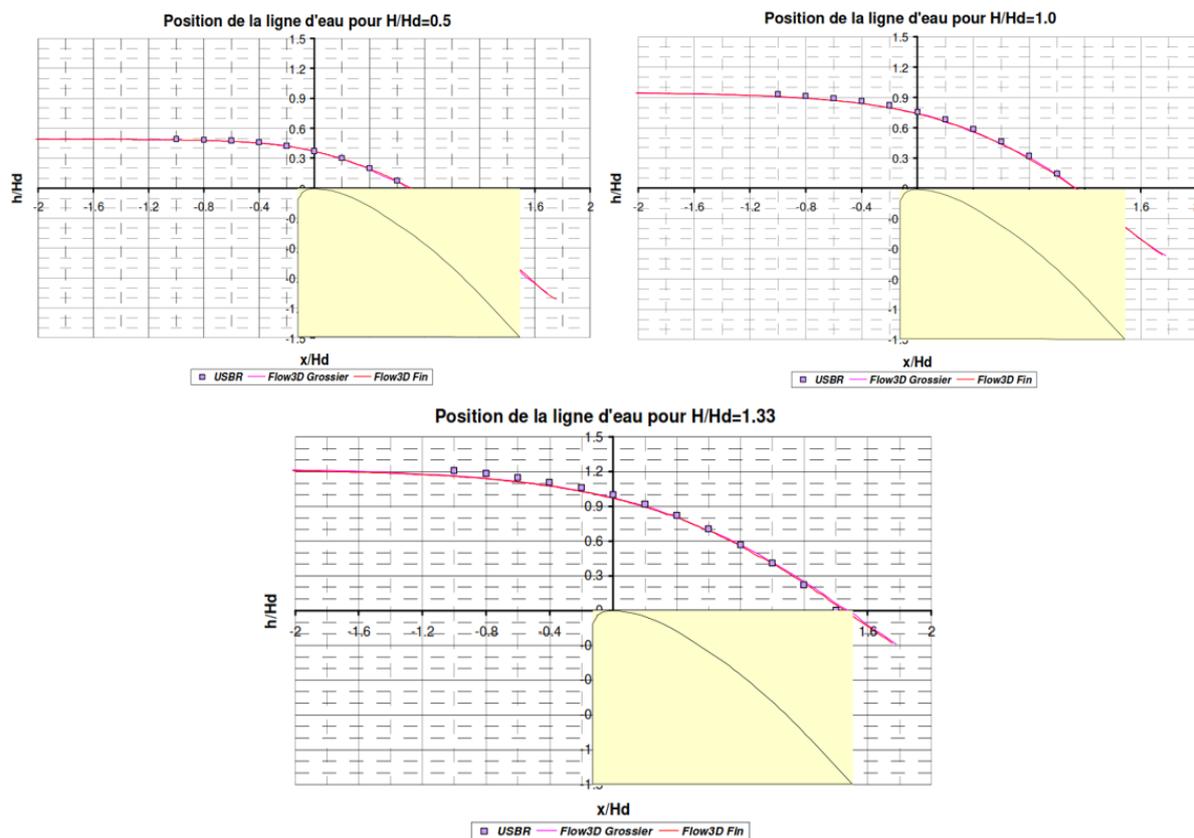


Figure 1.32: Position de la ligne d'eau – comparaison calcul numérique / données expérimentales (Laugier et al., 2009).

La distribution de pression pariétale a été étudiée. Les figures suivantes représentent la distribution de pression statique sur le parement du seuil.

Les résultats obtenus, permettent de montrer :

À faibles charges : une adéquation correcte entre les calculs et les mesures,

À fortes charges : calculs et mesures sont sensiblement divergents ; sur la partie amont du seuil, une plus grande qualité du maillage induit une amélioration des résultats numériques.

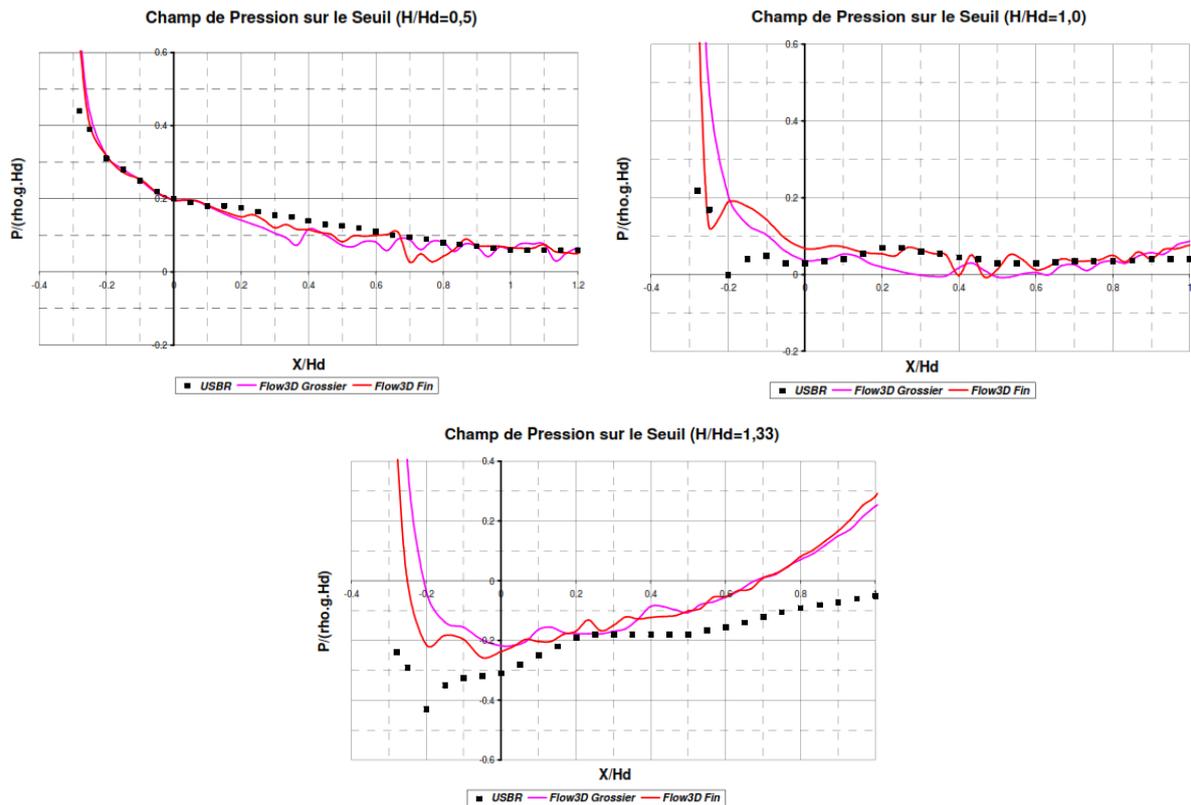


Figure 1.33: Champs de pression sur le seuil pour des différentes charges : comparaison du calcul numérique avec les données expérimentales. (Laugier et al., 2009).

La figure ci-après illustre quelques exemples de maillage testés parmi plusieurs dizaines de simulations.

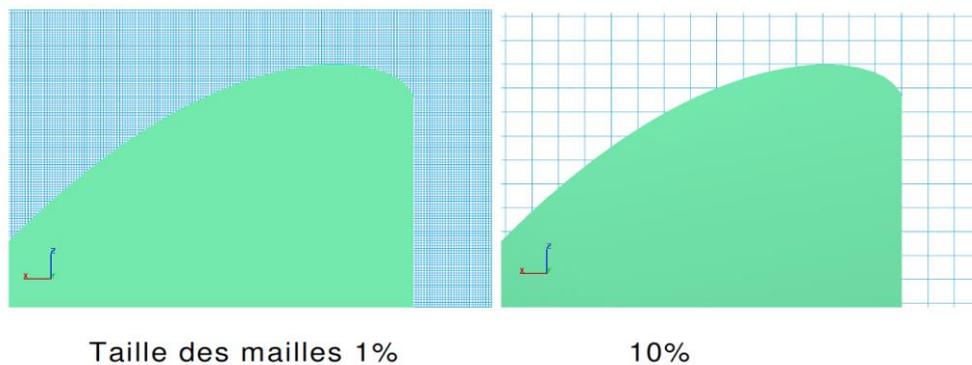


Figure 1.34: Exemples d'études de sensibilité du maillage (Laugier et al., 2009).

La figure ci-après fournit une synthèse des simulations menées en comparant la taille relative du maillage de l'écoulement, le temps de calcul et la précision obtenue. Ce graphique laisse apparaître un optimum situé autour d'une finesse de maillage comprise entre 6 et 7%. Au-delà, le gain gagné en précision est faible au regard de l'incrément de temps de calcul.

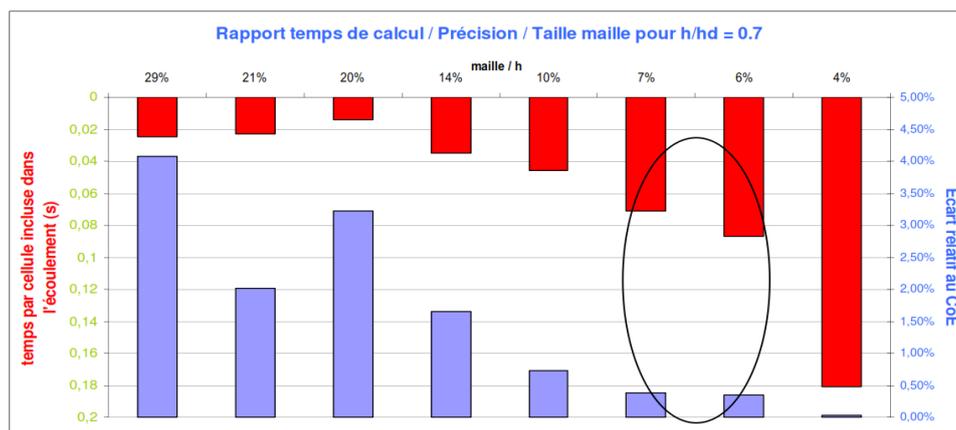


Figure 1.35: Exemples d'études de sensibilité du maillage (Laugier et al., 2009).

1.3.2 Modélisation d'un déversoir non rectiligne (Labyrinthe)

Le déversoir en labyrinthe est souvent une solution efficace pour augmenter la capacité de l'évacuation d'eau. Au fil des années, de nombreux travaux de recherche numérique ont été réalisés dans le but de comprendre et d'optimiser le comportement hydraulique de ce type de déversoir. Dans ce sens, on peut citer le travail de Savage et al. (2004), qui a utilisé le logiciel flow-3D[®] pour modéliser l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe et de comparer les résultats de simulation avec ceux de la théorie. Un modèle à deux cycles a été utilisé au lieu d'un modèle complet de huit cycles en raison de réduire la taille du domaine étudié. Le déversoir en labyrinthe a été testé dans deux configurations différentes. La première configuration correspond au déversoir en labyrinthe installé sur une digue, et la seconde configuration correspond à l'emplacement du déversoir sur le fond d'un canal.



Figure 1.36: Vue plant du labyrinthe à 2 cycles (Savage et al., 2004).

Le maillage multi-bloc a été utilisé pour augmenter le nombre de cellules dans les zones où la variation d'écoulement est rapide afin de réduire le temps de calcul et améliorer la précision.

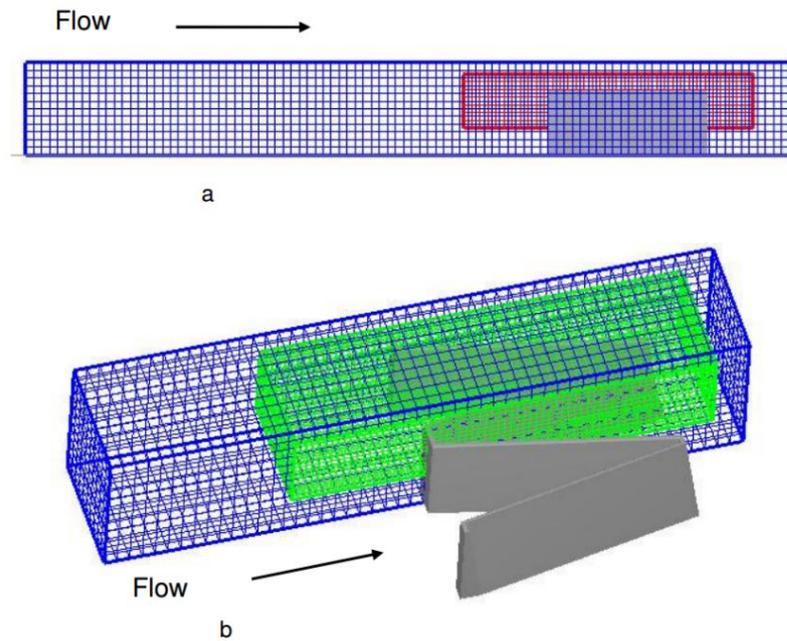


Figure 1.37: Maillage de calcul avec multi-blocs ; a) Vue latérale b) perspective avec la moitié du maillage enlevée (Savage et al., 2004).

La figure 1.38 représente la comparaison des débits issus des résultats de la modélisation, de la théorie et des mesures expérimentales des deux dispositions (Déversoir en labyrinthe installé sur une digue et sur le fond d'un canal).

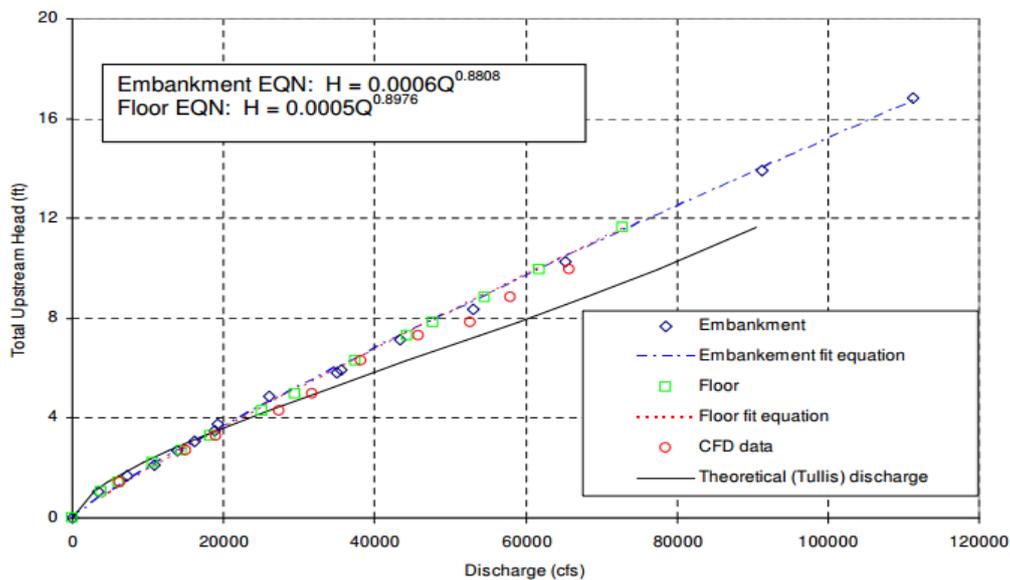


Figure 1.38: Courbe de débit : des deux modèles physiques, CFD (Computational Fluid Dynamics) et théorique (Savage et al., 2004).

La figure au-dessus montre que, la différence entre les deux dispositions est négligeable. En d'autres termes, le débit n'a pas été affecté de manière significative en plaçant le déversoir labyrinthe sur une digue.

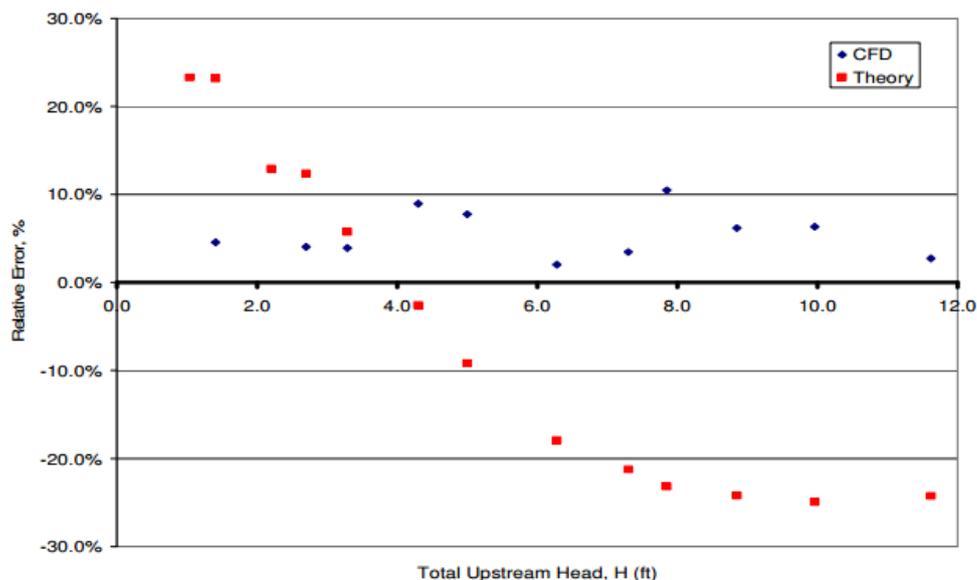


Figure 1.39: Erreur relative entre CFD, théorie, utilisant le modèle physique comme référence (Savage et al., 2004).

L'erreur relative des résultats de la modélisation et de la théorie pour chaque débit est présentée dans la figure ci-dessous.

La comparaison entre la théorie et le modèle physique montre une grande différence dans le débit prédit, avec une erreur relative allant jusqu'à $\pm 25\%$ (voir la Figure 1.39).

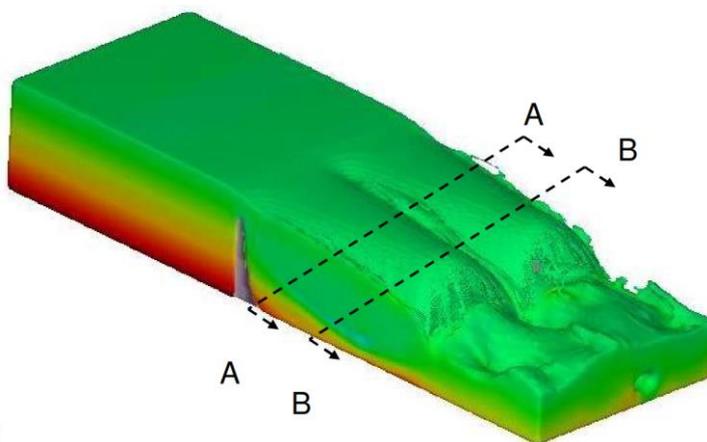


Figure 1.40: écoulement sur le labyrinthe et l'endroits des sections ($H = 8,85$ ft) (Savage et al., 2004).

La figure 1.41 montre que les deux jets d'écoulements sur le déversoir forment une zone de perturbation. Étant donné que cette zone se situe au-dessus du sommet du déversoir, la capacité d'évacuation risque de l'affecter. Par conséquent, la valeur du débit dans cette région diminue. Cependant, dans la figure 1.42 l'impact des deux jets se produit sous la crête du déversoir. À ce stade, le jet d'écoulement se déplace probablement avec une vitesse supérieure à la vitesse

critique, empêchant ainsi toute perturbation de l'écoulement en aval et affectant le débit de décharge.

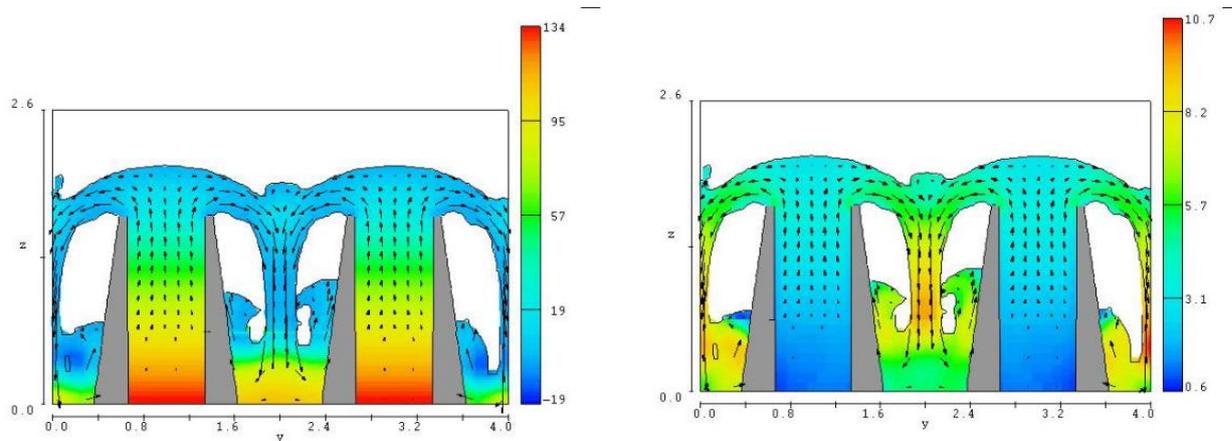


Figure 1.41; a) Pressions dans la section A-A b) Vitesse dans la section A-A ($H = 8,85$ ft) (Savage et al., 2004).

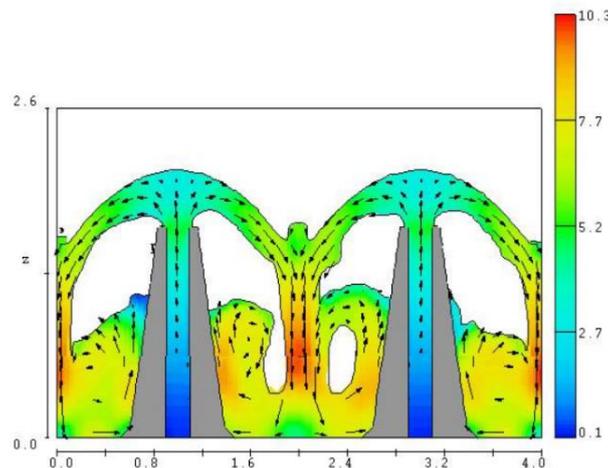


Figure 1.42: Coupe transversale des vitesses dans la coupe B-B ($H = 8,85$ ft) (Savage et al., 2004).

Paxson et al. 2006 ont présenté une étude comparative des résultats expérimentaux obtenus par Lux et Tullis par rapport à ceux obtenus par le modèle numérique (déversoir en labyrinthe) dans le but de valider les résultats de code CFD (Flow-3D).

Tableau 1.4: La géométrie de labyrinthe (Savage et al., 2006).

Weir Height (P)	3.66 m	Apex Width (2a)	1.22 m
Cycle Width (W)	9.14 m	Number of Cycles (n)	2
Aspect (W/P) ratio	2.5	Length Magnification (L/W)	4.95

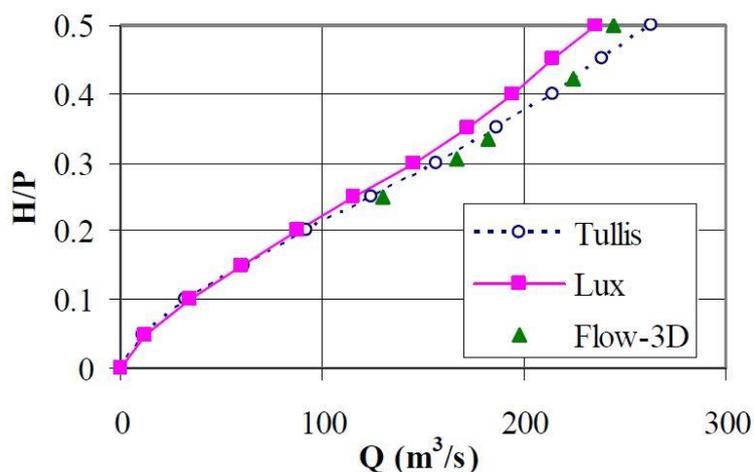


Figure 1.43: Comparaison des résultats numériques pour un labyrinthe dans un canal avec les résultats expérimentaux de Lux et de Tullis (Savage et al., 2006).

Cette étude a montré que les résultats obtenus par la méthode numérique sont compatibles aux méthodes de Tullis et de Lux (Figure 1.43).

Crookston et al. (2012) ont réalisé une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus sur deux modèles réduits physiques et les résultats obtenus numériquement par le biais du code Flow-3D, ainsi qu'une comparaison avec celles obtenues dans Crookston et al., (2010).

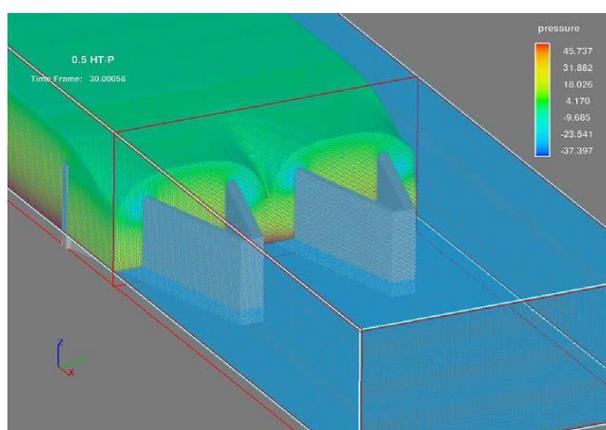


Figure 1.44: Modèle numérique, y compris le maillage de calcul, les surfaces limites et le fluide simulé (Crookston et al., 2012).

Tableau 1.5: Caractéristiques géométriques des modèles réduits (Crookston et al., 2012).

	α°	P (mm)	$L_{c-cycle}$ (m)	W/P	N	H/P
Modèle 01	15	152.4	0.996	2.0	4	0.32-2.10
Modèle 02	15	304.8	1.991	2.0	2	0.05-0.93

Selon la figure 1.45 il existe un bon accord entre les résultats expérimentaux des modèles 1 et 2. Les résultats expérimentaux du modèle 1 valident également l'équation d'ajustement de la courbe $\alpha = 15^\circ$ présentée par Crookston (2010). L'accord entre les valeurs $C_d(\alpha^\circ)$ calculées à

partir des simulations numériques, et ceux de l'équation d'ajustement de la courbe semble acceptable.

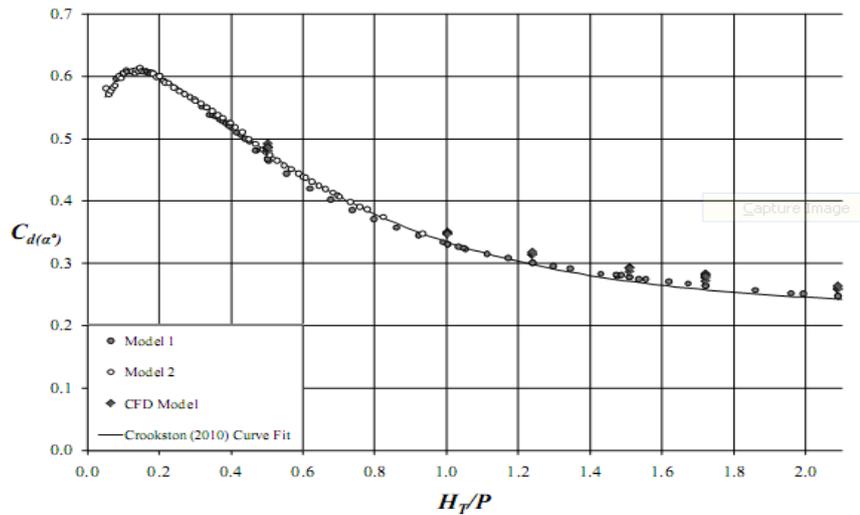


Figure 45: $C_d(\alpha^\circ)$ en fonction HT/P (Crookston et al., 2012).

1.3.3 Modélisation d'un déversoir non rectiligne (PK-Weir)

Le développement de PK-Weir a conduit à de nombreux travaux de modélisation numériques 3D qui se sont basées sur les données obtenues des essais hydrauliques sur modèles réduits physiques réalisés par plusieurs laboratoires. De nombreux auteurs ont axé leur réflexion sur les caractéristiques et les processus d'écoulement sur ce type de déversoir.

Laugier et al. (2010) ont été simulé numériquement les écoulements à l'approche et au-dessus du seuil PKW afin de comparer les résultats de ces simulations Flow-3D[®] avec les débitances communément admises issues de l'analyse expérimentale. Ce sont les données publiées par F. Lempérière dans « The Piano Keys Weir : A new cost-effective solution for spillways » feront office de référence.

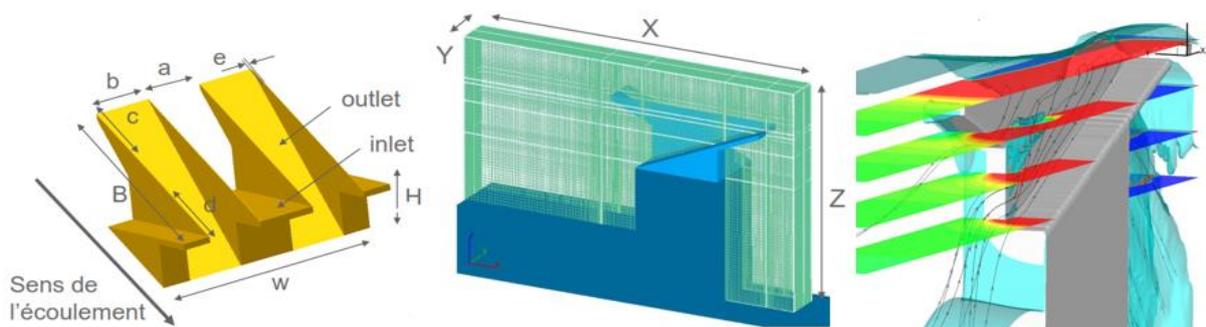


Figure 1.46: Paramètres du PK-Weir, géométrie et maillage considérés (un 1/2 inlet et 1/2 outlet), résultats de la modélisation numérique Flow-3D[®] (Laugier et al. 2010).

Les courbes de la capacité d'évacuation ont été comparées à celles obtenues sur modèles réduits au Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement d'EDF à Chatou pour les PK- Weir

de type A. Les résultats numériques semblent cohérents puisque les écarts en débit sont inférieurs à 5 % en moyenne par rapport aux valeurs des modèles réduits. Cette proximité des résultats est illustrée par la figure 1.48 et le tableau 1.6.



Figure 1.47: Modèle réduit d'un PK-Weir type A (Laugier et al. 2010).

Tableau 1.6: Comparaison entre modèle physique et numérique (Laugier et al. 2010).

Charge amont H m	Ratio H/p	PK-Weir « Type A » modélisé		
		Modèle physique q_s m ³ /s/m	Modèle numérique q_s m ³ /s/m	Ecart %
0.5	0.125	3.5	3.6	+2.9
1.0	0.250	8.2	7.7	-6.1
1.5	0.375	11.5	12.5	-8.3
2.0	0.500	15.6	14.9	-4.5
4.0	1.000	28.7	28.3	-1.4

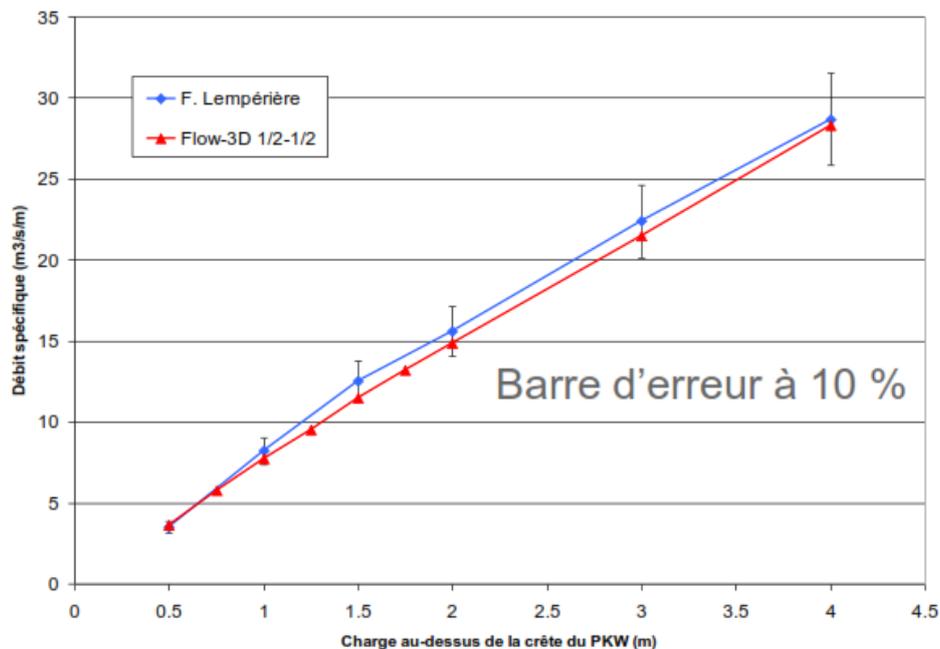


Figure 1.48: Résultats en débits spécifiques comparés (Flow-3D / Lempérière) (Laugier et al. 2010).

Une analyse de sensibilité a été réalisée par Pralong en 2011 sur la base d'un modèle numérique pour évaluer les optima de plusieurs paramètres géométriques de PK-Weir.

Tout d'abord, pour évaluer la sensibilité de la largeur des alvéoles « W_i/W_o » sur la capacité d'évacuation du PK-Weir. Pour se faire, sept valeurs du rapport de la largeur relative des alvéoles ont été étudiés ($W_i/W_o=0.54, 0.82, 1, 1.25, 1.50, 1.75$ et 2).

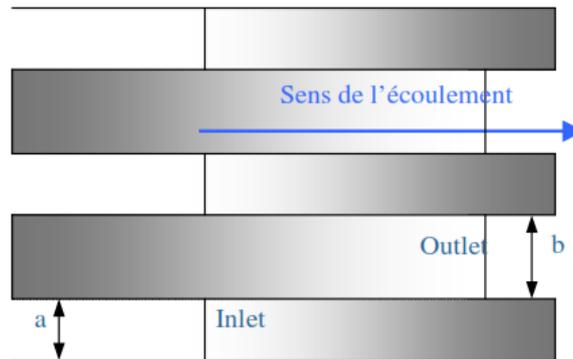


Figure 1.49: Variation du rapport de la largeur inlet/outlet (Pralong et al., 2011).

Les résultats obtenus ont été représentés sous forme graphique (Figure 1.50). Cette étude montre l'optimum se situe autour de la valeur de $W_i/W_o = 1.5$.

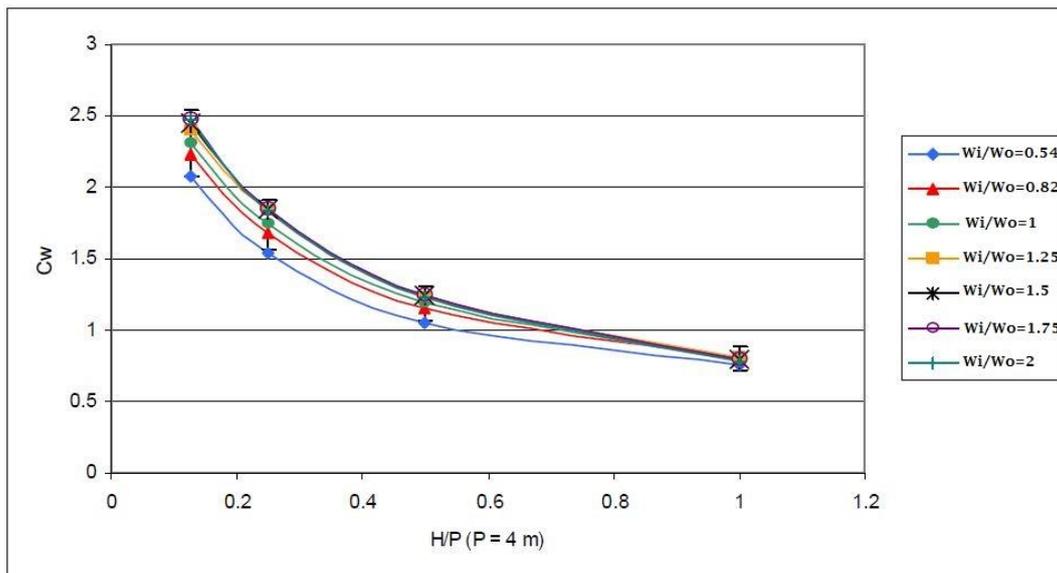


Figure 1.50: Coefficient de débit en fonction de rapport W_i/W_o (Pralong et al., 2011).

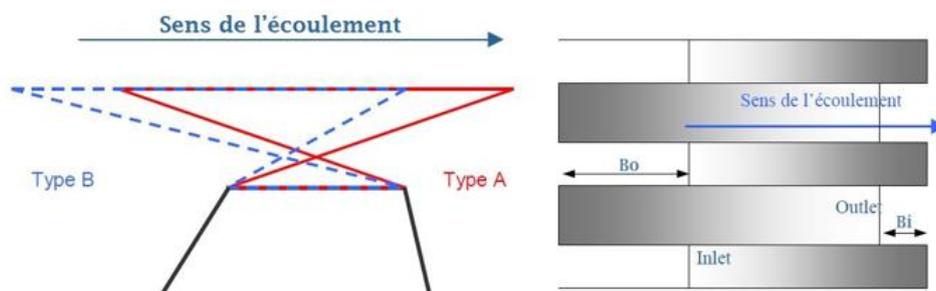


Figure 1.51: Variation de la section transversale du PK-Weir (Pralong et al., 2011).

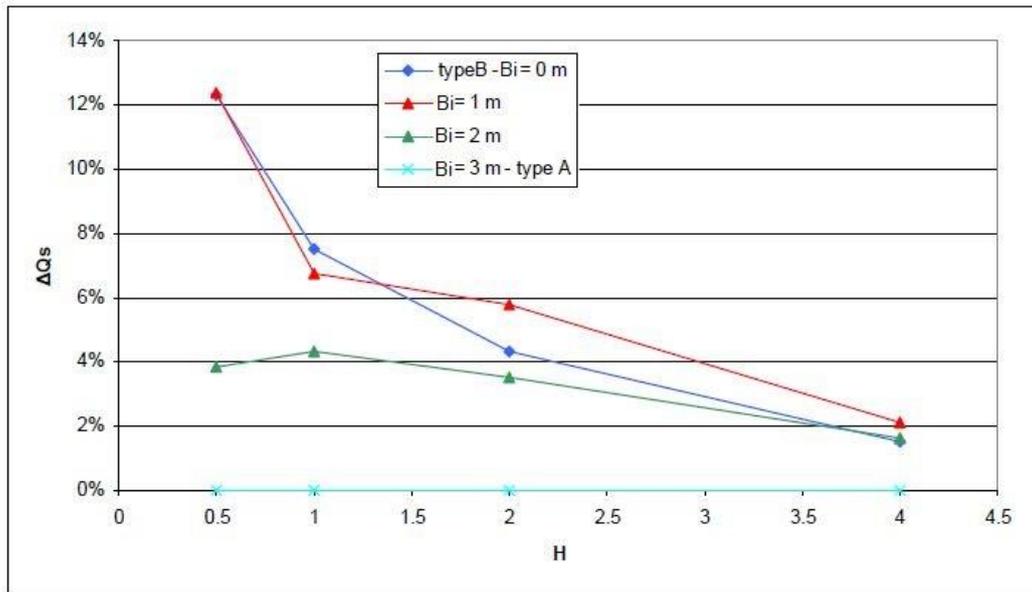


Figure 1.52: Débit spécifique en fonction de longueur du porte-à-faux (Pralong et al., 2011).

La longueur des porte-à-faux joue un rôle très important dans l'équilibre du PK-Weir. Dans ce cadre une étude a été réalisée par Pralong en 2011 qui avait concerné l'influence du rapport de la longueur des porte-à-faux sur la capacité d'évacuation (Figure 1.52).

Cette étude a montré que le prolongement du porte-à-faux en amont peut être intéressante pour améliorer la capacité d'évacuation. De ce fait la configuration 'B' semble préférable, notamment pour les faibles charges.

Les rehausses sont des murs verticaux placés sur la crête du PK-Weir. On peut l'installer le long de la crête ou seulement sur un porte-à-faux (outlet ou inlet). Des essais ont été réalisés pour définir le meilleur emplacement de rehausse afin d'augmenter la capacité d'évacuation. Les hauteurs de rehausse $P_p = 0.5, 1$ et 2 m ont été testés sur PK-Weir type A (Ouamane et Lempérière, 2003).

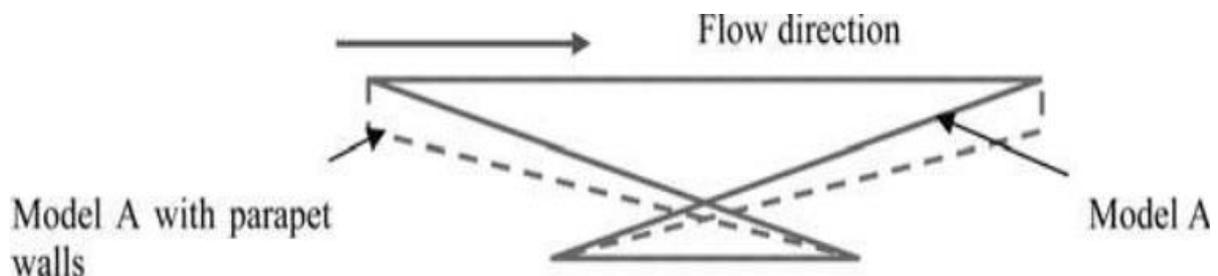
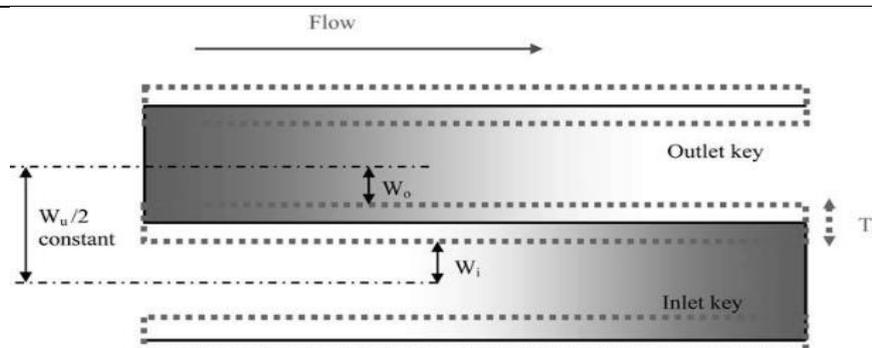


Figure 1.53: Section transversale - Mise en œuvre des réhausses (Pralong et al., 2011).

Tableau 1.7: Gain en débit spécifique comparé au PK-Weir modèle A (Pralong et al., 2011).

Charge amont H m	Inlet			Outlet		
	Pp=0.5 m %	Pp= 1 m %	Pp= 2 m %	Pp=0.5 m %	Pp= 1 m %	Pp= 2 m %
0.5	+2.1	-2.2	-11.6	+22.0	+30.7	+46.6
1.0	-2.1	-5.0	-18.9	+8.7	+8.8	+22.1
2.0	-2.5	-6.3	-13.8	+7.1	+10.3	+5.9
4.0	+6.7	-4.3	-22.0	+3.7	+7.6	+7.1

Figure 1.54: Schéma d'épaisseur du voile T_s (Laugier et al., 2011).

Les simulations ont permis de calculer les débits séparément sur l'inlet et l'outlet. Les résultats obtenus, montrent que les rehausses sont intéressantes en amont de l'outlet où elles conduisent à une augmentation du volume de l'outlet qui réduit les effets de submersion (tableau 1.7). Cependant, la rehausse en aval de l'inlet perturbe l'écoulement et réduit la capacité d'évacuation. Pour vérifier l'effet de l'épaisseur des voiles sur la performance hydraulique du PK-Weir, une gamme d'épaisseur du voile de 10 à 50 cm a été testée sur le PK-Weir type 'A' (Une configuration de référence (Lempérière & Ouamane, 2003) en gardant la largeur de l'unité de PK-Weir W_u constante et le rapport $W_i/W_0 = 1$ (Figure 1.55). L'épaisseur de la paroi latérale est également augmentée par pas de 10 cm dans les deux alvéoles d'entrée et de sortie.

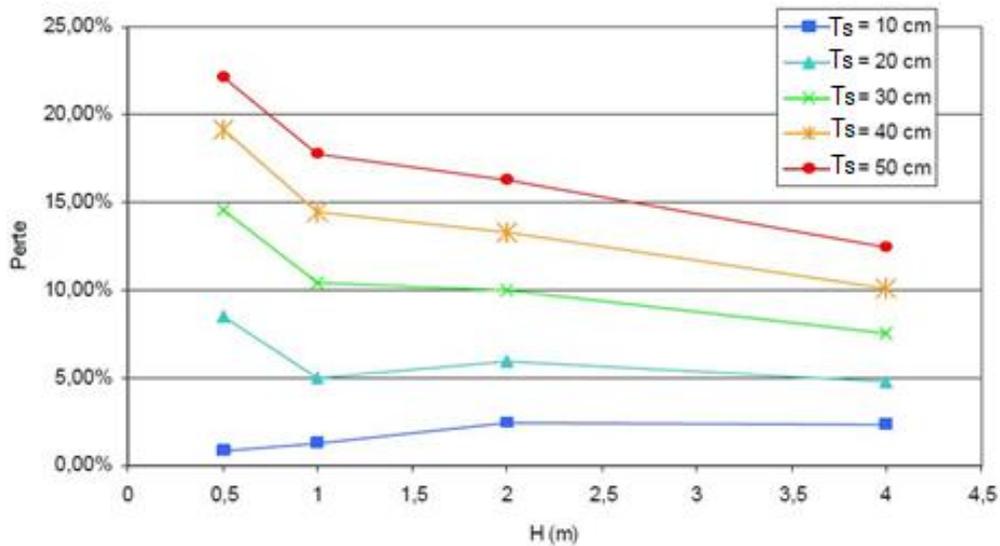


Figure 1.55: Perte de capacité de la décharge par rapport à l'épaisseur du voile (Laugier et al., 2011).

Cette étude a montré que par rapport à un voile infiniment fin, l'élargissement du voile jusqu'à 50 cm conduit à perdre jusqu'à 20 % en débitance spécifique. Ainsi, on peut améliorer la capacité d'évacuation de manière significative par la réduction de l'épaisseur des parois latérales du PK-Weir. (Laugier et al., 2011).

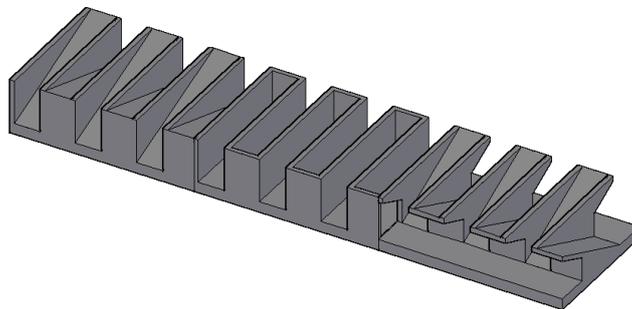


Figure 1.56: Vue 3D de PK-Weir Type D, labyrinthe rectangulaire et déversoirs PK-Weir Type A (Ho Ta Khanh et al. 2012).

Ho Ta Khanh et al. (2012) ont testé trois types de déversoirs dans des conditions d'écoulement submergés. Une large gamme de cas d'écoulements submergés a été modélisée afin de quantifier l'efficacité hydraulique de chaque type de déversoir lorsqu'il est placé directement sur le lit de la rivière.

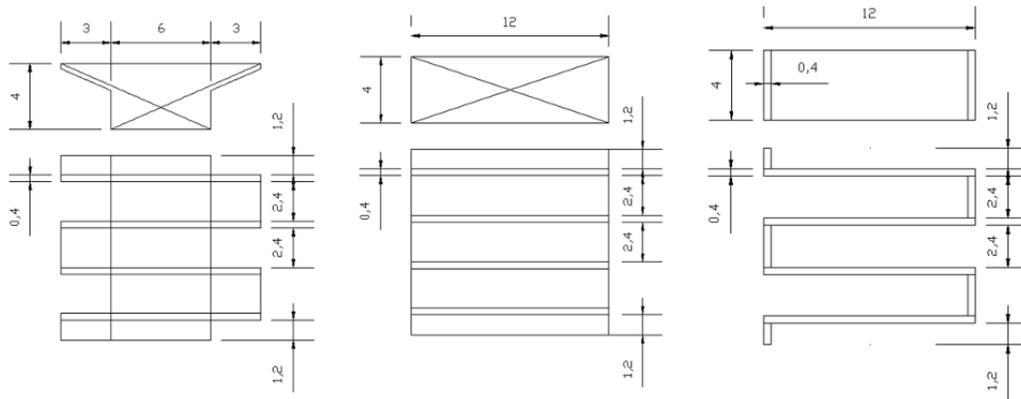


Figure 1.57: De gauche à droite : PK-Weir de type A, PK-Weir type D et labyrinthe rectangulaire (Ho Ta Khanh et al. 2012).

En ce qui concerne la sensibilité à la submersion de chaque structure, les résultats de la comparaison ont été représentés graphiquement (Figure 1.58).

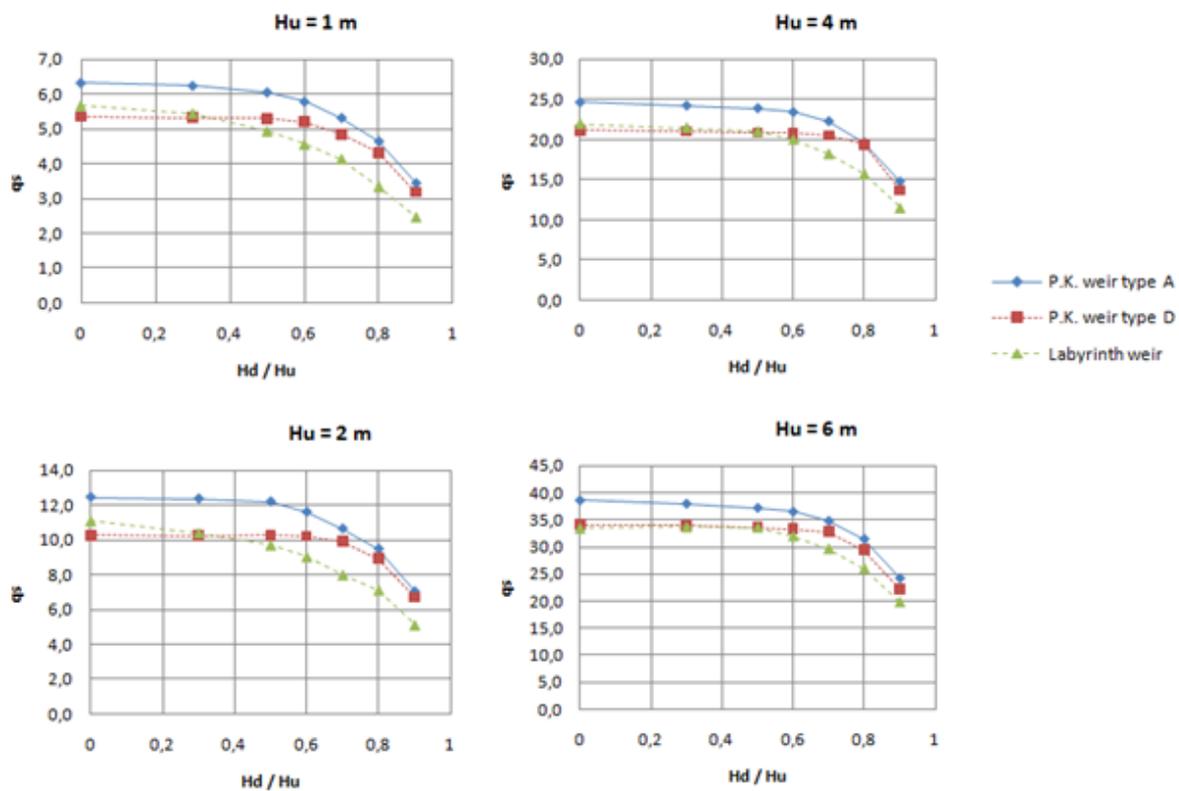


Figure 1.58: Comparaison entre les courbes d'évaluation : q_s (en $m^3/s.m$) en fonction des charges amont H_d/H_u (Ho Ta Khanh et al. 2012).

Les graphes de la figure ci-dessus montrent que, quelle que soit la charge amont modélisée, les courbes des trois types de déversoirs se comportent de la même manière. Malgré sa sensibilité relative à l'effet de la submersion, le PK-Weir de type A devrait être préféré lorsque des conditions d'écoulement libre sont attendues. Lorsque l'écoulement devient submergé, le PK-

Weir de type D peut représenter une alternative intéressante en raison de sa faible sensibilité à la submersion.

Athmani et Ouamane, (2014) ont présenté une étude numérique pour vérifier l'effet du paramètre adimensionnel W_i/W_o sur le rendement du déversoir en touche de piano (PK-Weir), quatre modèles numériques ont été testés ($W_i/W_o = 1, 1.2, 1.4$ et 1.5).

Les caractéristiques géométriques des modèles de PK-Weir sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 1.8: Caractéristiques géométriques du modèle réduit (Athmani et al., 2014).

n°	n	W [cm]	W _u [cm]	W _i [cm]	W _o [cm]	B [cm]	B _o [cm]	B _i [cm]	P [cm]	$\frac{W_i}{W_o}$	$\frac{B_o}{B_i}$
1	6	101.4	16.9	8.25	8.25	43.33	10	10	15	1	1
2	6	101.4	16.9	9	7.5	43.33	10	10	15	1.2	1
3	6	101.4	16.9	9.86	7.04	43.33	10	10	15	1.4	1
4	6	101.4	16.9	9.9	6.6	43.33	10	10	15	1.5	1

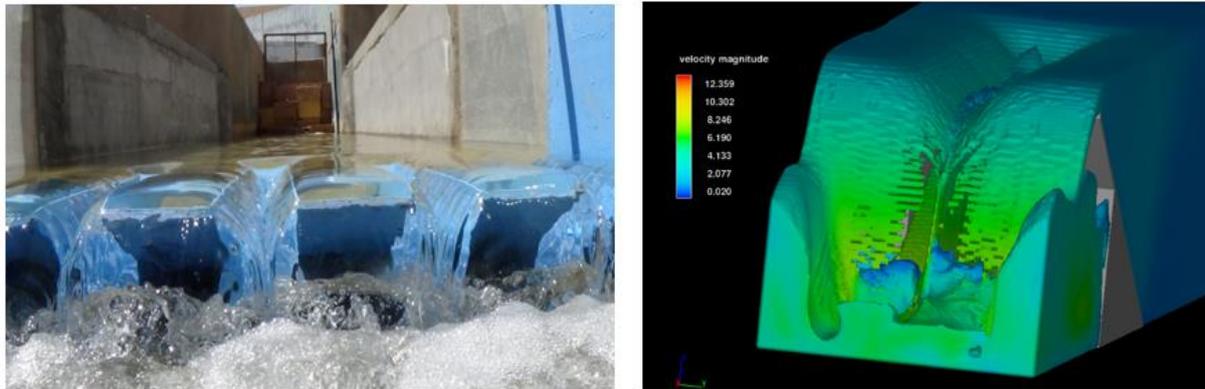


Figure 1.59: Exemple du résultat du modèle numérique et expérimental (Athmani et al., 2014)

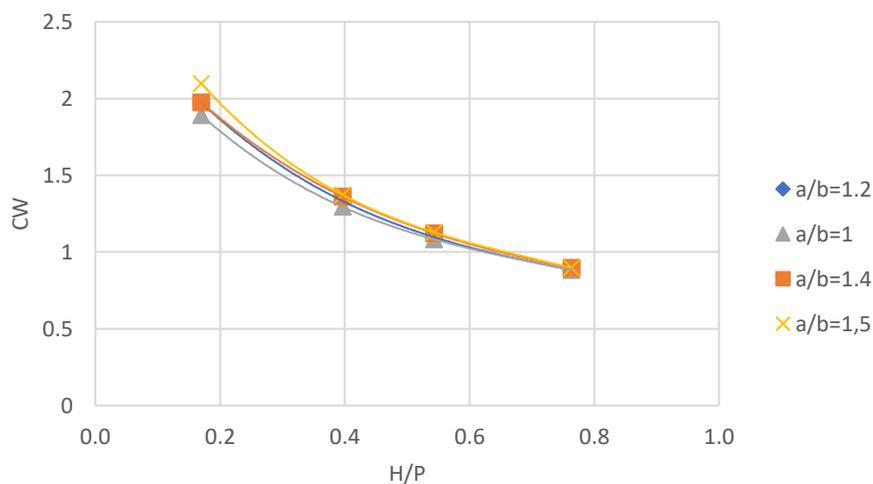


Figure 1.60: Coefficient de débit en fonction de la charge relative (Athmani et al., 2014).

L'analyse des résultats obtenus sur les quatre modèles numériques a montré que la largeur des alvéoles la plus efficace correspond à une largeur de l'alvéole amont égale à 1,5 fois la largeur de l'alvéole aval (Figure 1.60). Ceci peut être intéressant de point de vue pratique et économique puisque le volume de béton reste le même et les modifications ne concernent que la disposition des murs latéraux.

Les travaux de recherche d'Oertel (2015) ont permis au Laboratoire hydraulique de l'Université des sciences appliquées de Lübeck, de comparer les résultats de modèles expérimentaux et numériques. Pour ce faire, trois configurations du PK-Weir ont été testé (Figure 1.61). Et la figure 1.62 donne plus de détails et un exemple de résultat d'une simulation numérique.

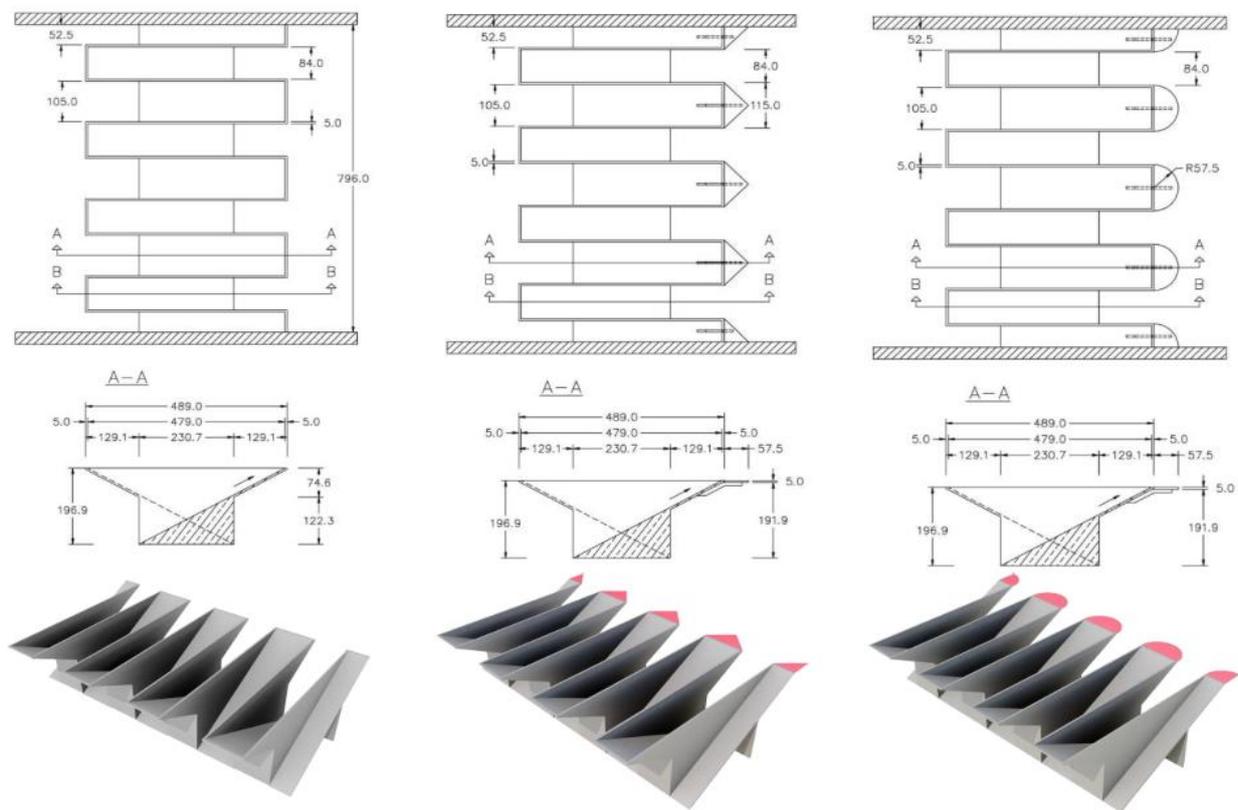


Figure 1.61: Schéma et dimensions du modèle physique du PK-Weir (à gauche : PK-Weir 1 normale, au milieu : avec extension triangulaire PK-Weir 2, à droite : avec extension du demi-cercle PK-Weir 3), sens d'écoulement de gauche à droite (Oertel et al., 2015)

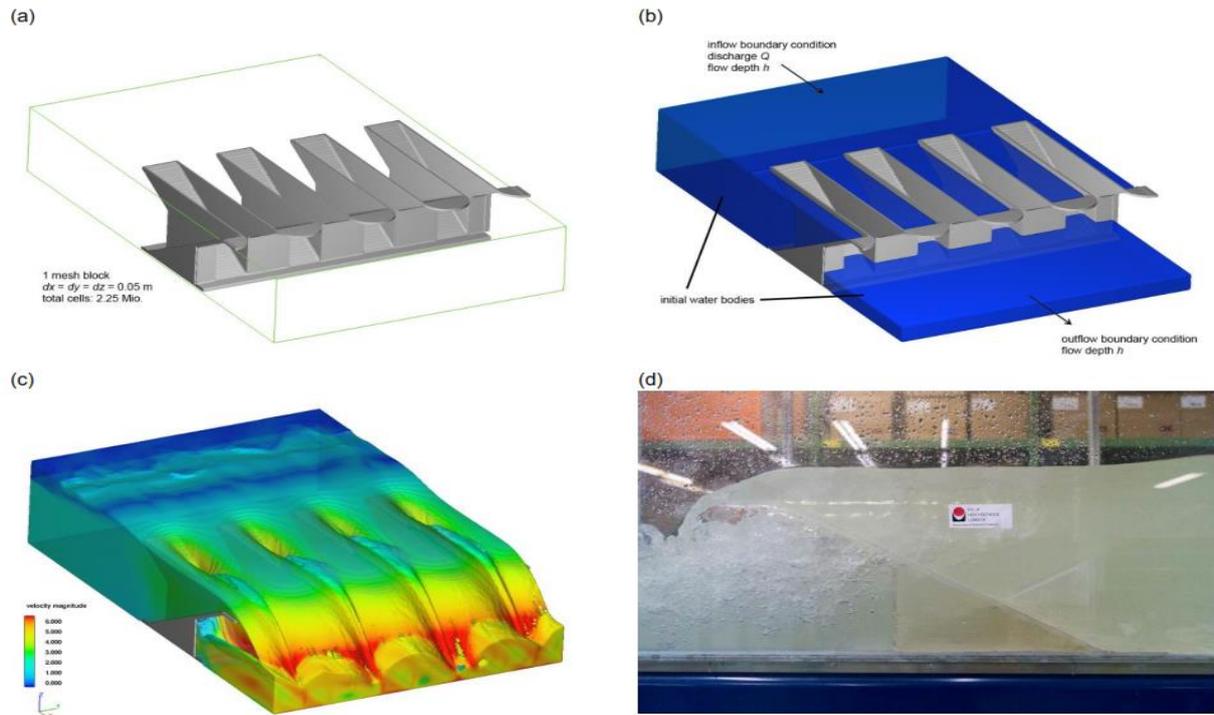


Figure 1.62: Exemples du modèle numérique et expérimental pour PK-Weir 3, (a) fichier de géométrie STL, (b) conditions aux limites, (c) vitesses d'écoulement (modèle numérique), (d) Les limites de la surface d'eau (modèle expérimentale) (Oertel et al., 2015)

La figure suivante représente les coefficients de débit pour le modèle expérimental réalisé par Anderson et Tullis (2012) et les coefficients de débit obtenu des modèles numériques.

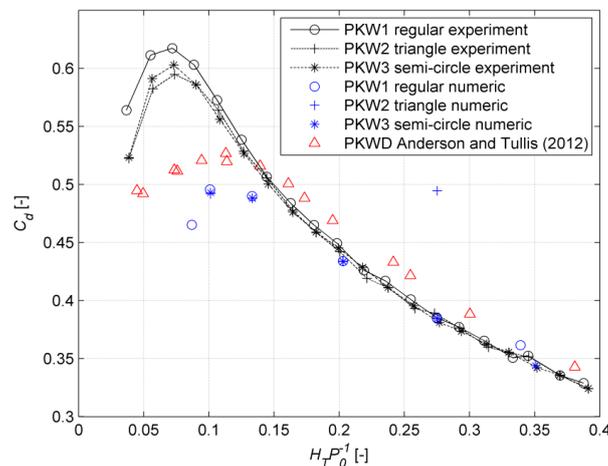


Figure 1.63: Coefficients de débits des modèles expérimentaux et numériques (Oertel et al., 2015)

Les essais effectués sur les trois configurations montrent que le modèle numérique CFD est capable de reproduire avec précision les profondeurs d'écoulement du modèle expérimental.

La comparaison des coefficients de débit de différents types de PK-Weir (sans et avec extension, PKW1, PKW2 et PKW3), montre que l'influence de la forme de l'extension (triangle ou demi-cercle) peut être négligeable.

Safarzadeh et al. (2016) ont testé trois formes de déversoir de type non rectiligne (RL : Déversoir en labyrinthe, PK : PK-Weir rectangulaires et TPK : PK-Weir trapézoïdales).

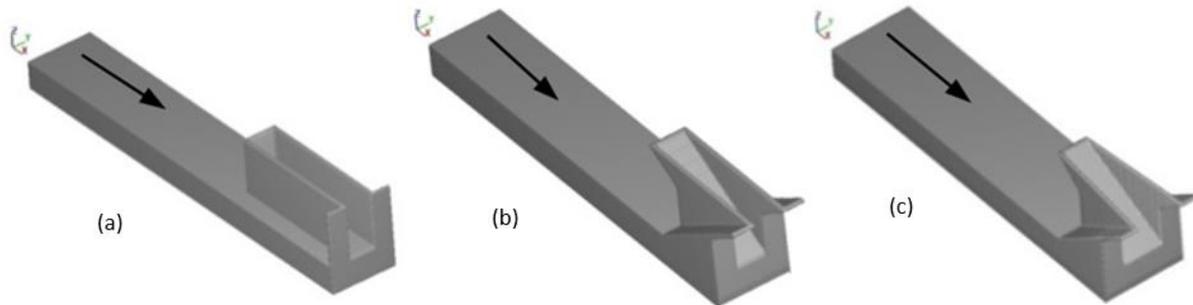


Figure 1.64: Déversoirs non linéaires à un cycle. A : RL, b : PK, c : TPK (Safarzadeh et al. 2016)

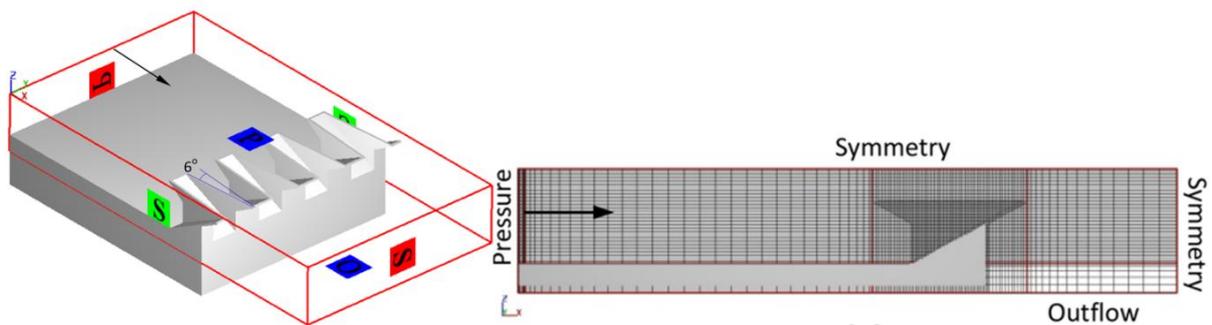


Figure 1.65: Bloc du maillage cartésien non uniforme et conditions aux limites (Safarzadeh et al. 2016)

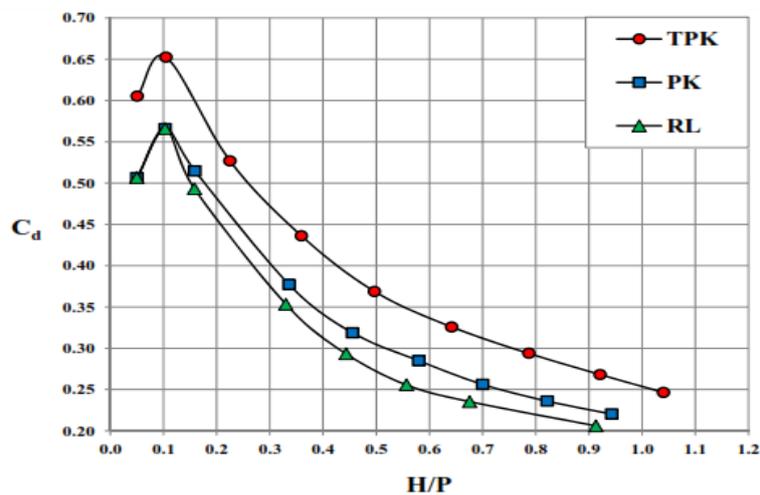


Figure 1.66: Comparaison du coefficient de débit des déversoirs en TPK, PK et RL (Safarzadeh et al. 2016)

La figure 1.66 montre que la performance hydraulique du TPK est supérieure à celle des deux autres types. Pour les faibles charges, les déversoirs en labyrinthe et PK-Weir rectangulaires ont une même capacité d'évacuation, Lorsque l'angle de la crête latérale est modifié, le coefficient de débit du déversoir PK augmente considérablement. En général, le seuil de TPK est plus efficace à 23 et 18% que les déversoirs RL et PK, respectivement.

Bremer et al. (2017) ont étudié l'influence de l'épaisseur de la paroi sur les coefficients de débit du Piano Key Weir. L'épaisseur de la paroi des PK-Weirs étudiés varie de $T_s = 0,05$ m à 0,20 m. Par conséquent, le PKW0.05 a une épaisseur de paroi de $T_s = 0,05$ m, PKW 0,10 a une épaisseur de paroi de $T_s = 0,10$ m et PKW 0.20 a une épaisseur de paroi de $T_s = 0,20$ m. Pour ce faire, vingt-quatre simulations ont été effectuées. Pour les trois géométries de PK-Weir données, huit débits $Q = 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60$ m³/s ont été testés.

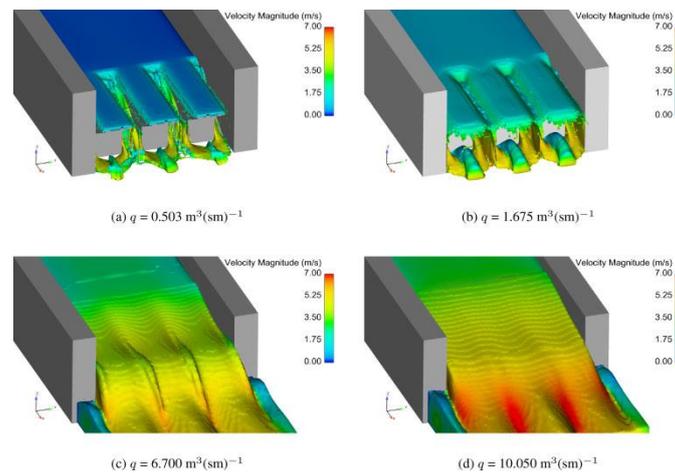


Figure 1.67: Schémas tridimensionnels de PKW 0.05 pour divers débits (Bremer et al., 2017).

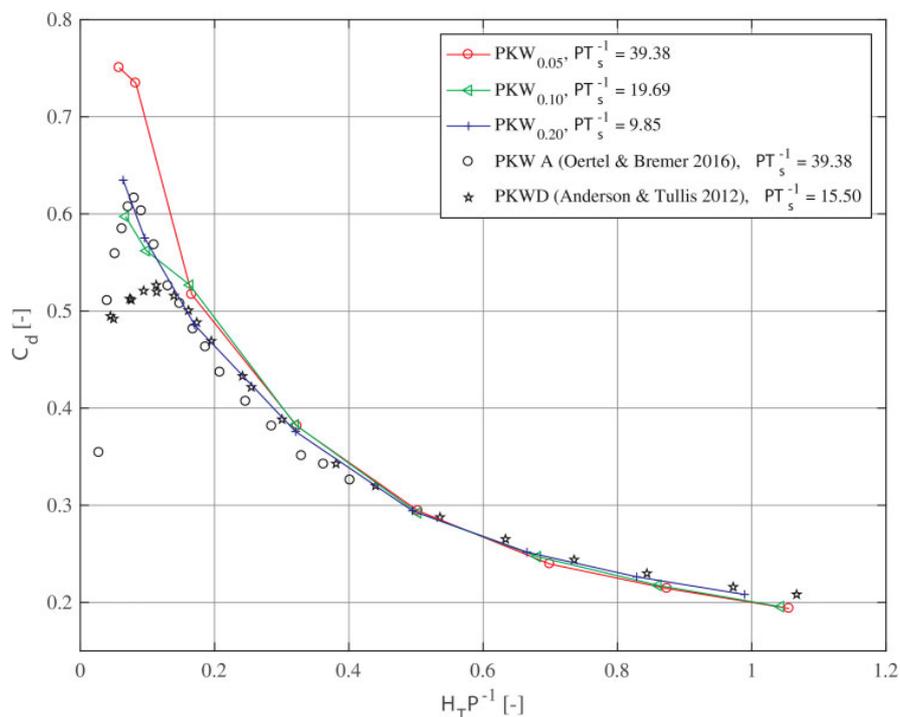


Figure 1.68: Coefficient de débit C_d (Bremer et al., 2017).

Le PK-Weir PKW0.05 (avec des parois latérales très minces) est 40% plus efficace pour les petites décharges que le PK-Weir avec des parois latérales quatre fois plus épaisses. Avec les résultats obtenus, on peut estimer que la conception structurelle de l'épaisseur de paroi du PK-

Weir a un impact majeur sur la performance hydraulique résultante. L'épaisseur de la paroi n'est pas seulement un facteur déterminant de l'efficacité, elle est également responsable de la stabilité de la structure. En ce qui concerne la performance hydraulique, une paroi latérale mince donne des résultats optimaux. Du point de vue structurel, des murs plus épais peuvent augmenter la stabilité de la structure. Par conséquent, les aspects de conception doivent prendre en compte à la fois l'aspect de la performance hydraulique et celui de la stabilité de la structure.

Han Hu et al. (2018) ont étudié la répartition des débits sur la crête du PK-Weir (inlet/outlet/voile) pour différentes charges amont. Le tableau 1.9 résume le débit déversé par chaque partie de la crête du PK-Weir, basée sur un modèle numérique.

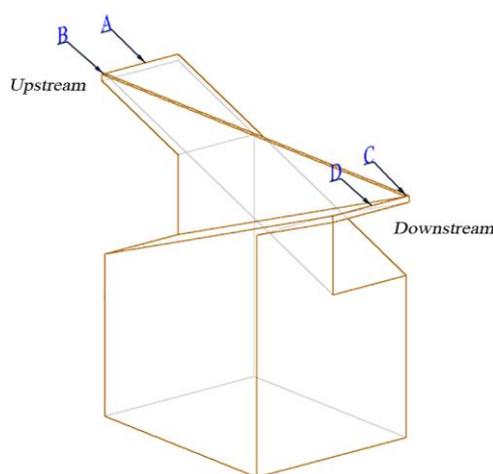


Figure 1.69: Crête du PK-Weir scindée en trois parties selon la disposition des parois (Han Hu et al., 2018).

Tableau 1.9: Répartition des débits le long du crête d'un élément du PK-Weir (Han Hu et al., 2018).

Charge amont	Débit de AB	Débit de BC	Débit de CD
H (m)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
0.5	0.71 (8.47%)	6.89 (82.00%)	0.80 (9.53%)
1.00	2.07 (10.53%)	15.60 (79.25%)	2.01 (10.22%)
2.00	5.58 (14.90%)	26.45 (70.64%)	5.42 (14.46%)
3.00	10.57 (19.66%)	34.06 (63.36%)	9.13 (16.98%)
4.00	17.57 (25.51%)	36.58 (53.10%)	14.73 (21.39%)

Les résultats de la simulation numérique pour les différentes charges amont indiquent que :

Le débit spécifique au niveau de l'alvéole de sortie (crête AB) est le plus élevé, ce qui correspond approximativement au débit d'un déversoir à paroi mince.

Le débit spécifique au niveau de la crête du mur latéral (BC) est inférieur à celui du débit en amont (AB), ceci est dû aux facteurs suivants :

- Changement de direction d'écoulement de la crête latérale.
- La vitesse d'écoulement longitudinal le long des alvéoles d'entrée.
- Régime d'écoulement submergé dans les alvéoles de sortie.
- Les pertes de charge le long des alvéoles d'entrée.

Le débit spécifique au niveau de la crête en aval (CD) est également inférieur à celui au niveau de la crête en amont (AB) en raison de la perte de charge le long de l'alvéole d'entrée.

1.3.4 Application de la modélisation 3D à des ouvrages existants

1.3.4.1 Barrage de Malarce

Le barrage de Malarce se situe sur la rivière Chassezac. Il est de type « poids » et a été construit de 1966 à 1968. Sa mise en eau a été réalisée de manière progressive en mars et avril 1968. Avec les changements des données hydrologiques, le barrage nécessite un redimensionnement de l'évacuateur de crues pour une amélioration permanente de la sûreté et de la sécurité.



Figure 1.70: Barrage Malarce (EDF, 2013)

Des travaux importants ont été menés sur modèle physique et numérique du barrage de Malarce, Laugier et al. (2010). Ces travaux visent à modéliser l'évacuateur de crues complémentaire de type touches de piano (PK-Weir) afin d'atteindre une capacité d'évacuation supérieure.

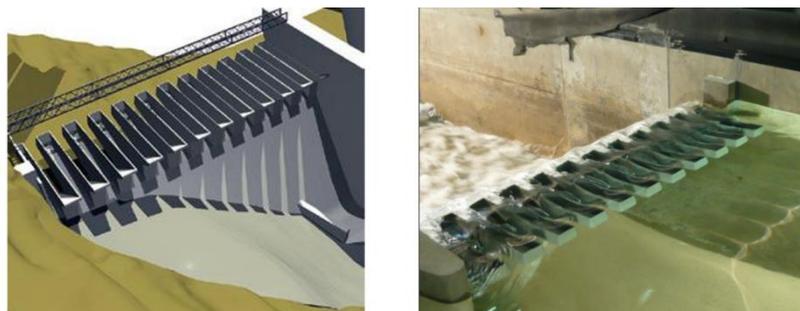


Figure 1.71: Modélisation 3D et modèle réduit du PK-Weir de Malarce (Laugier et al. 2010).



Figure 1.72: Modèle réduit du barrage Malarce (EDF, 2011-2012)

La courbe de capacité d'évacuation a été comparées à celle obtenue sur modèle réduit au Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement d'EDF à Chatou pour le PK-Weir du barrage de Malarce. Les résultats numériques semblent cohérents puisque les écarts en débit sont inférieurs à 5 % en moyenne par rapport aux valeurs du modèle réduit. Cette proximité des résultats est illustrée par la figure suivante.

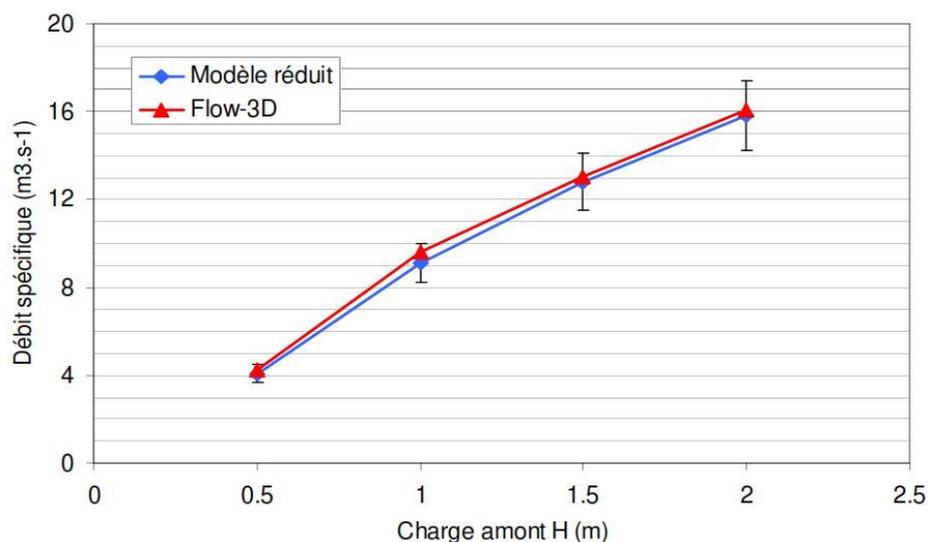


Figure 1.73: Débit spécifique du PK-Weir de Malarce (Laugier et al. 2010).

1.3.4.2 Barrage de Balaroud

L'étude de l'écoulement à travers les structures hydrauliques est généralement réalisée à l'aide d'une modélisation physique (Modèle-prototype). En raison du coût élevé des expériences au laboratoire, les concepteurs des ouvrages hydrauliques ont tenté d'utiliser la simulation numérique pour réduire le coût des études. En utilisant la modélisation numérique par le biais du code Flow-3D, Sadegh et al, (2016) ont étudié la sensibilité de la forme d'entrée immédiate en amont du barrage de Balaroud (Barrage en terre situé au sud-ouest de l'Iran).

Le but de ce travail était de trouver une forme optimale pour les parois des guideaux. Pour ce faire, trois configurations ont été proposées (Figure 1.75).



Figure 1.74: Modèle réduit du barrage Balaroud (Sadegh et al., 2016).

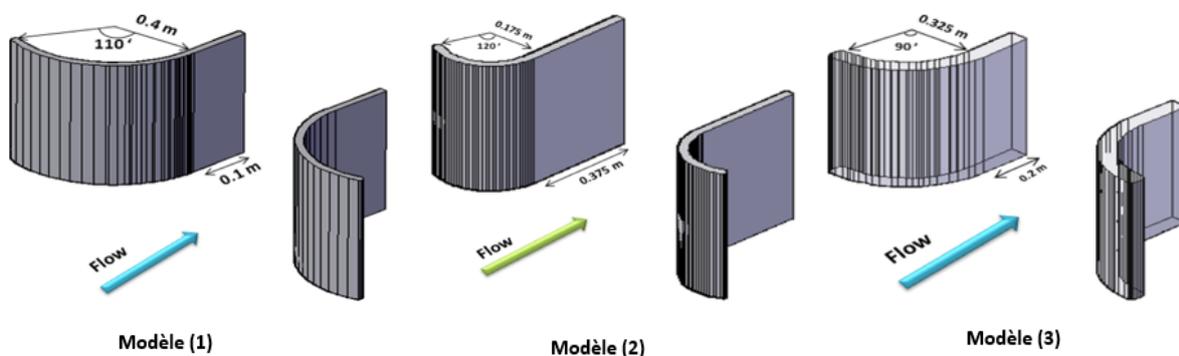


Figure 1.75: Modèles proposés des guideaux du barrage Balaroud (Sadegh et al., 2016).

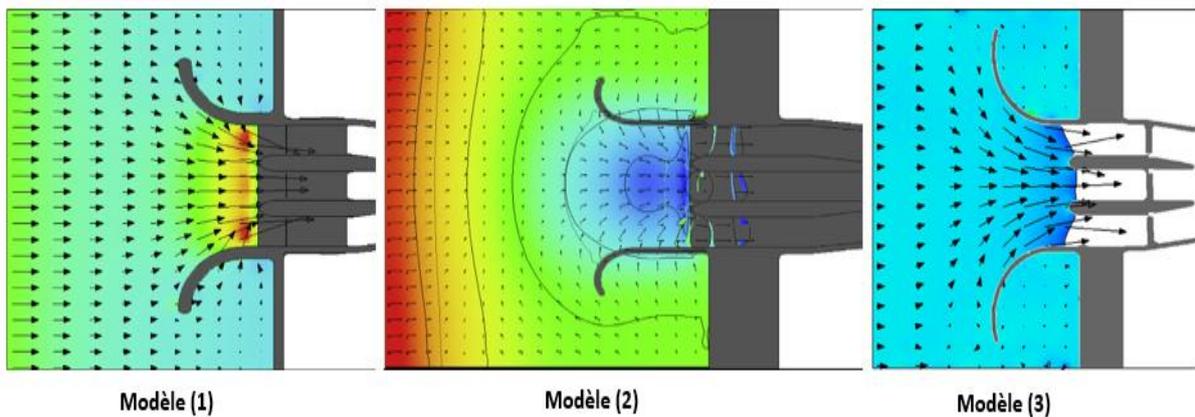


Figure 1.76: Modèle d'écoulement à travers les modèles pour une période de retour de 1000 ans (Sadegh et al., 2016).

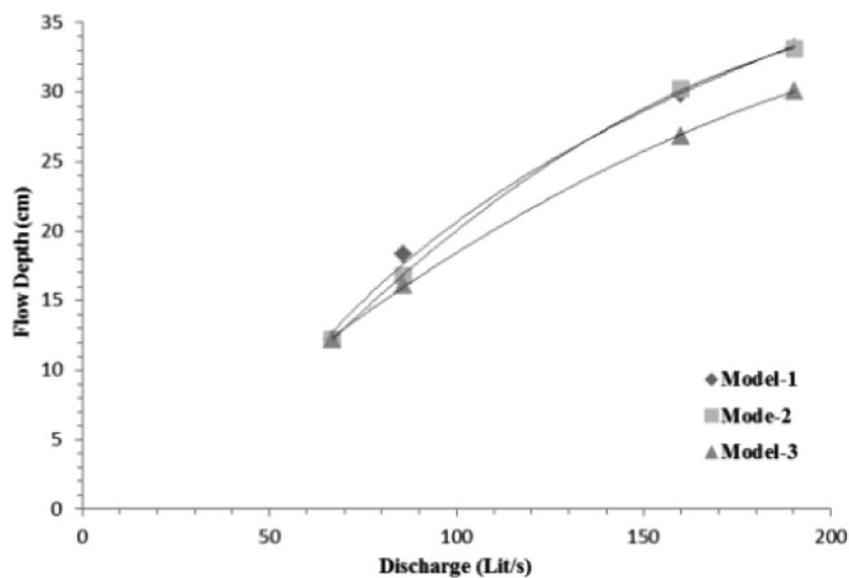


Figure 1.77: Comparaison des débits pour les modèles des guideaux (Sadegh et al., 2016).

La comparaison de ces trois modèles montre que le mode (3) est plus efficace que les autres. Globalement, cette étude a montré que la conception de l'évacuateur de crues avec les guideaux optimale conduit à augmenter la performance hydraulique du déversoir.

1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire un inventaire bibliographique des phénomènes physiques, des modes d'écoulement et des travaux de recherche effectués pour l'étude du comportement hydraulique des différents types de déversoirs et en particulier, le déversoir en touches de piano.

Les travaux expérimentaux et de modélisation qui ont été consacrés à l'étude d'écoulements sur les différents types de déversoirs montrent bien que le déversoir en touches de piano se caractérise par une forme de crête non rectiligne permettant d'augmenter la longueur du seuil

d'une manière significative pour une largeur donnée. Par conséquent, la capacité d'évacuation augmente proportionnellement avec l'augmentation de la longueur du seuil. Cette configuration du seuil non rectiligne engendre un écoulement différent de celui d'un déversoir rectiligne. Ces travaux soulignent également les effets des paramètres géométriques sur le comportement hydraulique. (Crookston et al.), (Akbar Safarzadeh et al.), (Blancher et al.) ont comparé plusieurs types de déversoirs, ils ont montré bien que le déversoir en touches de piano se caractérise par un meilleur rendement. (Ho Ta khan et al.) a étudié le comportement des trois types de déversoirs non rectiligne (Labyrinthe, PKW type D et PKW type A) dans des conditions d'écoulement noyé par l'aval, il a montré que le PKW type A est le plus efficace des conditions d'écoulement libre par contre le PKW type D peut représenter une alternative intéressante en raison de sa faible sensibilité à la submersion.

La question de la définition de l'optimum entre deux paramètres géométriques du PK-Weir, a été très peu abordée. De nombreux auteurs ont plutôt axé leur réflexion sur l'optimisation de chaque paramètre individuellement. Ces constats nous ont poussés à réaliser une expérience d'optimisation des paramètres géométriques dont l'objectif d'améliorer la capacité d'évacuation et de réduire la charge d'écoulement sur ce type de déversoir. Nous nous sommes concentrés sur une combinaison des aspects géométrique du PK-Weir pour définir la forme optimale.

Chapitre 2

Théorie de base du code Flow-3D appliquée à la modélisation de l'écoulement à surface libre

Sommaire

2.1	Introduction	56
2.2	Equations fondamentales	56
2.2.1	Equation de conservation de la masse (équation de continuité).....	57
2.2.2	Equation de la quantité de mouvement :	58
2.3	Modélisation de la surface libre	59
2.3.1	La méthode VOF	59
2.4	Conclusion	61

2.1 Introduction

Flow-3D[®] est un logiciel de CFD (computational fluid dynamics). Il utilise des techniques numériques spécialement développées pour résoudre les équations du mouvement des fluides afin d'obtenir des solutions en trois dimensions à des problèmes de mécanique des fluides. Un éventail d'options physiques et numériques permet aux utilisateurs d'appliquer Flow-3D[®] à une grande variété de phénomènes d'écoulement de fluide. Nous avons utilisé les équations qui correspondent aux besoins de notre problème contenu dans le logiciel Flow-3D[®]. L'utilisation de ces équations est démontrée dans les documents accompagnant le logiciel notamment le guide d'utilisateur (Flow-3D v10-User-Manual)

2.2 Equations fondamentales

Les équations de base de la mécanique des fluides sont les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité. Elles sont issues d'un bilan des forces et des masses effectuées sur un volume élémentaire du fluide de volume $dx dy dz$ représenté sur la figure 2.1. Les équations différentielles à résoudre sont écrites en termes de coordonnées cartésiennes (x, y, z). Pour les coordonnées cylindriques (r, θ, z), la coordonnée x est interprétée comme la direction radiale, la coordonnée y est transformée en coordonnée azimutale, θ et z étant la coordonnée axiale. Pour la coordonnée cylindrique, des termes supplémentaires doivent être ajoutés aux équations de mouvement cartésiennes. Ces termes sont inclus avec un coefficient ξ , tel que $\xi = 0$ correspond à la coordonnée cartésienne, tandis que $\xi = 1$ correspond à la coordonnée cylindrique.

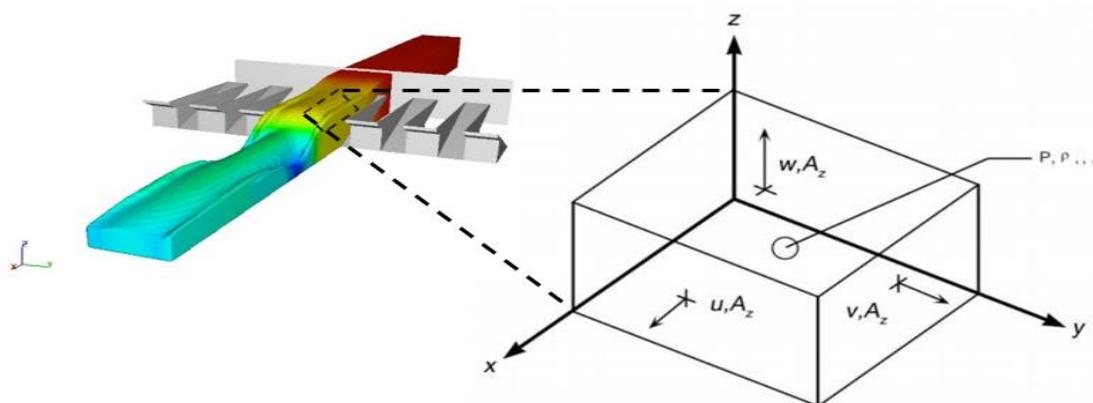


Figure 2.1: Volume élémentaire de fluide

2.2.1 Equation de conservation de la masse (équation de continuité)

La variation de la masse dans un volume élémentaire de fluide pendant un temps dt s'exprime comme suit :

$$dm = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt \quad (2.1)$$

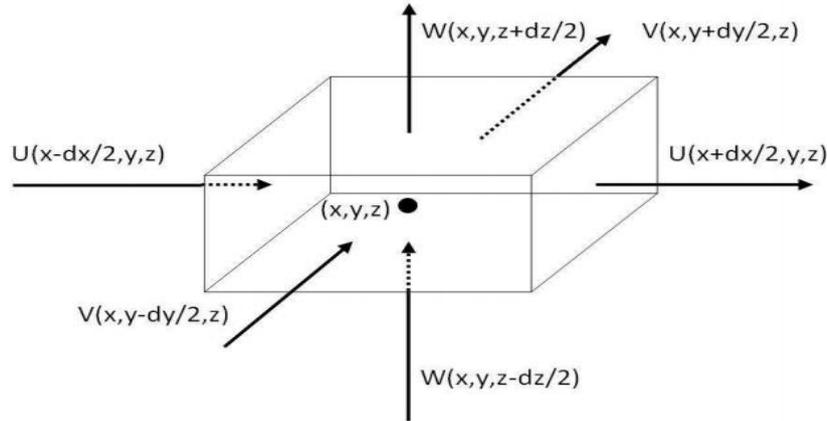


Figure 2 -2: Bilan des flux sur un volume élémentaire de fluide.

L'équation générale de continuité utilisée dans Flow-3D® est la suivante :

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2.2)$$

Où :

- V_F : Fraction volumique
- ρ : Densité du fluide
- R_{DIF} : Terme de diffusion turbulente
- R_{SOR} : Source de masse

Les composantes de la vitesse (u, v, w) sont dans les directions des coordonnées (x, y, z) ou (r, θ, z). A_x est l'aire fractionnaire ouverte à l'écoulement dans la direction x , A_y et A_z sont des fractions d'aire similaires pour l'écoulement dans les directions y et z , respectivement. Le coefficient R dépend du choix du système de coordonnées de la manière suivante. Lorsque des coordonnées cylindriques sont utilisées, les dérivés y doivent être convertis en dérivés azimutaux,

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (2.3)$$

Cette transformation est accomplie en utilisant la forme équivalente

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{r_m}{r} \frac{\partial}{\partial y} \quad (2.4)$$

Où $y = r_m \theta$ et r_m est un rayon de référence fixe. La transformation donnée par équation (2.4) est particulièrement pratique car sa mise en œuvre ne nécessite que le multiplicateur $R = r_m / r$ sur chaque dérivée y dans les équations de coordonnées cartésiennes d'origine. Lorsque des coordonnées cartésiennes doivent être utilisées, $R=1$ et $\xi=0$.

Le premier terme à droite de l'équation (2.5), est un terme de diffusion turbulente,

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y R \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} \quad (2.5)$$

Où le coefficient v_ρ est égal à $c_p \mu / \rho$, où μ est le coefficient de diffusion (c'est-à-dire la viscosité) et c_p est une constante dont la réciproque est habituellement appelée nombre de Schmidt turbulent.

Le dernier terme, R_{SOR} , du côté droit de l'équation. (2.6) est un terme source de densité qui peut être utilisé.

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (2.6)$$

2.2.2 Equation de la quantité de mouvement :

Les équations de mouvement pour les composantes de la vitesse du fluide (u, v, w) dans les trois directions de coordonnées sont les équations de Navier-Stokes avec quelques termes supplémentaires.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_x v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dans ces équations, (G_x, G_y, G_z) sont des accélérations de la pesanteur, (f_x, f_y, f_z) sont des accélérations de la viscosité, (b_x, b_y, b_z) sont des pertes de débit dans des milieux poreux ou à travers des déflecteurs poreux.

Pour une viscosité dynamique variable μ , les accélérations de la viscosité sont :

$$\begin{aligned}
\rho V_F f_x &= - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \\
\rho V_F f_y &= - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \\
\rho V_F f_z &= - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Où

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\
\tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\
\tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

2.3 Modélisation de la surface libre

Dans le code Flow-3D, les surfaces libres sont modélisées avec la technique Volume de Fluide (VOF), qui a été décrit pour la première fois par Nichols et Hirt (1975), et plus complètement par Hirt et Nichols (1981). La méthode VOF comprend trois ingrédients : un schéma pour localiser la surface, un algorithme pour suivre la surface en tant qu'interface nette se déplaçant dans une grille de calcul et un moyen d'appliquer des conditions aux limites à la surface.

2.3.1 La méthode VOF

La méthode VOF utilise une fonction basée sur le taux de remplissage F d'un fluide dans chaque volume de contrôle. La valeur du taux de remplissage varie entre 0 et 1, dans lequel, une valeur 1 ou 0 de F indique que le volume de contrôle contient un des deux fluides (Exemple : air et

eau), tandis que les volumes contenant les deux fluides (Surface libre), les valeurs de F sont compris entre 0 et 1. La fonction F est définie comme suit :

$$F = \frac{V_{water}}{V_{cell}}$$

Où :

V_w : Le volume de fluide à l'intérieur d'une cellule.

V_c : Le volume de la cellule.

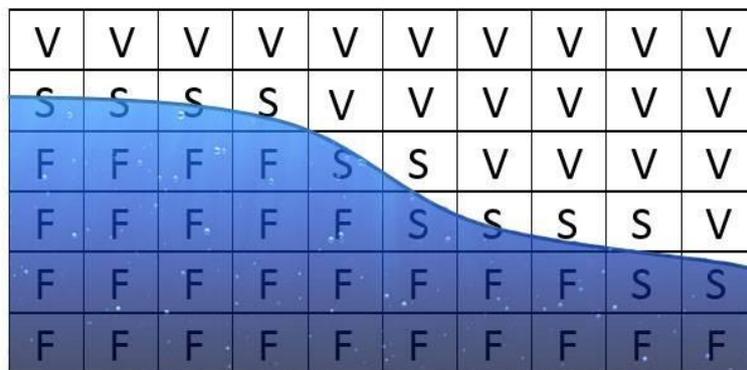


Figure 2-3: Schéma de la méthode VOF

Où :

V: Volumes de contrôle contient du fluide 1

F: Volumes de contrôle contient du fluide 2

S: Volumes de contrôle contient de deux fluides (Surface libre)

L'équation classique de transport s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U \cdot \nabla F = 0 \quad (2.10)$$

Ici U est le vecteur de vitesse (u, v, w)

Selon la définition de la fonction VOF, la densité et la viscosité peut être exprimée en termes de la fonction fractionnaire F :

$$\rho = (1 - F)\rho_a + F\rho_w \quad (2.11)$$

$$\nu = (1 - F)\nu_a + F\nu_w \quad (2.12)$$

Où :

ρ_a et ν_a est la masse volumique et la viscosité de l'air.

ρ_w et ν_w est la masse volumique et la viscosité de l'eau.

2.4 Conclusion

Le présent chapitre est un aperçu général sur le Flow-3D[®]. Ce logiciel résout numériquement les équations décrites dans les sections précédentes en utilisant des approximations en différences finies (ou en volumes finis). Le domaine d'écoulement est subdivisé en un maillage de cellules rectangulaires fixes. A chaque cellule sont associées des valeurs moyennes locales de toutes les variables dépendantes. Comme expliqué ci-avant, toutes les variables sont situées au centre des cellules, à l'exception des vitesses, situées au niveau des faces des cellules. Il utilise aussi un algorithme de volume de fluide (VOF) pour suivre avec précision la surface libre d'écoulement.

Chapitre 3

Optimisation et validation du modèle
numérique

Sommaire

3.1	Introduction	64
3.2	Procédure de simulation	64
3.2.1	Présentation du code de calcul Flow-3D®	64
3.2.2	Reconstruction 3D de la géométrie des PK-Weirs.....	65
3.2.3	Génération du maillage	66
3.2.4	Conditions initiales et aux limites	67
3.3	Optimisation du modèle numérique	68
3.3.1	Test de la largeur	68
3.3.2	Test du maillage	74
3.4	Validation du modèle numérique.....	77
3.4.1	Vue générale du modèle réduit physique	78
3.4.2	Validation des tests de la largeur du PK-Weir avec un seul élément et en maillage mono-bloc.	80
3.4.3	Validation des tests du maillage avec configuration du maillage multi-bloc.....	81
3.5	Conclusion	82

3.1 Introduction

La modélisation numérique a eu pour but de développer un modèle numérique fiable pour prédire les variations de débit et pour analyser et optimiser le comportement de l'écoulement sur le PK-Weir. Les résultats seront validés par comparaison avec une étude expérimentale réalisée sur des modèles physiques de PK-Weir.

Ce chapitre a pour objectif de décrire d'une part la procédure de simulation numérique tridimensionnelle avec le code CFD, et d'autre part l'optimisation et la validation du modèle numérique adopté pour simuler l'écoulement sur le déversoir en touches de piano.

Ainsi, nous nous intéressons à l'élaboration d'un modèle numérique basé sur le code Flow-3D[®] qui permet d'étudier l'écoulement complexe sur un déversoir de type PK-Weir. La modélisation en 3D est réalisée habituellement en plusieurs étapes, nous considérons dans ce travail, deux étapes :

- a- la largeur du modèle (nombre d'élément du PK-Weir),
- b- le type de maillage.

Plan du chapitre : Nous commençons par une brève présentation du logiciel Flow-3D[®] dans la section [3.1](#). Nous présentons aussi les étapes de la modélisation du code de calcul. Ensuite, nous optimisons en section [3.2](#) les deux étapes essentielles à savoir, la largeur du modèle (nombre d'éléments) et le type de maillage utilisé (configuration du maillage). Pour tester et valider les étapes optimisées de ce modèle, nous réalisons des essais sur modèle réduit physique dans la section [3.3](#).

3.2 Procédure de simulation

3.2.1 Présentation du code de calcul Flow-3D[®]

Les travaux numériques ont été réalisés dans leur majorité en utilisant des différents codes de calcul pour la simulation et l'optimisation du processus d'écoulement. Parmi ces codes, Le logiciel CFD (Computational Fluid dynamique) Flow-3D[®] qui offre un outil permettant des études numériques de grande qualité, de la plupart des phénomènes physiques possibles en mécanique des fluides, dans différents domaines industriels et de recherche. Il est développé par Flow Sciences depuis 1985.

3.2.2 Reconstruction 3D de la géométrie des PK-Weirs

La première étape consiste à construire un modèle tridimensionnel.

Dans le logiciel Flow3D® les formes peuvent être créées en trois dimensions si le modèle est simple. Dans le cas d'une géométrie complexe comme pour le PK-Weir, il est nécessaire de faire intervenir un autre logiciel pour créer cette géométrie. Le logiciel AutoCAD permet de reproduire la géométrie complexe sous forme solide en 3D. Par la suite, le solide est importé dans le logiciel Flow-3D® dans un fichier avec l'extension "STL". Selon Ouamane et Lempérière, la forme géométrique du PK-Weir est définie par :

- Une disposition rectangulaire des alvéoles quelque peu semblable aux formes de touche de Piano, ce qui explique le nom de Déversoir en touche de Piano (PK-Weir).
- Un radier des alvéoles amont et aval incliné, ce qui favorise l'utilisation des porte-à-faux.
- Une longueur réduite de la base grâce à l'utilisation des porte-à-faux.
- Une largeur réduite des éléments grâce à la forme rectangulaire.
- Une surface réduite des murs latéraux.

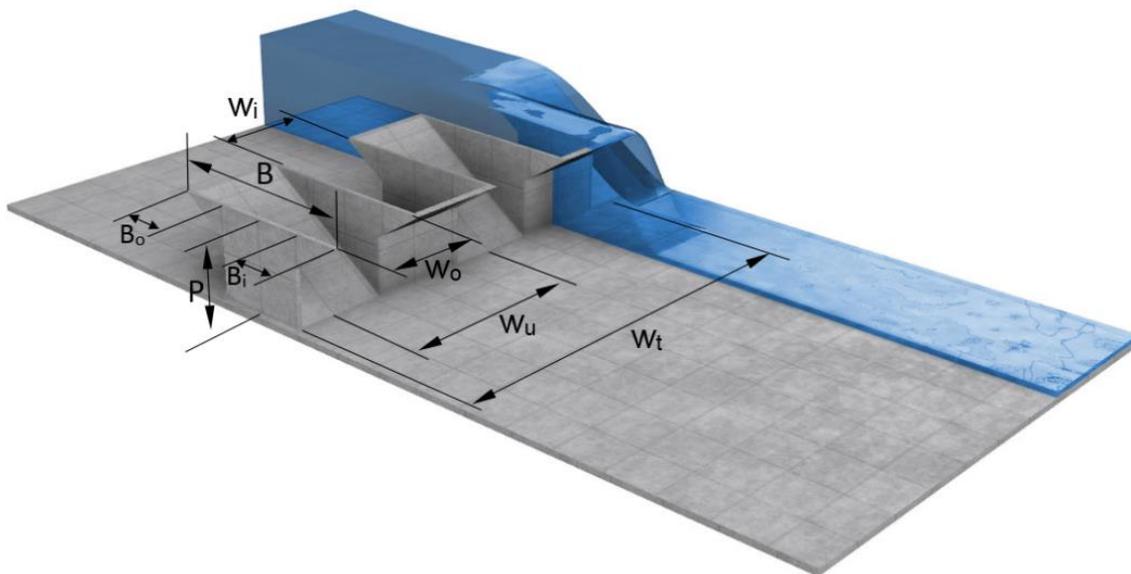


Figure 3-1. Configuration et notations

- | | |
|--|--|
| W_i : largeur de l'inlet ; | B_i : longueur du porte-à-faux aval |
| W_o : largeur de l'outlet ; | B : longueur (direction amont-aval) du PK-Weir |
| B_o : longueur du porte-à-faux amont ; | P : hauteur du PK-Weir |

3.2.3 Génération du maillage

Divers paramètres de simulation sont importants pour la modélisation de l'écoulement sur le PK-Weir. Parmi ces paramètres, on peut mentionner, le maillage. Un modèle numérique commence avec un maillage de calcul, ou une grille qui se compose d'un certain nombre d'éléments reliés entre eux, ou des cellules. Ces éléments subdivisent le domaine physique en petits volumes avec plusieurs nœuds associés à chaque volume. Les nœuds sont utilisés pour stocker des valeurs des inconnues, tels que la pression, la température et la vitesse. Le maillage est l'espace numérique qui remplace le phénomène physique. Il fournit les moyens pour définir les paramètres de l'écoulement à des emplacements discrets, fixant des conditions aux limites et, bien entendu, pour développer des approximations numériques des équations de mouvement du fluide.

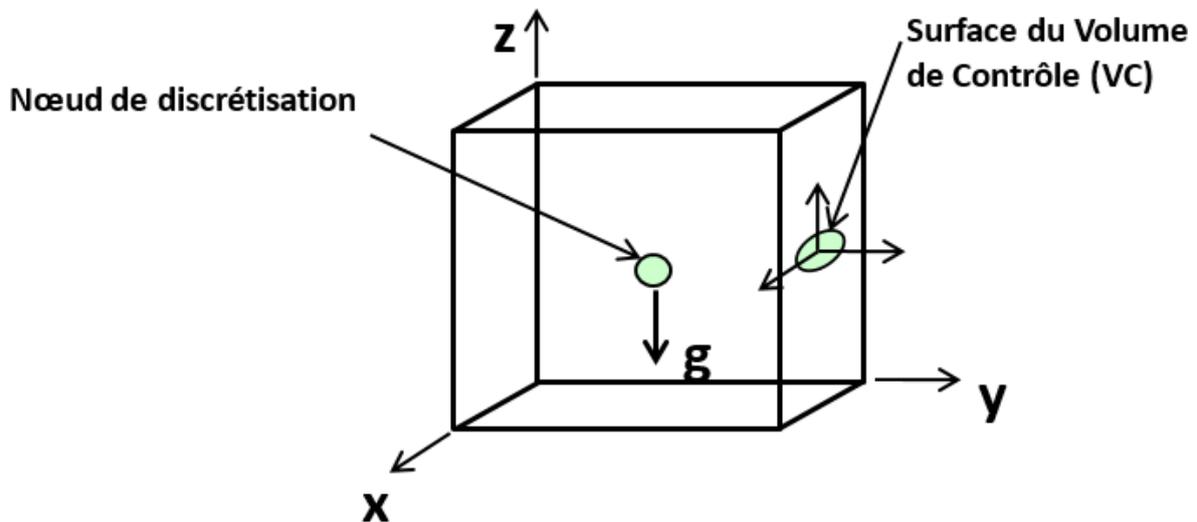


Figure 3.2: Maillage structuré.

Un maillage structuré signifie que les éléments du volume sont bien ordonnés (quadra/hexa). Dans ce type de maillage, tout nœud peut être repéré par un doublé ou un triplé (i,j,k) . En 2D un nœud (i,j) a quatre voisins $(i+1,j)$ et $(i,j+1)$, et appartient à quatre mailles.

En 3D un nœud (i,j,k) a six voisins $(i+1,j,k)$, $(i,j+1,k)$ et $(i,j,k+1)$, et appartient à huit mailles. Les avantages de ce type de maillage est économique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent. Réduit les risques d'erreurs numériques. Ses inconvénients difficiles à générer dans le cas d'une géométrie complexe.

3.2.4 Conditions initiales et aux limites

Au départ de la simulation il est nécessaire de fournir au modèle numérique les conditions initiales qui décrivent l'état du système à l'instant initial.

Ceci dit, il est fondamental de donner l'emplacement initiale de la surface libre de l'écoulement, ainsi que le modèle de turbulence et les valeurs initiale de la pression.

En fonction du problème physique traité, les conditions aux limites sont différentes et leur compatibilité avec les modèles numériques associés à un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code de calcul Flow-3D[®]. Nous en utilisons essentiellement : les conditions de symétrie et la hauteur d'eau imposée (Figure 3.3).

3.2.4.1 Condition amont et aval "Specified pressure"

Ce type de condition aux limites est employé lorsqu'on veut imposer une pression à l'entrée du domaine de calcul. Cette condition est utilisable lorsqu'on connaît la charge de l'écoulement à l'entrée et qu'on recherche la vitesse de l'écoulement correspondante. Cette condition aussi sert à imposer une pression à l'aval du déversoir (sortie de fluide à la pression atmosphérique).

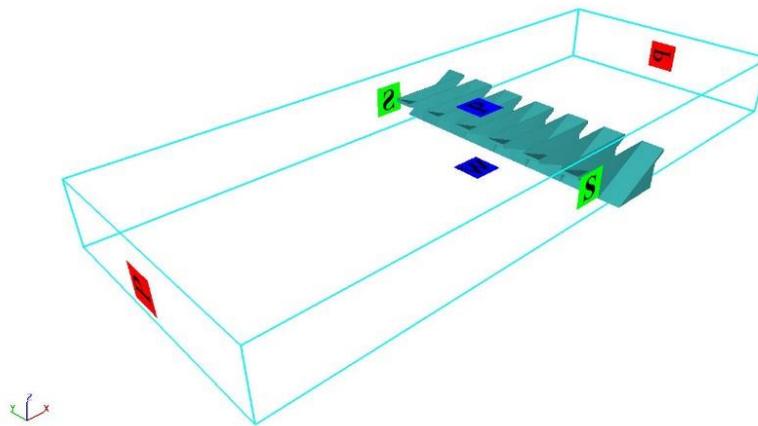


Figure 3-3. Détail de la position des conditions aux limites (P : Specified pressure, S : Symmetry et W : Wall)

3.2.4.2 Condition de symmetry

Cette condition aux limites est appliquée au niveau des limites latérales. Elle simule une limite comme ayant les mêmes caractéristiques de fluide à l'extérieur de la limite comme à l'intérieur. Cette hypothèse est valable pour les systèmes où les conditions de l'autre côté de la frontière sont identiques à des conditions proches de la limite à l'intérieure de la maille.

3.2.4.3 Condition Wall

Le fond du canal est traité comme une paroi avec condition « Wall ». Cette condition aux limites correspond à une frontière de solide où la composante normale de vitesse est nulle.

3.3 Optimisation du modèle numérique

La modélisation en 3D de l'écoulement sur le PK-Weir destinée à l'évaluation de la débitance nécessite plusieurs étapes successives. Dans cette partie, nous nous intéressons à l'optimisation du modèle numérique par la modification de quelques paramètres de la modélisation afin d'avoir le meilleur compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats. Ces paramètres sont les suivants :

- La largeur du PK-Weir (Le nombre d'éléments modélisés).
- Le type de maillage (Mono-bloc ou Multi-bloc)

Cependant, les paramètres suivants ont été fixés :

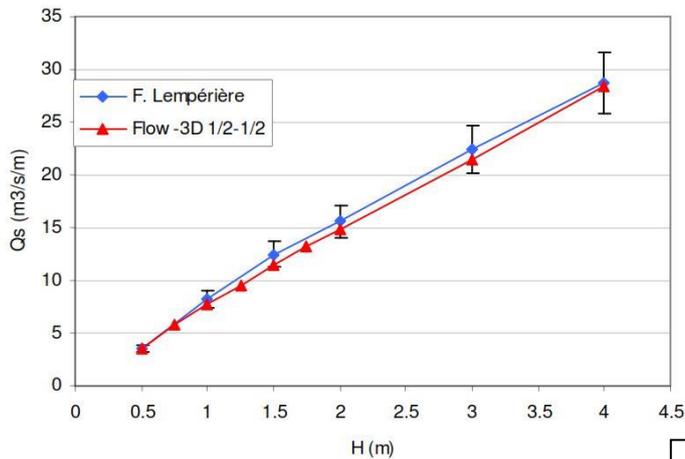
- La configuration du PK-Weir utilisé dans les tests.
- Les conditions initiales.
- Les conditions aux limites.

3.3.1 Test de la largeur

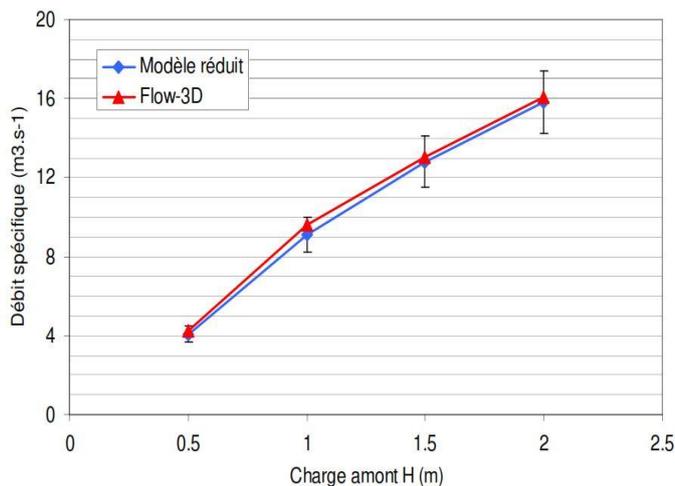
Le PK-Weir utilisé dans les essais expérimentaux est très large car il contient un nombre important d'éléments. Par conséquent, le temps de calcul de simulation serait très important. Le code de calcul Flow-3D[®] offre une condition aux limites baptisée « Symmetry » (présentée en [section 3.1.4](#)), ce qui permet d'aborder la simulation aisément dans les cas d'un modèle qui représente une symétrie.

La largeur du modèle (nombre d'élément) a un effet sur le temps de calcul. Pour vérifier cet effet, des tests sur la largeur du PK-Weir ont été réalisés. Ces tests ont été déjà décrit dans la bibliographie, se sont celles de la modélisation d'un demi inlet et d'un demi outlet ($\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$) et la modélisation de deux demi inlet et d'un outlet ($2 * \frac{1}{2} + 1$) de Laugier et al (2010). Les résultats obtenus par Laugier et al. (2010) montrent que les écarts entre les deux configurations sont très faibles et le temps de calcul va en moyenne du simple au double pour simuler $1+2 * \frac{1}{2}$. Les courbes qui représentent la capacité d'évacuation ont été comparées à celles obtenues sur modèles réduits à EDF R&D (Chatou) pour des PK-Weirs de type A (Lempérière et Ouamane,

2003) et pour celui spécifique au barrage de Malarce, tous les deux étant constitués d'un nombre important d'inlet et outlet. Les résultats numériques semblent cohérents puisque les écarts en débit sont inférieurs à 5 % en moyenne par rapport aux valeurs mesurées. Cette proximité des résultats est illustrée dans la figure 3.4.



(a)



(b)

Figure 3-4. Photographies des modèles réduits et comparaisons modèle réduit / modèle numérique FLOW-3D® des courbes de débitance (a) : PK-Weir de type A ; (b) : PK-Weir de Malarce).

L'idée est reprise dans le présent travail, dans le but de réduire le temps de calcul, des tests de sensibilité ont été menées vis-à-vis des paramètres de ce modèle géométriquement et hydrauliquement complexe. Dans cette première optimisation, deux configurations ont été modélisées. Un modèle de PK-Weir avec six éléments (largeur complète) et un modèle de PK-Weir avec un seul élément (une inlet et une outlet).

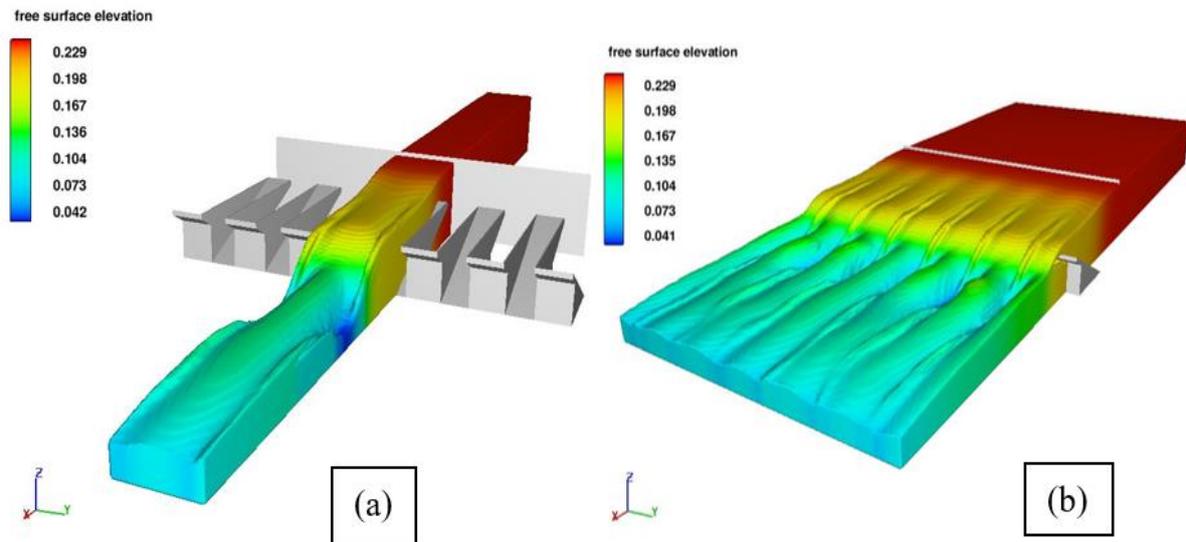


Figure 3-5. Configuration (a) Un élément du PK-Weir, (b) Six éléments du PK-Weir

La configuration du PK-Weir présenté nous a servi de cas test pour évaluer et juger la capacité du modèle avec un seul élément comme une alternative précise pour prédire les variations du débit. Les caractéristiques géométriques du modèle de PK-Weir testé sont fournies dans le tableau suivant :

Tableau 3-1. Caractéristiques géométriques du modèle réduit

Modèle PK-Weir							
n	$P [cm]$	$B [cm]$	$W_i [cm]$	$W_o [cm]$	$B_i [cm]$	$B_o [cm]$	$T_s [cm]$
6	15	41.33	9.09	7.58	5	15	0.3

Les options de modélisations par onglet de l'interface de Flow-3D[®] sont brièvement présentées dans le tableau 3.2

Dans cette étude le domaine de calcul se rapporte à un canal rectangulaire dont le modèle à tester (PK-Weir) est suffisamment éloigné à la limite amont (Source) pour créer un écoulement stable. Les dimensions des deux modèles de PK-Weir sont $2.7 \times 1.03 \times h$ m et $2.7 \times 0.173 \times h$ m, découpé en 0.45 et 0.6 cm dans les trois directions (x, y et z) formant le maillage qui a été choisi uniforme ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$). Pour plus de précision, des plans fixes au niveau des parois latérales du PK-Weir ont été rajoutés pour bien définir la géométrie.

Tableau 3-2. Caractéristiques du modèle numérique par onglet de l'interface de Flow-3D®

Onglet "Global" :	Temps simulé :16 s (suffisant pour la stabilisation) Interface: Free surface or shape interface Nombre de fluide : 1 Mode d'écoulement : Incompressible
Onglet "Physics" :	Gravité : Selon z Fluide newtonien visqueux Modèle de turbulence : Renormalized group (RNG)
Onglet "Fluid" :	Eau à 20°C
Onglet "Meshing and geometry" :	Type de maillage : Mono-bloc Dimension de cellules : 0.45 cm pour h=2.55 cm jusqu'à 0.6cm pour h>2.55 cm
Onglet "Boundaries" :	Amont/Aval : Specified pressure Droite/gauche : Symmetry Dessus : Specified pressure avec Fluid Fraction = 0 Dessous : Wall
Onglet "Initial" :	Bloc de fluide à l'amont jusqu' au parement aval du PK-Weir
Onglet "Numerics" :	Time-step: Initial time step= 0.002 Pressure solver: GMRES Momentum advection: Second order monotonicity preserving

Quatre simulations ont été effectuées pour chaque géométrie présentée : $h = 2.55$ cm, 5.1cm, 7.6 cm et 10.25 cm. Les résultats obtenus sont donnés dans un fichier en format texte contenant l'historique du calcul ainsi que les variables de calcul sélectionnées. Pour analyser les résultats d'optimisation du modèle numérique, on s'est intéressé d'une part à la qualité des résultats de

point de vue précision et d'autre part aux délais de réalisation. Les résultats numériques obtenus par le code Flow-3D® sont présentés dans les figures 3.6 et 3.7.

Les écarts relatifs sont calculés en utilisant la relation suivante :

$$Ecart (\%) = \frac{Q_s(1 \text{ élément}) - Q_s(6 \text{ éléments})}{Q_s(6 \text{ éléments})} \times 100$$

Q_s : Débits spécifiques en $l.s^{-1}.m^{-1}$

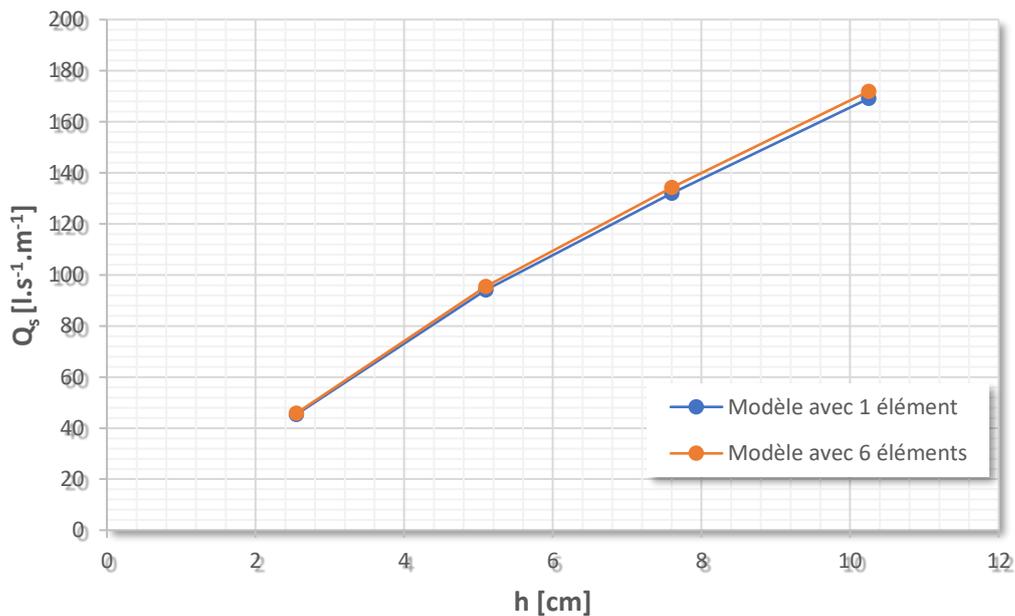


Figure 3-6. Comparaison entre le modèle avec 1 élément et 6 éléments

D'après l'analyse des résultats de la simulation présentés ci-dessus, les valeurs de débit spécifique ont été calculées en fonction de la charge amont pour chaque configuration. On observe que les débits spécifiques sont identiques, avec un faible écart relatif qui peut être considéré comme négligeable.

Tableau 3-3. Comparaison entre le modèle avec 1 élément et 6 éléments

Nbr de Cycles	Flow-3D® - PK-Weir		Ecart [%]
	1	6	
h [cm]	Q_s [l/(s m)]	Q_s [l/(s m)]	
2,55	45,36	45,85	1,1
5,1	94,12	95,43	1,4
7,6	131,97	134,18	1,6
10,25	169,08	171,91	1,6

Le second aspect observé se rapporte au temps de calcul (en heure) :

Il ressort de cette comparaison que le gain de temps réalisé avec la configuration d'un seul élément est considérable comme l'indique le tableau 3.4.

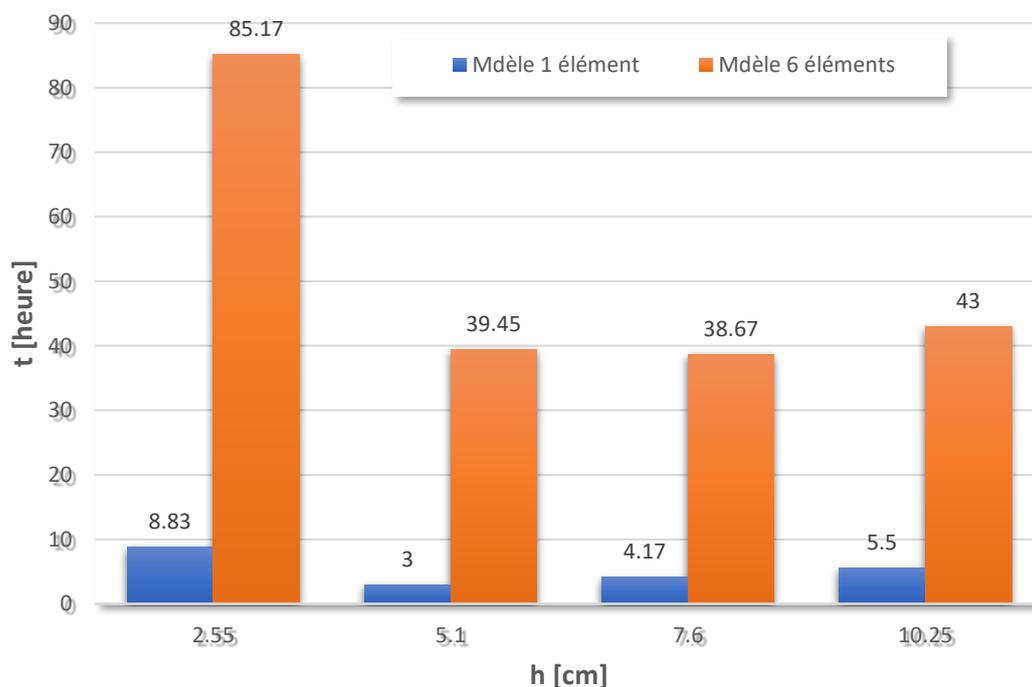


Figure 3-7. Comparaison des temps de calcul en fonction du nombre d'élément de PK-Weir

Remarque : Il a été observé que le temps de calcul augmente avec l'accroissement de la charge amont (h), sauf pour la valeur de $h = 2,55$ cm où le temps de calcul est assez important ; ceci est peut-être justifié par le raffinement du maillage (réduction des tailles des cellules) pour les faibles charges afin d'obtenir un meilleur résultat.

Tableau 3-4. Temps de calcul pour en fonction de la charge et la largeur du modèle

Nbr de Cycles	Flow-3D® - PK-Weir		Ecart [%]
	1	6	
<i>h</i> [cm]	<i>t</i> [h]	<i>t</i> [h]	
2,55	8,83	85,17	89,6
5,1	3,00	39,45	92,4
7,6	4,17	38,67	89,2
10,25	5,50	43,00	87,2

Cette partie relative à la modélisation des deux configurations de simulations d'un seul élément et six éléments indique que :

- Les deux configurations modélisées (modèles avec 01 et 06 éléments) donnent des résultats très proches.
- Le temps de calcul pour les simulations Flow-3D[®] modélisant la largeur complète du PK-Weir est beaucoup plus élevé.
- Les essais sur le modèle avec un seul élément donnent des bons résultats avec un écart moyen de 1.4 % dans un temps de calcul raisonnable.

3.3.2 Test du maillage

Typiquement, le maillage est l'espace numérique qui remplace le phénomène physique. Cette étape est la plus délicate pour avoir une bonne précision de la solution numérique. Flow-3D[®] utilise un maillage structuré et rectangulaire, ce dernier subdivise le domaine de l'écoulement en éléments rectangulaires, parfois appelé éléments en briques. Le nombre d'éléments joue un rôle important dans la détermination de la forme de la géométrie étudiée et la fiabilité de la simulation en termes de précision des résultats et du temps de réalisation. Ainsi, une étude de sensibilité au maillage doit être conduite par une modélisation numérique, afin que les critères de choix d'un maillage soient vérifiés.

Les principaux critères de choix d'un maillage sont souvent, d'une part la bonne représentation de la géométrie du PK-Weir et d'autre part le compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats.

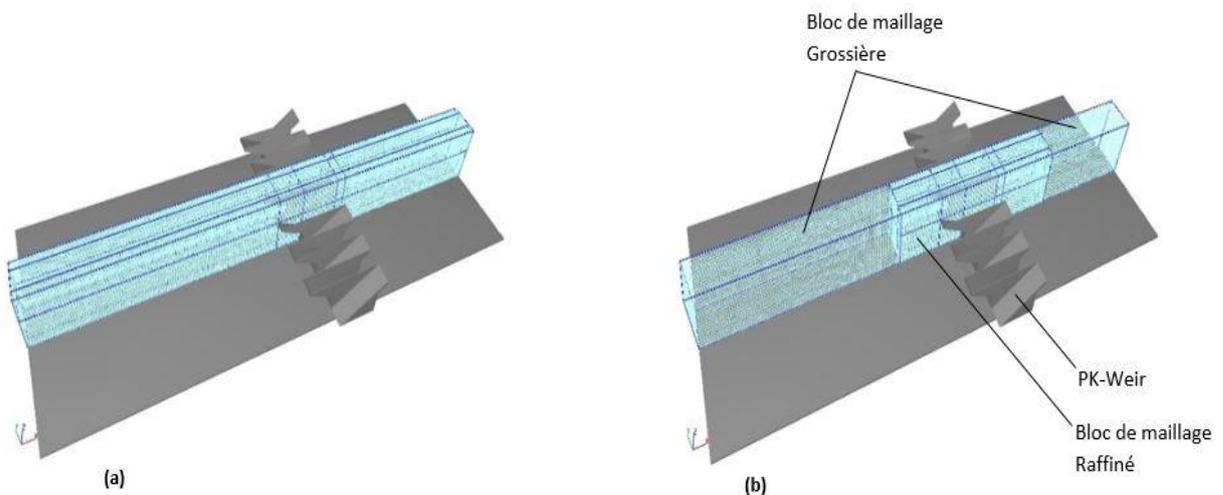


Figure 3-8. (a) Maillage mono bloc, (b)- Maillage multi bloc

D'après les résultats obtenus dans la partie précédente, c'est la configuration à un seul élément qui est utilisée dans cette partie. Afin d'étudier l'influence du maillage sur la précision des résultats du calcul en multi-bloc, nous avons considéré un maillage constitué de trois blocs, deux blocs de maillage grossier qui représentent les canaux amont et aval et un bloc central raffiné (zone du PK-Weir) figure 3.8.

Pour ce faire, quatre simulations ont été effectuées ($h = 2.55, 5.1, 7.6$ et 10.25 cm). En modélisant la configuration du maillage multi-bloc, les résultats obtenus ont été comparés aux simulations réalisées dans la partie précédente en un seul élément avec un maillage mono-bloc. Les paramètres des simulations conservés sont : La géométrie du PK-Weir, les dimensions du domaine physique, conditions initiales et conditions aux limites.

Par convention, les écarts seront définis de la manière suivante :

$$Ecart (\%) = \frac{Q_s(\text{Maillage Multi - Bloc}) - Q_s(\text{Maillage Mono - Bloc})}{Q_s(\text{Maillage Mono - Bloc})} \times 100$$

Le tableau 3.5 résume les écarts relatifs pour les débits spécifiques de l'écoulement sur le PK-Weir en fonction du type du maillage et le temps de calcul pour l'étude de la sensibilité du maillage. Le maillage retenu est celui qui donne des solutions numériques acceptables et satisfait aux critères.

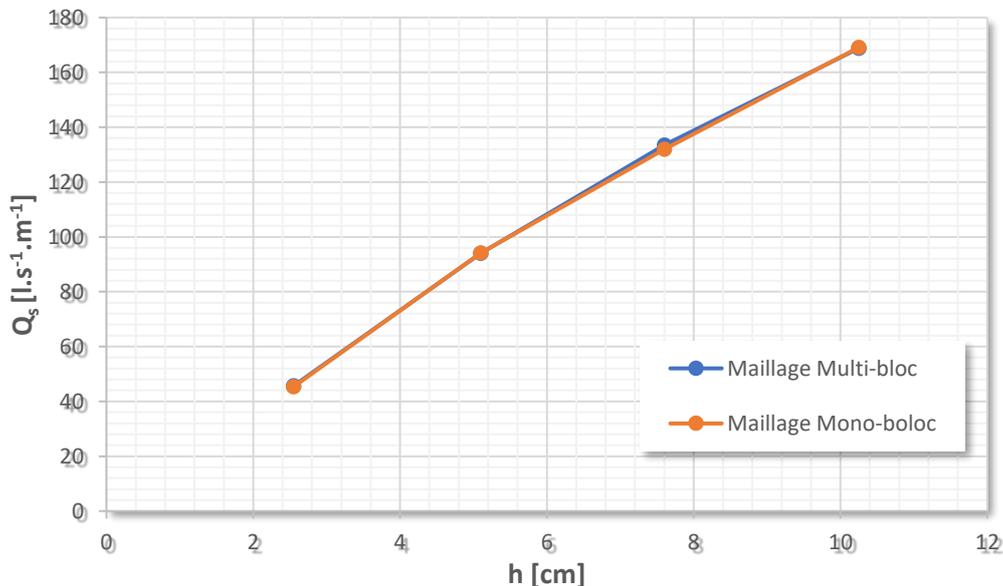


Figure 3-9. Comparaison entre maillage Mono-Bloc et Multi-Bloc

Pour les deux configurations du maillage, on se rend compte que le maillage mono-bloc se compose d'un plus grand nombre de cellules par rapport au maillage multi-blocs. En revanche, les deux configurations génèrent des géométries dans la même résolution (Figure 3.10).

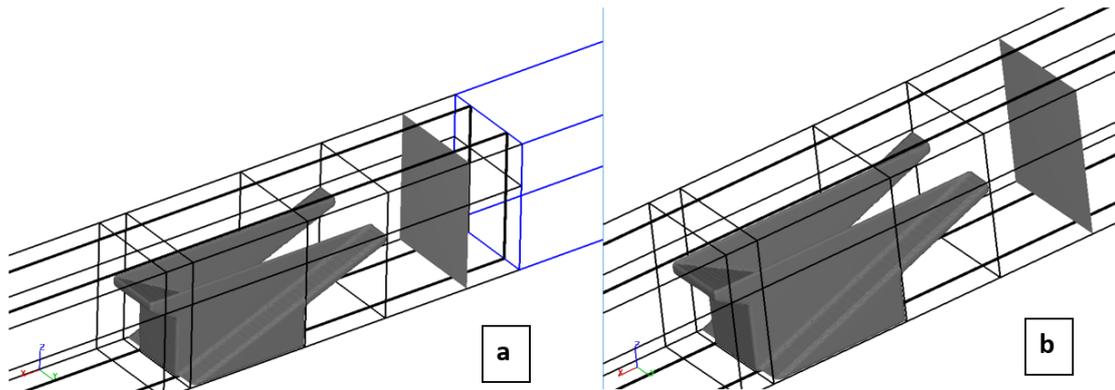


Figure 3-10. Comparaison entre résolution du maillage : a- Multi-blocs, b- Mono-bloc

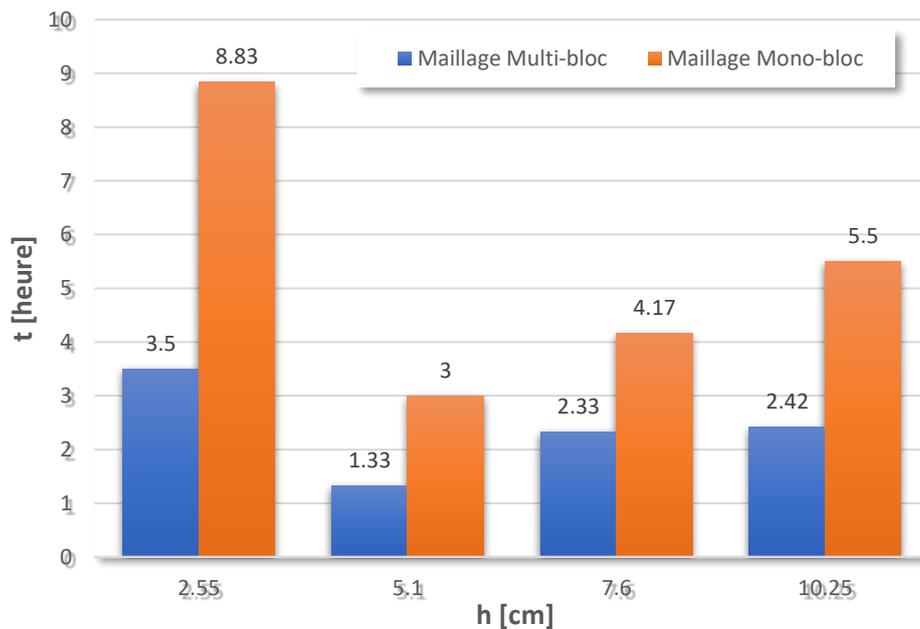


Figure 3-11. Temps de calcul pour l'étude de sensibilité du maillage

Le temps de calcul pour les simulations avec la configuration du maillage mono-bloc sont beaucoup plus élevés. Comme le montre le tableau suivant.

Tableau 3-5. Temps de calcul pour l'étude de sensibilité du maillage

Nbre de Cells <i>h [cm]</i>	Maillage Mono Bloc <i>≈ 590000</i>	Maillage Multi-Bloc <i>≈ 265496</i>	<i>Ecart [%]</i>
	<i>t [h]</i>	<i>t [h]</i>	
2,55	8,83	3,50	60,4
5,1	3,00	1,33	55,7
7,6	4,17	2,33	44,1
10,25	5,50	2,42	56,0

Les observations suivantes ressortent de l'étude précédente :

- Les écarts obtenus entre les deux configurations du maillage (mono-bloc et multi-bloc) sont négligeables.
- Le temps de calcul pour la configuration mono-bloc est plus que le double de celui de la simulation du modèle avec configuration multi-bloc.

Le maillage multi-blocs est un bon compromis pour avoir un temps de calcul et un nombre de cellules raisonnables pour prédire avec une bonne exactitude les débits d'écoulement sur le PK-Weir, ceci permet de conclure qu'il est plus raisonnable de choisir un maillage multi-blocs pour la simulation de l'écoulement sur le PK-Weir.

3.4 Validation du modèle numérique

L'analyse expérimentale est souvent nécessaire pour valider les modèles numériques utilisés lors du calcul CFD appliqué aux PK-Weir.

Dans ce travail, les résultats de simulation numérique ont été comparés avec ceux obtenues par l'expérimentation sur réduits physiques. Les essais ont été réalisés dans la station expérimentale du laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement "LAHE" de l'université de Biskra, qui représente un outil expérimental de référence pour l'écoulement sur les déversoirs. Dans cette partie, nous décrivons d'abord le dispositif expérimental et la configuration du modèle étudié. Nous présentons ensuite les résultats des essais expérimentaux obtenus et les confrontés aux résultats de la modélisation numérique obtenue dans les parties précédentes. Pour mesurer les débits d'entrée, nous disposons de deux débitmètres installés sur les deux conduites d'alimentation du modèle expérimental. La première conduite est équipée d'un débitmètre à ultrasons et la seconde d'un débitmètre électromagnétique. Un capteur de niveau à ultrasons est utilisé pour mesurer la charge d'eau en amont du modèle de PK-Weir.



Figure 3-12. Capteur de niveau à ultrason



Figure 3-13. Débitmètre électromagnétique



Figure 3-14. Débitmètre à ultrason

Les capteurs de niveau doivent être étalonnés à l'aide de piézomètre. La précision sur la hauteur d'eau est de $\pm 0.2 \%$ et de $\pm 0.5 \%$ sur le débit.

3.4.1 Vue générale du modèle réduit physique

Le dispositif expérimental du laboratoire LAHE (Figure 3.15) est composé d'un circuit fermé permettant de simuler les écoulements dans les cours d'eau. Cette station a été dimensionnée dans le but de permettre la réalisation des essais sur des modèles réduits des évacuateurs de crues et autres ouvrages hydrauliques à une échelle suffisamment acceptable.



Figure 15: Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits.

Le modèle physique présenté au schéma de la Figure 3.16 est composé principalement des parties suivantes :

- Un canal de section rectangulaire de largeur 1 m, de longueur 12 m et de hauteur 0.9m.
- Un réservoir d'une capacité de 48 m^3 , relié par deux conduites de diamètre 200 mm au canal d'amenée.
- Deux pompes centrifuges qui débitent 170 l/s.
- Deux vannes qui assurent la variation de débit de la pompe de façon précise et contrôlée.
- Divers appareils et instruments de mesure dont :
 - Un débitmètre à ultrason.
 - Un débitmètre électromagnétique.
 - Un capteur de niveau à ultrason.
 - Piézomètres (pour l'étalonnage).
 - Thermomètre (température d'eau).

La figure ci-dessous montre la localisation des débitmètres et le capteur de niveau dans la station expérimentale.

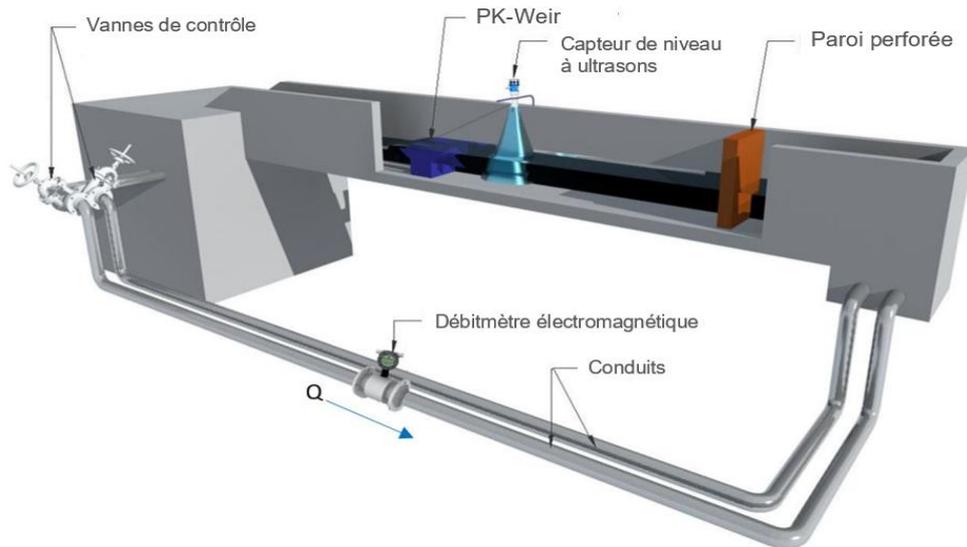


Figure 3-16. Vue en 3D du modèle expérimental.

3.4.2 Validation des tests de la largeur du PK-Weir avec un seul élément et en maillage mono-bloc.

Dans le but d'examiner la validation du modèle numérique utilisée, nous avons comparé les valeurs de débit donnée par le logiciel Flow-3D® à celles obtenues par le modèle physique. Quatre mesures de débit ont été utilisées pour chaque série, donnant ainsi les hauteurs suivantes : 2.55 cm, 5.1 cm, 7.6 cm et 10.55 cm. Pour plus de précision, les séries de mesure sont répétées deux fois pour chaque expérimentation.

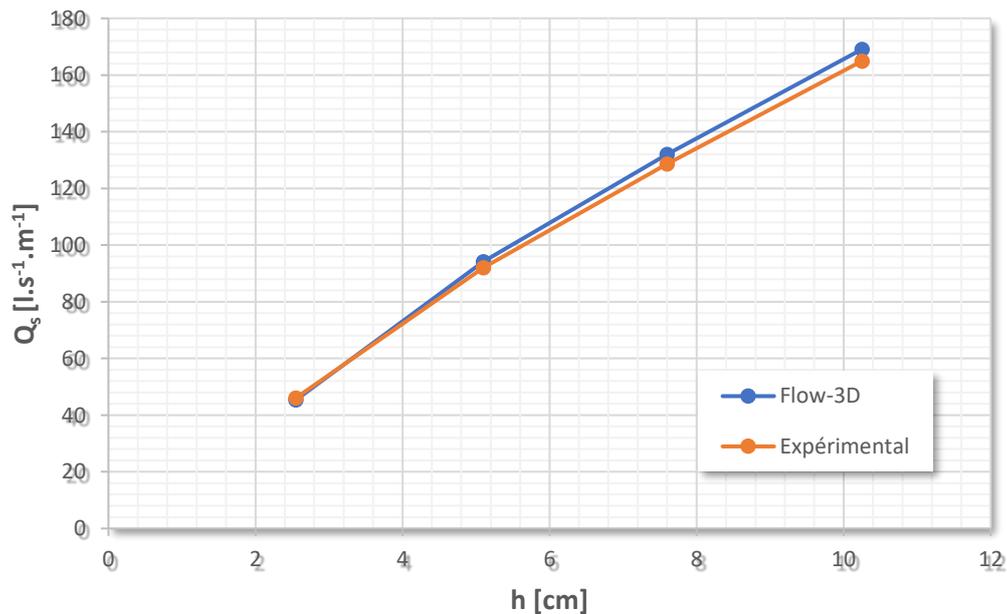


Figure 3.17: Comparaison des résultats numériques avec ceux obtenus par voie d'expérimentation sur modèle physique de PK-Weir avec un seul élément et en maillage mono-bloc.

Par convention, les écarts seront définis de la manière suivante :

$$Ecart (\%) = \frac{Q_s(Experimental) - Q_s(Numerical)}{Q_s(Experimental)} \times 100$$

La figure 3.17 représente la comparaison entre le débit calculé par Flow-3D® et le débit obtenu sur modèle réduit physique en fonction de la charge amont.

Il en ressort que les débits spécifiques mesurés et calculés sont très proches et les écarts relatifs obtenus entre les deux modèles (numérique et physique) sont très faibles (2.6 % maximum).

Tableau 3-6. Résultats numérique et validation par des données expérimentales

h [cm]	Expérimental Q_s [l/(s m)]	FLOW-3D® Q_s [l/(s m)]	Ecart [%]
2,55	46,08	45,36	-1,6%
5,1	92,08	94,12	2,2%
7,6	128,64	131,98	2,6%
10,25	164,93	169,08	2,5%

Qualitativement, les deux modèles sont équivalents et traduisant le même débit.

3.4.3 Validation des tests du maillage avec configuration du maillage multi-bloc

Cette validation concerne l'application du maillage multi-bloc qui permet de réduire le temps de calcul de la simulation. En conséquence, un gain important du temps de calcul sera conservé, ce qui favorise la réalisation d'un grand nombre d'expérimentation en un temps record.

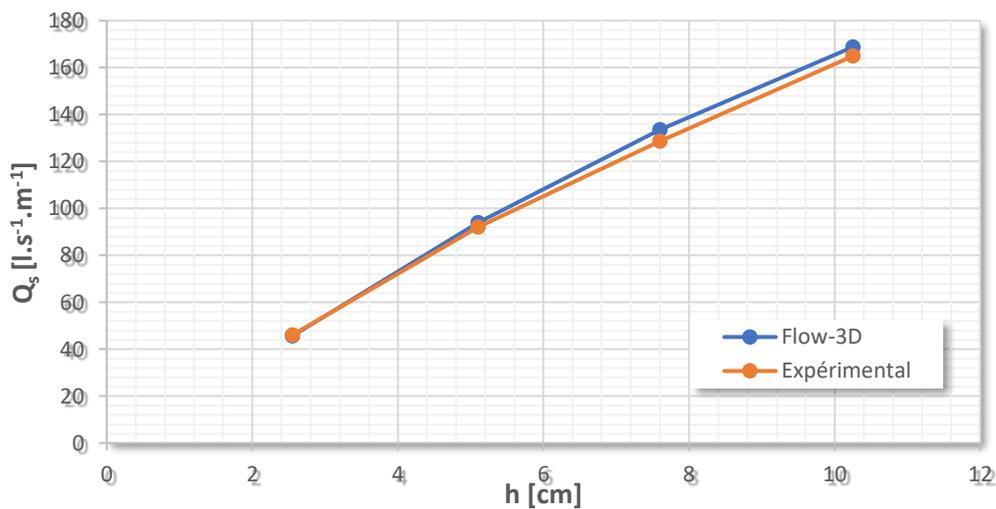


Figure 3-18. Comparaison entre débit expérimental et calculé par Flow-3D® avec configuration du maillage multi-bloc

En utilisant le modèle à un seul élément qui a été défini précédemment et le maillage multi-bloc il est possible d'aboutir à un résultat meilleur. Le tableau 3.7 résume les résultats de comparaison entre le modèle numérique et le modèle physique. Ainsi on constate que le résultat numérique suit la même tendance que la courbe expérimentale avec un léger écart de 2.25 % en moyenne.

Tableau 3-7. Comparaison entre débit expérimental et calculé par Flow-3D® entre débit expérimental et calculé par Flow-3D® avec configuration du maillage multi-bloc

$h[cm]$	Expérimental	FLOW-3D®	Ecart [%]
	$Qs[l/(s m)]$	$Qs[l/(s m)]$	
2,55	46,08	45,67	-0,9%
5,1	92,07	93,99	2,1%
7,6	128,64	133,46	3,7%
10,25	164,93	168,78	2,3%

En conclusion, d'après les résultats obtenus de la comparaison entre les deux méthodes d'expérimentation (numérique et expérimentale) énumérées, il ressort que :

- La comparaison du modèle avec un seul élément du PK-Weir donne un écart moyen de 2.2 %
- La comparaison du modèle avec configuration du maillage multi-bloc donne un écart moyen de 2.3 %

Ainsi, les tests de validation du modèle numérique sont justifiés grâce à la bonne concordance trouvée entre les résultats de la modélisation numérique et ceux expérimentaux

3.5 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons tout d'abord décrit les principales étapes de la modélisation numérique avec le code de calcul Flow-3D® dans l'objectif de modéliser l'écoulement sur le PK-Weir. Nous avons ensuite optimisé le modèle numérique dans le but de rendre ce dernier plus rentable. Enfin, nous avons vérifié la validité du modèle optimisé.

Deux étapes de la modélisation numérique de l'écoulement sur le PK-Weir ont été optimisées. Tout d'abord ([section 3.2.1](#)), un modèle numérique du PK-Weir avec un seul élément a été proposé. Celui-ci se constitue d'un outlet et inlet dans le but de réduire la largeur du modèle

(réduction du nombre de cellules du maillage). Ce modèle a été comparé à un modèle avec six éléments. Le modèle proposé s'est avéré efficace d'une part par la précision des résultats et d'autre part par le temps de calcul qui est faible. Ensuite, deux configurations du maillage ont été testées (Mono-bloc et Multi-bloc) ([section 3.2.3](#)). La configuration multi-bloc s'avère être celle retenue pour son faible temps de simulation. Ainsi, ceci, permettra d'effectuer des essais sur un nombre plus important de modèles avec une variation de la géométrie du PK-Weir.

Le logiciel Flow-3D[®] s'est avéré ainsi très performant pour le prédimensionnement du PK-Weir avec une bonne précision et dans un meilleur délai.

Chapitre 4

Optimisation de la forme du déversoir en
Touches de Piano (PK-Weir)

Sommaire

4.1	Introduction	86
4.2	Sensibilité des paramètres.....	87
4.2.1	Effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i).....	88
4.2.2	Effet de la largeur des alvéoles.....	97
4.3	Comparaison aux résultats expérimentale	106
4.4	Conclusion	109

4.1 Introduction

Les avantages que représente le déversoir en touche de piano ont incité les concepteurs des barrages à son application pour plusieurs barrages à travers le monde.

De part ses avantages, le PK-Weir est caractérisé par un écoulement tridimensionnel, notamment la présence de divers phénomènes physiques compliqués qui apparaissent quand il est en plein fonctionnement. Ces phénomènes sont la conséquence du grand nombre de paramètres géométriques qui définissent le PK-Weir. Le manque d'évaluation de l'impact des paramètres géométriques qui définissent la configuration du PK-Weir rend difficile la définition de la forme optimale.

Depuis son développement, plusieurs travaux de recherche expérimentale et numérique ont été réalisés dans le but de comprendre et d'optimiser le comportement hydraulique du PK-Weir. Les travaux réalisés se sont intéressés essentiellement à l'étude des différents paramètres géométriques sur la performance hydraulique. Dans ce sens, on peut citer le travail de Ouamane (2011), qui a étudié l'effet de la largeur des alvéoles. Les résultats de ce travail ont montré que la largeur d'alvéole d'entrée est comprise entre 1.2 et 1.5 fois la largeur de l'alvéole de sortie. Anderson et al. (2012) ont montré que l'intervalle optimal du rapport W_i/W_o est situé entre 1.25 et 1.5. Liette Ribeiro, (2012) a proposé que la valeur optimale du rapport de la largeur des alvéoles soit de 1.6. En utilisant la modélisation numérique par le biais du code Flow-3D, Pralong et al, (2011) ont recommandé l'utilisation des alvéoles d'entrée plus larges que ceux de sortie. La longueur des porte-à-faux amont est aval qui est exprimée souvent par le rapport B_o/B_i représente le second paramètre qui a un effet sur le rendement du PK-Weir. Ouamane et al. (2006) ont montré que le PK-Weir avec des porte-à-faux amont plus longs que ceux de l'aval possède le meilleur rendement hydraulique. Anderson et al. (2012) et (Machiels et al, (2012) citent la valeur de 3 comme optimum du rapport B_o/B_i . Pralong et al. (2011) indiquent que le PK-Weir est plus stable avec des porte-à-faux amont plus longs que l'aval de point de vue structure mais les gains en rendement ne sont pas significatifs. Ces deux paramètres (la longueur des porte-à-faux et la largeur des alvéoles) sont d'ordre principal et représentent un effet remarquable sur la performance hydraulique.

Sur la base d'un bref examen des études précédentes, il serait possible de dire qu'il est encore difficile de définir l'optimum des divers paramètres géométriques pour la conception de PK-Weir qui soit hydrauliquement et économiquement performant.

La définition de la forme optimale du PK-Weir nécessite plus d'essai sur des modèles physiques, ceci demande un nombre de modèles équivalent à la combinaison entre les huit

paramètres géométriques qui définissent le PK-Weir. Pour réduire le nombre d'essai sur les modèles physiques, il est possible de procéder à une présélection de l'optimum par voie de modélisation numérique et la valider par quelques essais sur modèles physiques de PK-Weir. Ainsi, ce chapitre s'inscrit dans le cadre d'optimisation des paramètres géométrique dont l'objectifs d'améliorer la capacité d'évacuation et de réduire la charge d'écoulement sur ce type de déversoir. Nous nous sommes concentrés sur deux aspects géométriques du PK-Weir pour définir la forme optimale, la largeur des alvéoles et la longueur des porte-à-faux.

Plan du chapitre : Comme il a été dit, ce chapitre est entièrement consacré à l'optimisation des paramètres géométriques du déversoir en touche de piano (PK-Weir) par voies numérique. Notre démarche sera dans un premier temps l'étude de l'effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i) sur la capacité d'évacuation (section 4.1.1). Nous nous intéresserons, dans un second temps, aux combinaisons des deux paramètres géométriques : longueur des porte-à-faux et largeur des alvéoles. Et leur effet sur le comportement hydraulique du PK-Weir (section 4.1.2). Enfin, nous nous validerons les résultats du code numérique par des résultats de tests réalisés sur modèles réduit qui sont exposés en section 4.2.

4.2 Sensibilité des paramètres

Les simulations menées sur le modèle numérique ont soulevé plusieurs questions quant à l'importance des caractéristiques géométriques du PK-Weir sur la performance hydraulique. Divers paramètres géométriques sont importants pour faire améliorer la capacité d'évacuation. Parmi ces paramètres, on peut mentionner, la longueur des porte-à-faux, la largeur des alvéoles, la hauteur de pelle, etc.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'optimisation de la forme du PK-Weir. En particulier, nous modélisons l'effet des paramètres géométriques. Cette modélisation vise à comprendre le phénomène qui peut expliquer l'effet de l'un des rapports géométriques sur l'autre. Nous nous concentrons ici sur l'optimisation du deux paramètres principal (largeurs des alvéoles W_i/W_o et longueur des porte-à-faux B_o/B_i). Pour cela, on a scindé cette étude en deux phases :

- Pour la première phase on fixe la valeur de (W_i/W_o) et on fait varier rapport le (B_o/B_i) selon des charges données.
- Pour la seconde phase, on étudie l'effet des deux rapports B_o/B_i et W_i/W_o sur la capacité d'évacuation.

4.2.1 Effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i)

Dans cette section nous présenterons des résultats de simulation numériques pour l'étude de l'effet de la longueur des porte-à-faux, la variation de la charge amont et enfin l'analyse de l'écoulement sur le PK-Weir.

4.2.1.1 Résultats et discussion

Afin d'étudier l'effet de la longueur des porte-à-faux du PK-Weir, des tests sur le rapport B_o/B_i sont réalisés. Ces tests permettront d'étudier l'effet de variation de la charge amont et de la longueur des porte-à-faux sur la capacité d'évacuation. Le but de cette étude est de trouver une valeur optimale du rapport B_o/B_i .

Les différents cas testés ont permis de balayer une plage de longueurs comprises entre zéro et l'infini pour les porte-à-faux amont et aval.

En effet, les valeurs 0 et ∞ correspondent respectivement aux modèles sans et avec porte-à-faux amont. Le tableau 4.1 montre les différentes configurations du PK-Weir expérimentées.

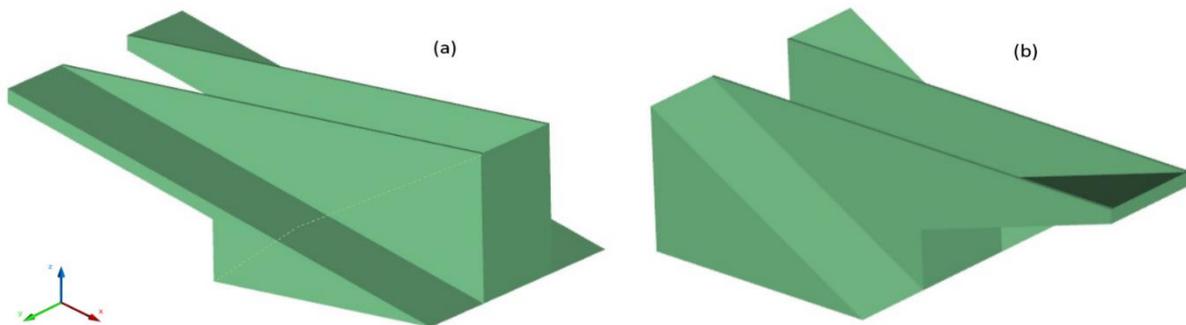


Figure 4.1: Modèle de PK-Weir : (a) avec porte-à-faux amont, (b) sans avec porte-à-faux amont

Tableau 4.1 : Configurations et paramètres géométrique des PK-Weirs testés pour l'effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i)

$\frac{B_o}{B_i}$	B [cm]	B_i [cm]	B_o [cm]	P [cm]	W_i [cm]	W_o [cm]	$\frac{W_o}{W_i}$
0		20.00	0.00		9.00	7.50	1,2
1		10.00	10.00		9.00	7.50	1,2
2		13.33	6.67		9.00	7.50	1,2
3	41.33	15.00	5.00	15.00	9.00	7.50	1,2
4		16.00	4.00		9.00	7.50	1,2
6		17.14	2.86		9.00	7.50	1,2
∞		0.00	20.00		9.00	7.50	1,2

En utilisant le modèle numérique défini précédemment (Chapitre 3) et les étapes optimisées, les résultats du débit en fonction de la longueur des porte-à-faux et la charge d'eau sont

obtenues. La variation du débit spécifique (Q_s) en fonction de la charge relative (h/P), pour chaque valeur du rapport (B_o/B_i) sont illustrées dans les graphes de la figure suivante :

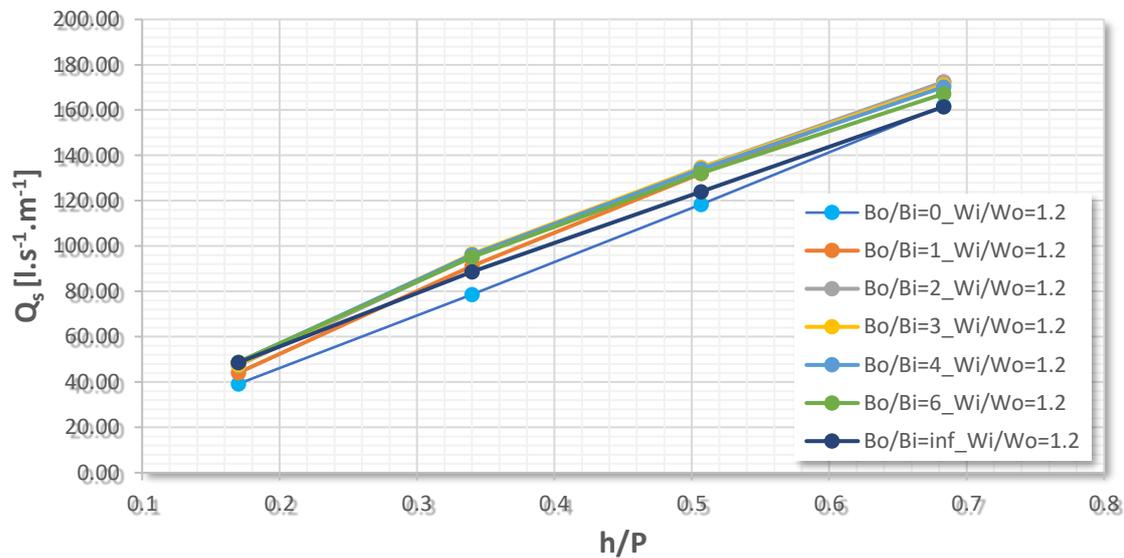


Figure 4.2. Effet de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i)

Les courbes $Q_s = f(h/P)$ mettent en évidence l'effet de la charge amont et de la longueur des porte-à-faux sur le débit. Ainsi, pour chaque valeur de la charge relative (h/P), le débit atteint un maximum pour une valeur donnée du ratio B_o/B_i et décroît pour des valeurs plus grandes. Il est remarqué que plus la charge relative (h/P) augmente, plus la valeur de B_o/B_i correspondant au débit maximum décroît. Il est à rappeler que le ratio L/W et le rapport W_i/W_o sont fixes.

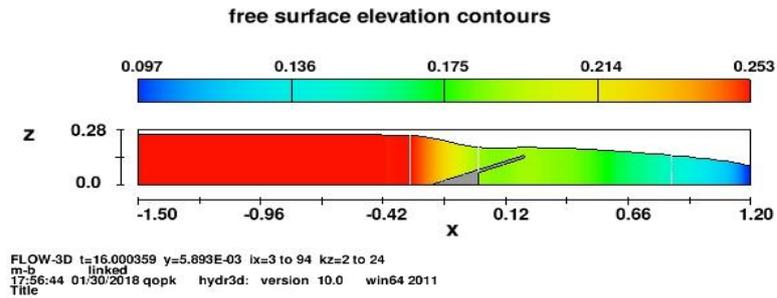
Tableau 4.2: Résultats des débits spécifiques en [$l.s^{-1}.m^{-1}$] pour les différentes configurations testées

$\frac{h}{P}$	$\frac{B_o}{B_i}$						
	0	1	2	3	4	6	∞
0,17	39,20	44,09	47,38	47,64	48,65	48,85	48,59
0,34	78,68	91,22	95,58	96,53	96,08	95,06	88,64
0,50	118,37	132,07	134,66	134,52	133,95	132,14	124,01
0,68	161,87	172,46	172,41	171,06	170,19	167,22	161,48

Pour les grandes charges relatives amont, le maximum du débit est obtenu pour une faible valeur de rapport B_o/B_i , ce qui correspond l'optimum.

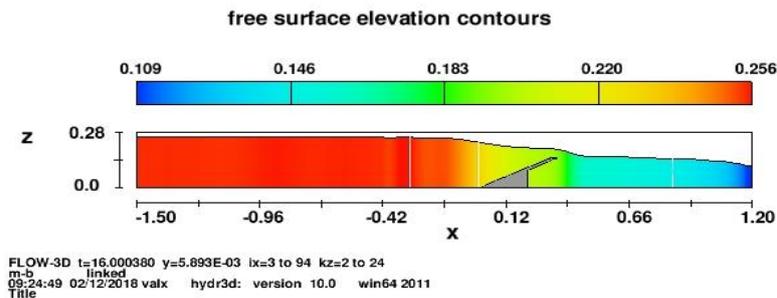
Afin d'étudier le comportement de l'écoulement sur le PK-Weir, une coupe longitudinale a été réalisée sur le domaine physique. Cette coupe permettra d'étudier la variation de la charge d'eau le long des canaux (amenée et sortie) et le déversoir. Le but de cette étude est de trouver des corrélations entre la charge d'eau, la longueur des porte-à-faux et la capacité d'évacuation. Les

contours qui représentent les variations du niveau de surface libre sont illustrés sur les figures suivantes (4.3, 4.4, 4.5 et 4.6) qui expriment les charges d'eau sue le PK-Weir.



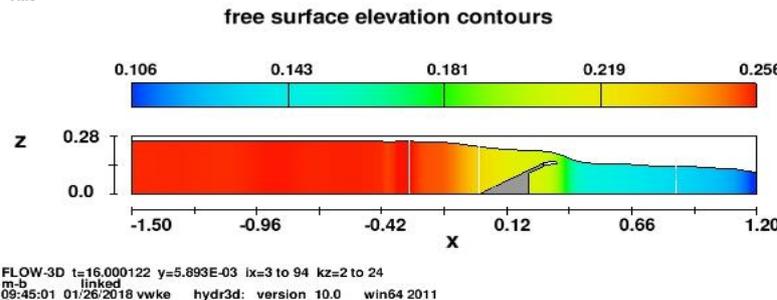
a : $B_o/B_i = 0$

1



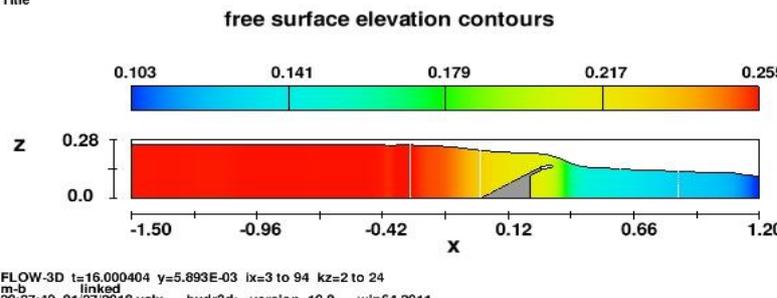
b : $B_o/B_i = 1$

1



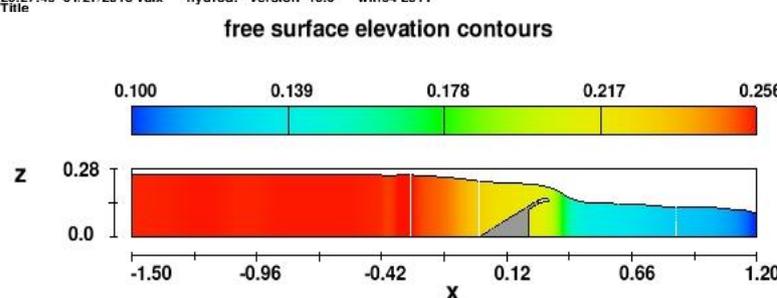
c : $B_o/B_i = 2$

1



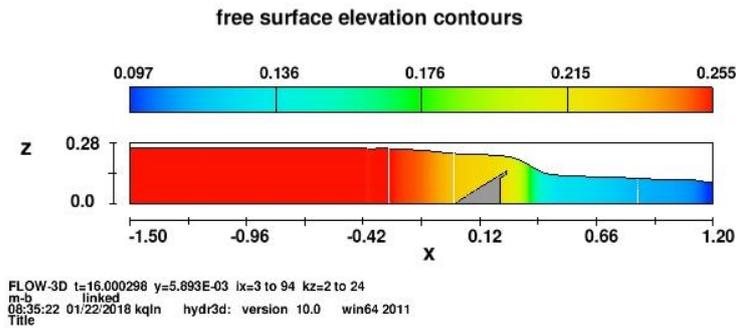
d : $B_o/B_i = 3$

1



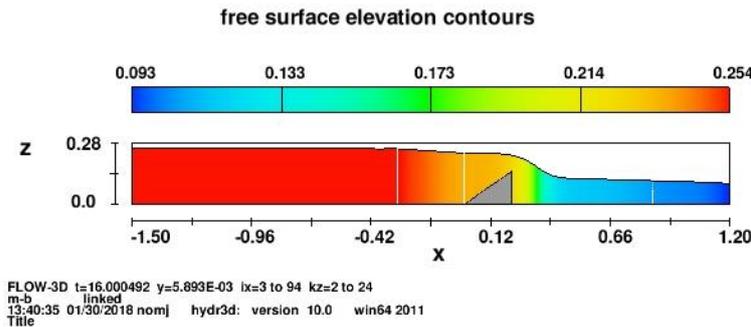
e : $B_o/B_i = 4$

1



f : $B_o/B_i = 6$

1

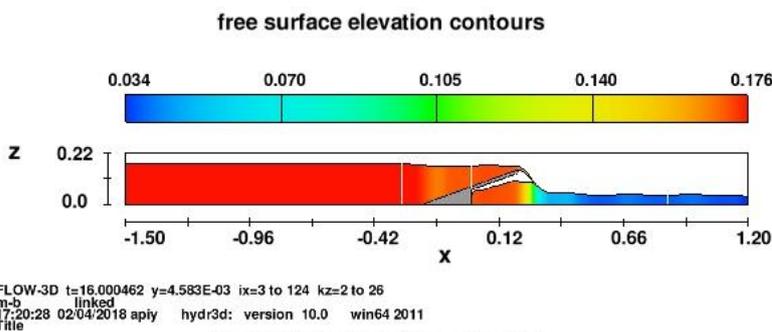


g : $B_o/B_i = \infty$

1

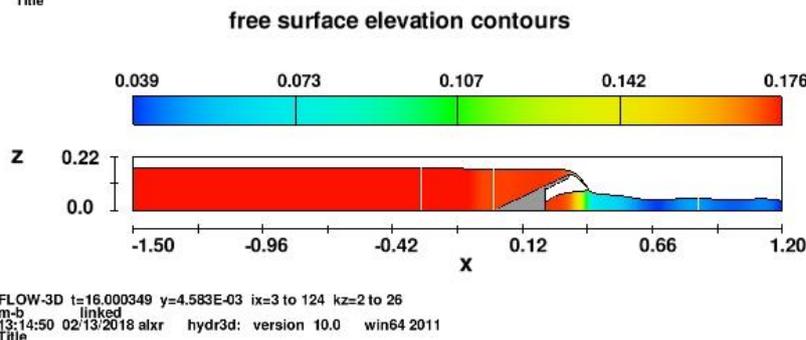
Figure 4.3: Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_{h/P=0.68}$).

Les contours de niveau de surface libre sur le PK-Weir dans les cas de grand charge $h/P = 0.68$ sont à l'extrémité de l'échelle, on aperçoit une zone orange (charge élevée) dans le cas où B_o/B_i est proche de l'infini. Cependant, la zone à forte amplitude diminue progressivement jusqu'à devenir jaune cela comme B_o/B_i s'approche de zéro. Ceci peut être expliqué par le fait que pour les grandes charges le porte-à-faux amont devient totalement immergé et par conséquent ne contribue que faiblement dans le processus alimentation / déversement.



a : $B_o/B_i = 0$

1



b : $B_o/B_i = 1$

1

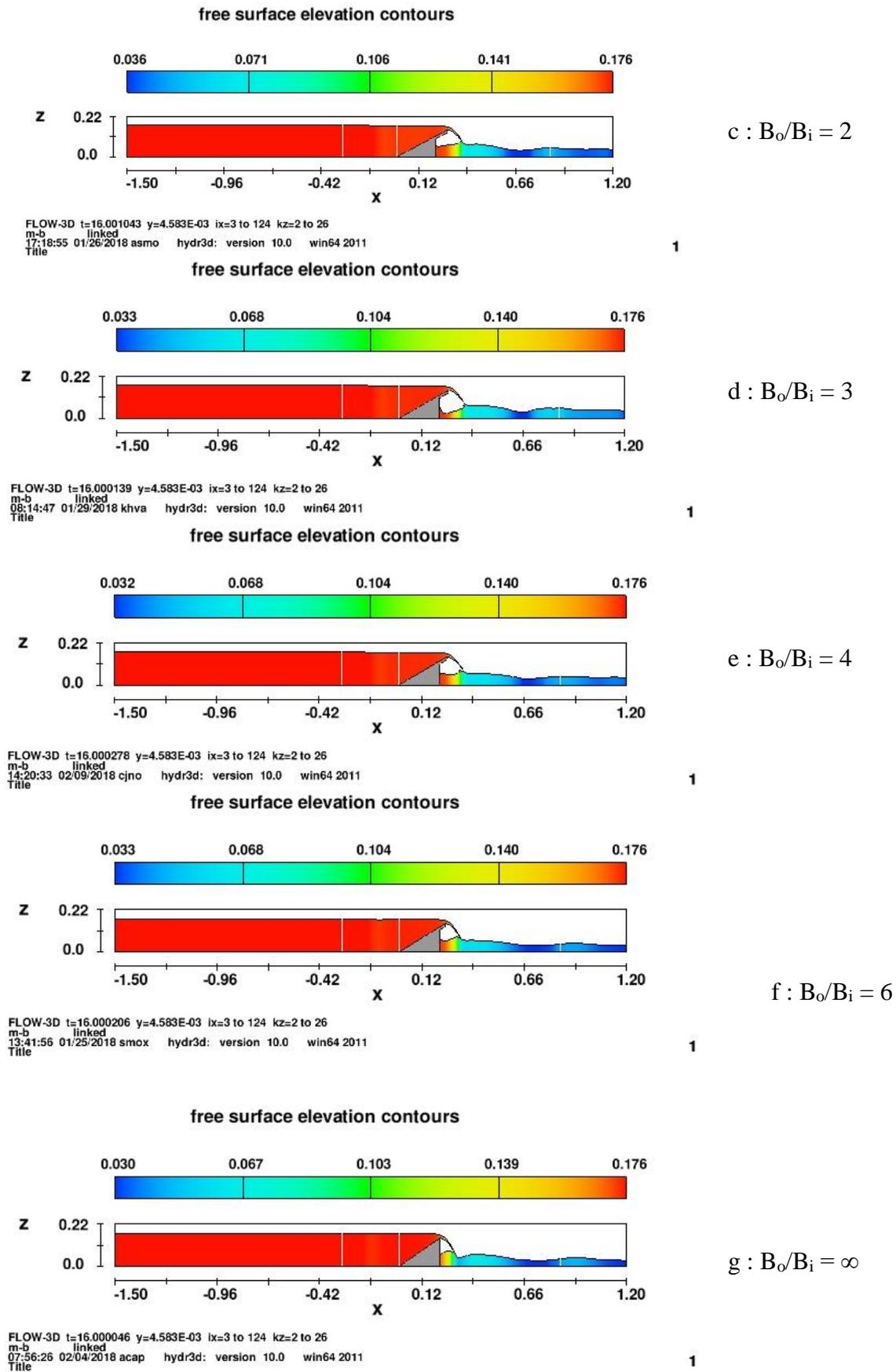
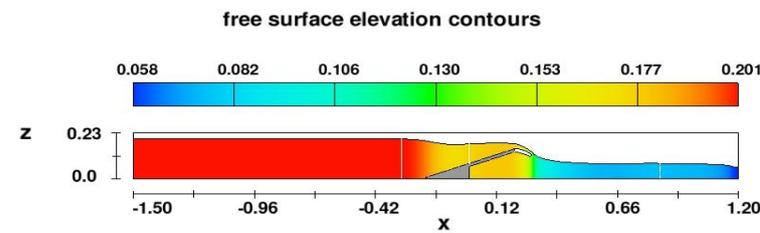


Figure 4.4. Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_h/P = 0.17$).

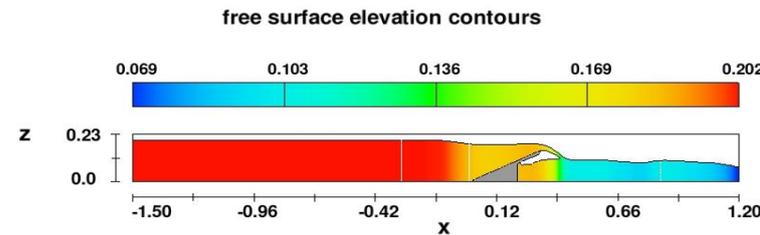
Par contre pour les faibles charges $h/P = 0.17$, on note que, la surface libre uniformément répartie le long de la crête de déversoir. De plus dans les cas de faible valeur de B_o/B_i , on constate une zone orange qui commence à augmenter doucement jusqu'à ce que B_o/B_i atteigne des grandes valeurs, la zone devient rouge. Ceci explique que pour les faibles charges, toute la longueur du porte-à-faux contribue à l'alimentation de l'aval et au fur et à mesure que la longueur des porte-à-faux amont augmente, le débit déversé augmente.



a : $B_o/B_i = 0$

FLOW-3D t=16.000019 y=5.893E-03 ix=3 to 94 kz=2 to 20
m-b linked
15:00:10 01/31/2018 onmc hydr3d: version 10.0 win64 2011
Title

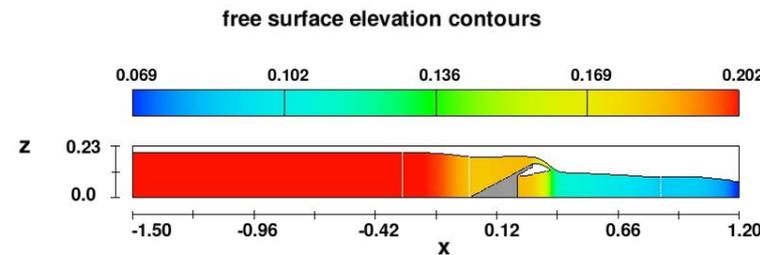
1



b : $B_o/B_i = 1$

FLOW-3D t=16.000010 y=5.893E-03 ix=3 to 94 kz=2 to 20
m-b linked
12:18:57 02/12/2018 moxf hydr3d: version 10.0 win64 2011
Title

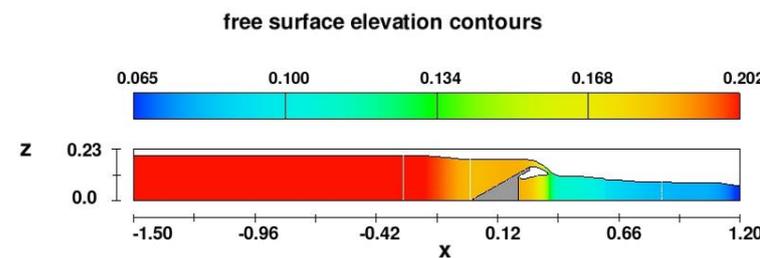
1



c : $B_o/B_i = 2$

FLOW-3D t=16.000174 y=5.893E-03 ix=3 to 94 kz=2 to 20
m-b linked
14:48:45 01/26/2018 opkh hydr3d: version 10.0 win64 2011
Title

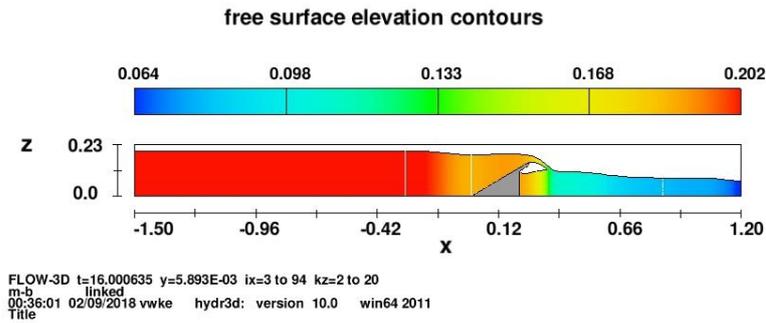
1



d : $B_o/B_i = 3$

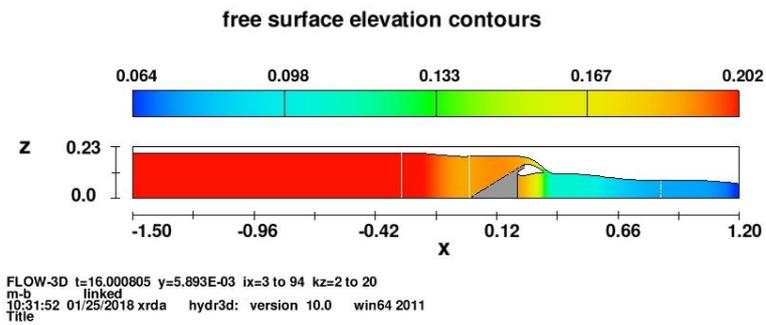
FLOW-3D t=16.000309 y=5.893E-03 ix=3 to 94 kz=2 to 20
m-b linked
06:43:43 01/29/2018 hqop hydr3d: version 10.0 win64 2011
Title

1



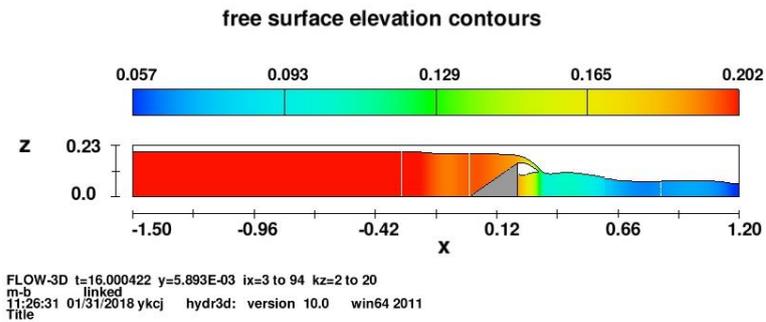
e : $B_o/B_i = 4$

1



f : $B_o/B_i = 6$

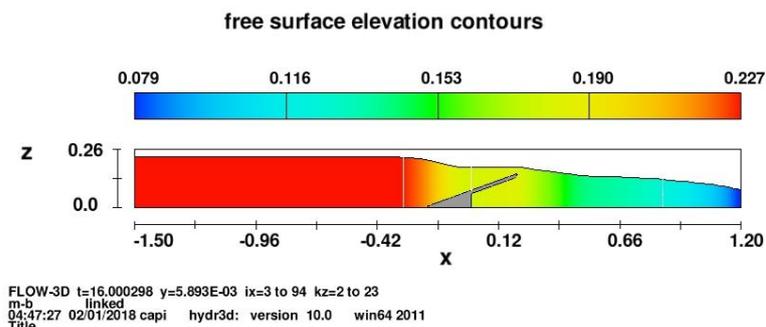
1



g : $B_o/B_i = \infty$

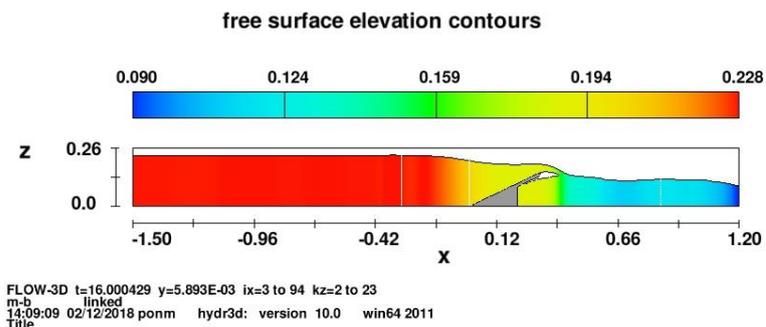
1

Figure 4.5. Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2$, $h/P = 0.34$).



a : $B_o/B_i = 0$

1



b : $B_o/B_i = 1$

1

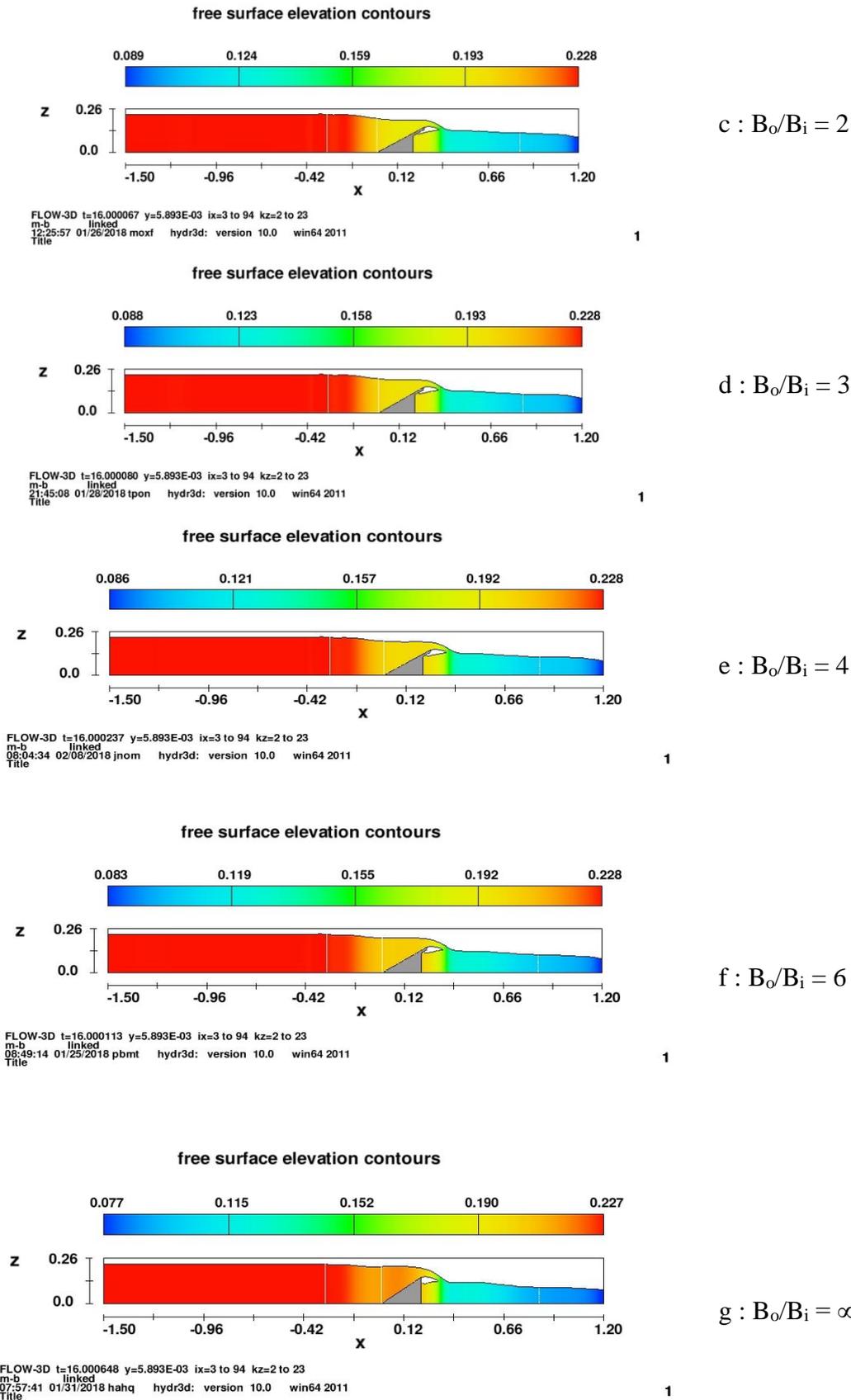


Figure 4.6. Contours de la charge d'eau sur le PK-Weir, ($W_i/W_o=1.2_h/P = 0.5$).

Pour les charges moyennes ($h/P = 0.3$ à 0.5), on observe dans les cas de la grande valeur de B_o/B_i une zone de fortes amplitudes qui diminue progressivement jusqu'à ce qu'ils deviennent jaunes pour des valeurs moyennes de B_o/B_i . Par suit, on observe aussi dans la valeur de $B_o/B_i=0$ une zone de faibles amplitudes. Ce comportement est expliqué comme suit :

Dans le cas d'un allongement total au partiel des porte-à-faux vers l'amont (grandes valeurs de B_o/B_i), ceci fait augmenter l'alimentation des alvéoles aval qui deviennent engorgées, ce qui provoque un encombrement pour l'écoulement sur le PK-Weir. Alors ceci nécessite un allongement des porte-à-faux vers l'aval pour permettre une augmentation de la partie qui contribue à l'évacuation.

Par contre, pour les cas où les porte-à-faux sont totalement allongés vers l'aval, la faible charge sur ces derniers est due au manque d'alimentation, qui est assuré par le porte-à-faux amont. Donc, cela nécessite une augmentation du rapport B_o/B_i . D'après les analyses précédentes, nous concluons que dans le cas de moyennes charges, l'alimentation et le déversement doivent être coordonnés.

On remarque que, pour chaque charge on obtient un débit maximum qui correspond à une valeur du rapport B_o/B_i comme suit :

- Pour $h=10.25$ cm, soit $h/P = 0.68$, l'optimum correspond à une valeur B_o/B_i égale à 1
- Pour $h=7.60$ cm, soit $h/P = 0.50$, l'optimum correspond à une valeur B_o/B_i égale à 2 (Figure 4.6).
- Pour $h=5.10$ cm, soit $h/P = 0.34$, l'optimum correspond à une valeur B_o/B_i égale à 3 (Figure 4.5).
- Pour $h=2.55$ cm, soit $h/P = 0.17$, l'optimum correspond à une valeur B_o/B_i égale à 6.

Cependant, de point de vue pratique, le PK-Weir est souvent dimensionné pour fonctionner sous des charges moyennes ($h/P = 0.3$ à 0.5), donc l'optimum du rapport B_o/B_i se situe entre deux et trois. Autrement dit, la configuration géométrique optimale du PK-Weir et celle qui est conçue avec un porte-à-faux amont qui fait deux ou trois fois la longueur du porte-à-faux aval.

Cette première analyse et cette méthodologie d'optimisation pourraient permettre de conclure que le dimensionnement des porte-à-faux amont (B_o) est inversement proportionnel à la charge (h).

4.2.2 Effet de la largeur des alvéoles

À partir des résultats obtenus dans la première partie, pour une valeur fixe de la largeur des alvéoles nous avons déterminé la longueur optimale des porte-à-faux. La question qui se pose, est ce qu'on peut déterminer la valeur optimale du rapport B_o/B_i pour une seule valeur de W_i/W_o ?

Pour cela, il faudrait vérifier si la variation de la largeur des alvéoles a un effet sur l'optimum de la longueur des porte-à-faux. Dans cette partie, nous choisissons quelques valeurs de W_i/W_o pour déterminer une combinaison entre B_o/B_i et W_i/W_o afin d'améliorer le rendement hydraulique du PK-Weir.

4.2.2.1 Résultats et discussion

Des simulations numériques ont été réalisées avec le code de CFD Flow-3D[®] dans les différentes configurations de PK-Weir.

Les graphes des figures 4.7, 4.8 et 4.9 mettent en évidence les combinaisons des rapports entre la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i) et la largeur des alvéoles (W_i/W_o). Le tableau 4.3 résume en détail les caractéristiques géométriques des différents modèles testés.

Tableau 4.3: Configurations et paramètres géométrique des combinaisons entre les rapports B_o/B_i et W_i/W_o

$\frac{W_i}{W_o}$	$\frac{B_o}{B_i}$	B [cm]	B_i [cm]	B_o [cm]	W_i [cm]	W_o [cm]	P [cm]
1	0		20.00	0.00	8.25	8.25	15.00
	1		10.00	10.00	8.25	8.25	
	2		13.33	6.67	8.25	8.25	
	3	41.33	15.00	5.00	8.25	8.25	
	4		16.00	4.00	8.25	8.25	
	6		17.14	2.86	8.25	8.25	
	∞		0.00	20.00	8.25	8.25	
1.2	0		20.00	0.00	9.00	7.50	15.00
	1		10.00	10.00	9.00	7.50	
	2		13.33	6.67	9.00	7.50	
	3	41.33	15.00	5.00	9.00	7.50	
	4		16.00	4.00	9.00	7.50	
	6		17.14	2.86	9.00	7.50	
	∞		0.00	20.00	9.00	7.50	
1.5	0	41.33	20.00	0.00	9.90	6.60	15.00

1	10.00	10.00	9.90	6.60
2	13.33	6.67	9.90	6.60
3	15.00	5.00	9.90	6.60
4	16.00	4.00	9.90	6.60
6	17.14	2.86	9.90	6.60
∞	0.00	20.00	9.90	6.60

Globalement, vingt-une configurations différentes ont été testées.

Dans chaque configuration, nous avons fait varier la charge d'eau entre quatre valeurs de charge qui correspondent pour des faibles, moyennes et fortes charges.

Comme a été dit précédemment, la longueur des porte-à-faux amont est inversement proportionnelle à la charge amont, on constate que toutes les courbes varient de la même manière. Cependant, pour chaque valeur W_i/W_o , le maximum de débit correspond à une valeur de B_o/B_i unique. Dans le cas où le rapport B_o/B_i est de faible valeur, on remarque que l'augmentation du rapport W_i/W_o est accompagnée d'un accroissement de la capacité d'évacuation. Par contre, pour les grandes valeurs de B_o/B_i , on observe que le débit atteint la valeur maximale lorsque le rapport W_i/W_o diminue. A titre d'exemple les graphes que l'on obtient pour $h = 7.6$ cm (Figure 4.7 à 4.8) montrent que :

- Dans le cas où B_o/B_i est égale à 1 et W_i/W_o augmente du 1 à 1.5 : le débit évacué augmente aussi.
- Dans le cas où B_o/B_i est égale à 6, l'alimentation des alvéoles aval augmente, ce qui nécessite des alvéoles aval plus larges, donc le rapport W_i/W_o diminue de la valeur 1.5 à 1.

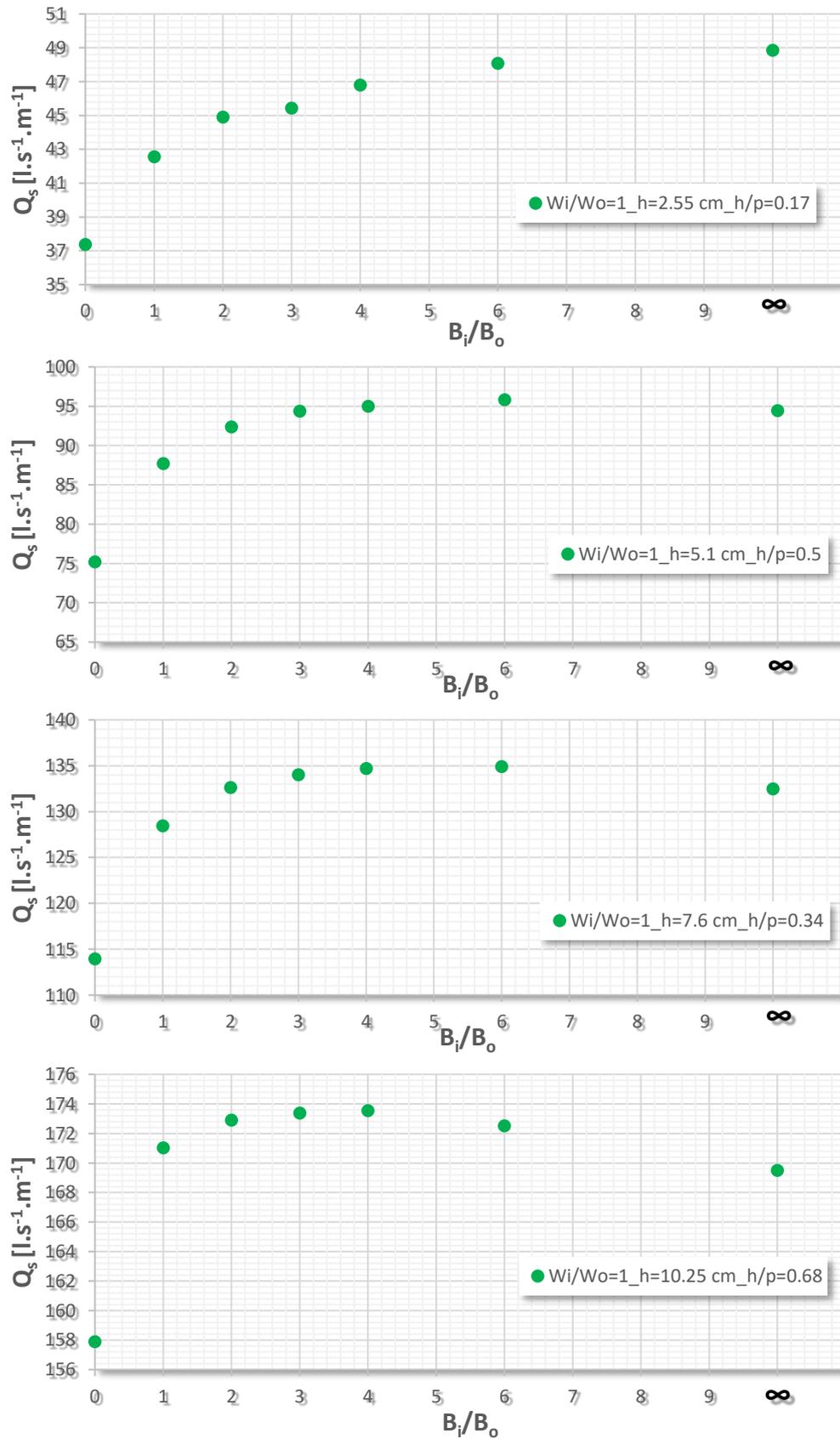


Figure 4.7: Débits spécifique Q_s calculées pour $W_i / W_o = 1$

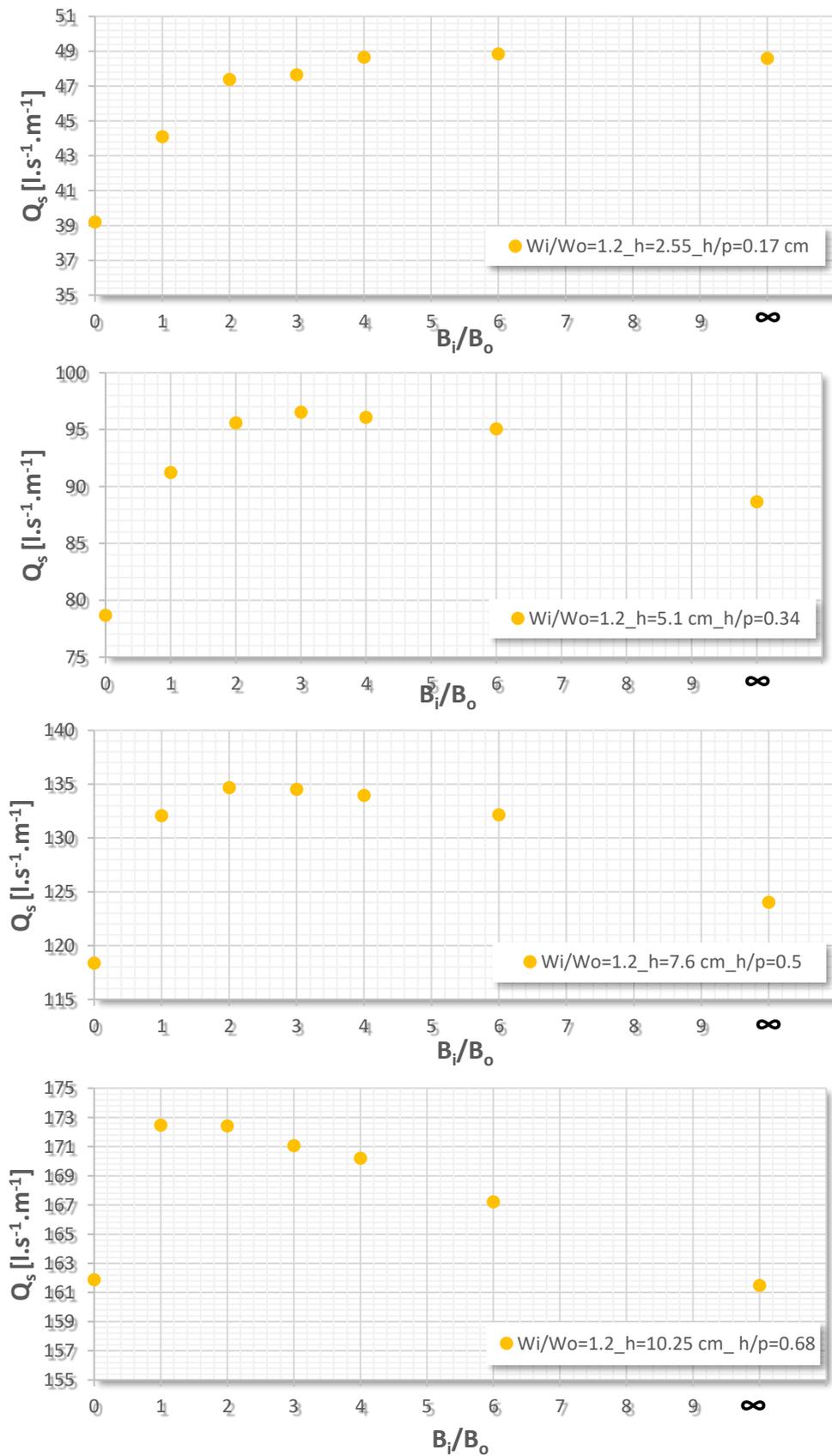


Figure 4.8: Débits spécifique Q_s calculées pour $W_i / W_o = 1.2$

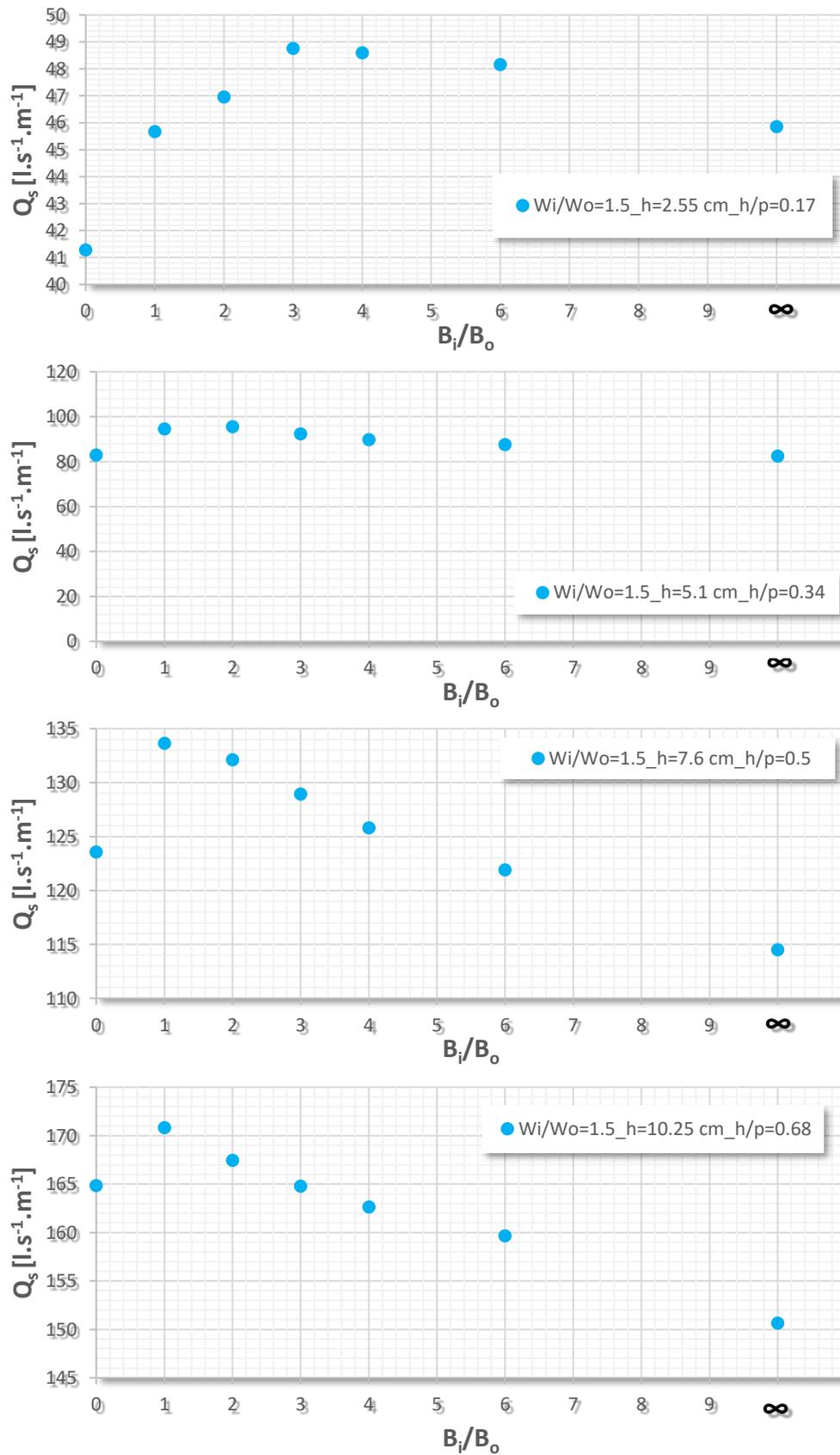


Figure 4.9: Débits spécifique Q_s calculées pour $W_i / W_o = 1.5$

Étant donné que les vingt et une configurations utilisés lors de notre étude sur l'influence des largeurs des alvéoles et la longueur des porte-à-faux ont abouti à des conclusions intéressantes, notamment au niveau du mode d'écoulement sur le PK-Weir. On a donc décidé de réaliser une étude du comportement de l'écoulement pour ces configurations. Ainsi, neuf configurations ont été choisies et trois sections transversales ont été réalisées dans chacune de ces configurations. La localisation de ces différentes sections pour chaque géométrie est montrée sur la figure 4.10.

Pour chaque géométrie, la première section notée « coupe AA » se trouve à l'entrée du PK-Weir au niveau des porte-à-faux amont. Une section a été réalisée à mi longueur des parois latérales « coupe BB ». La section « coupe CC » se situe à la sortie du déversoir (porte-à-faux aval). L'emplacement de ces sections est choisi pour obtenir une forme de surface libre de l'écoulement sur le PK-Weir. Cela revient à suivre la charge d'eau dans les alvéoles « Outlet / Inlet » du déversoir jusqu'à la sortie du modèle.

Les coupes représentées sur les figures ci-dessous indiquent que dans le cas où les porte-à-faux amont sont de faible longueur (par exemple $B_o/B_i = 1$ et $W_o/W_i = 1$), on remarque que le niveau de la surface libre dans les alvéoles des sorties est faible et on note aussi que l'augmentation de la largeur des alvéoles d'entrée (de $W_o/W_i = 1$ à 1.5) est accompagnée d'une augmentation de niveau d'eau dans les outlets ce qui résulte un accroissement de la capacité d'évacuation. Ceci peut s'expliquer par l'accroissement de l'alimentation qui est le résultat de l'élargissement de l'alvéole amont "Inlet" (figure 4.10).

Lorsque les porte-à-faux amont sont longs (par exemple $B_o/B_i = 6$ et $W_o/W_i = 1.5$), on constate que, la charge d'eau dans les alvéoles de sortie est très élevée et au fur et à mesure que la largeur des alvéoles de sortie augmente (jusqu'à $W_i/W_o = 1$), le niveau de surface libre diminue. Ceci peut être interprété par l'allongement du porte-à-faux vers l'amont qui fait augmenter l'alimentation des alvéoles aval, ce qui provoque un encombrement pour l'écoulement sur le PK-Weir. Alors ceci nécessite un accroissement de la largeur des alvéoles de sortie pour permettre évacuation du débit provenant des alvéoles d'entrée (Figure 4.12).

On conclue donc que le rapport de la longueur des porte-à-faux (B_o/B_i) est inversement proportionnel au rapport de la largeur des alvéoles (W_i/W_o)

Figure 4.10: Coupes Y-Z de l'écoulement sur le PK-Weir ($B_o/B_i=1$, $h/P=0.34$)

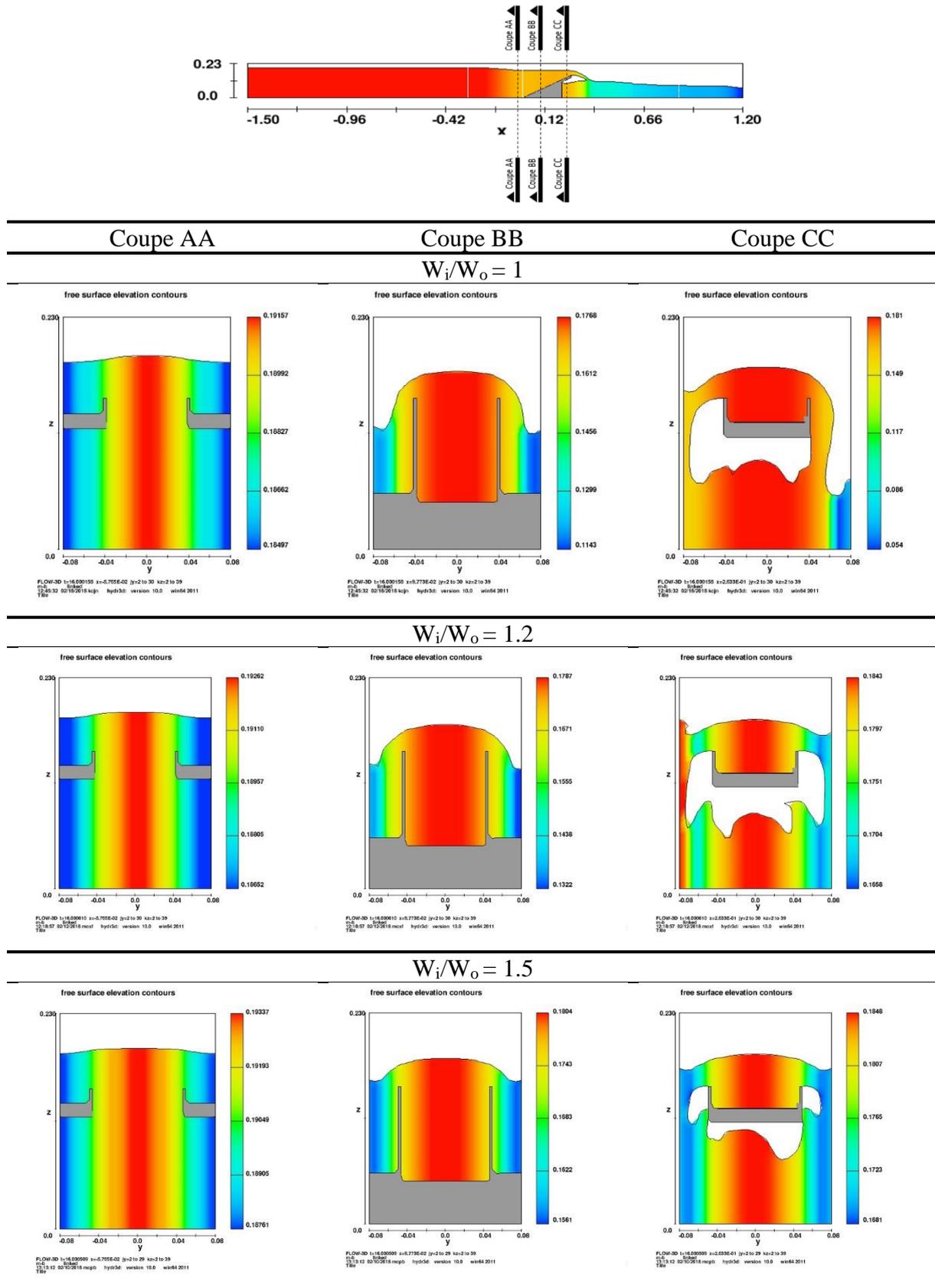
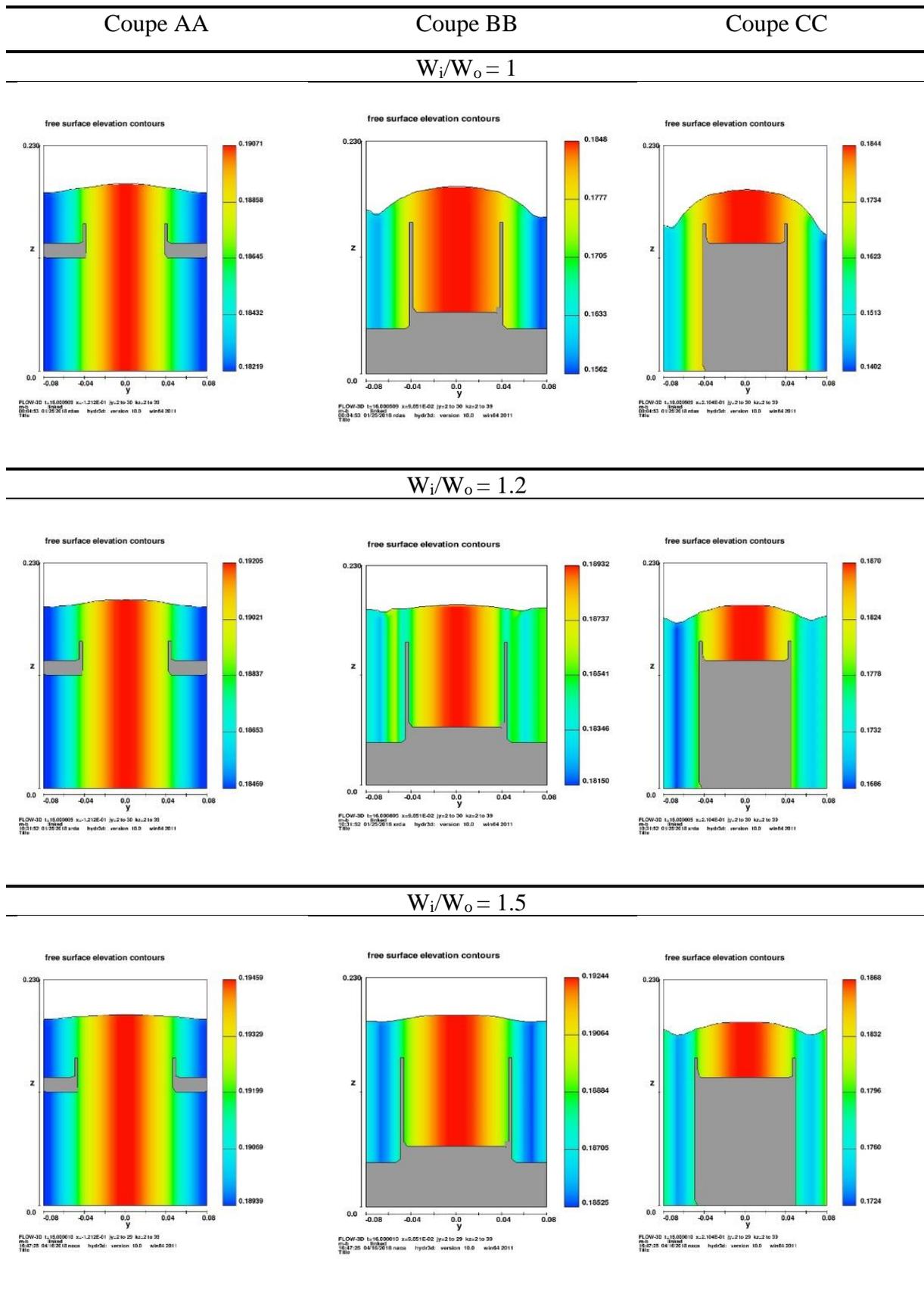


Figure 4.12: Coupes Y-Z de l'écoulement sur le PK-Weir ($B_o/B_i=6$, $h/P=0.34$)



4.3 Comparaison aux résultats expérimentale

Après avoir testé les vingt-une combinaisons, la validation des résultats numériques est essentielle. Dans cette phase trois configurations ont été choisies et testé dans la station expérimentale précédemment décrite dans la section 3.3.1. Une comparaison a été faite entre le débit mesuré expérimentalement et le débit calculé avec Flow-3D, en prenant en compte les différentes valeurs de débit (faible, moyen et grand).

Tableau 4.4: Configurations et paramètres géométriques des modèles choisis pour la validation expérimentale

n°	n	W [cm]	W_u [cm]	W_i [cm]	W_o [cm]	B [cm]	B_o [cm]	B_i [cm]	P [cm]	$\frac{W_i}{W_o}$	$\frac{B_o}{B_i}$
1	6	101.4	16.9	8.25	8.25	43.33	17.14	2.86	15	1	6
2	6	101.4	16.9	9	7.5	43.33	13.33	6.67	15	1.2	2
3	6	101.4	16.9	9.9	6.6	43.33	10	10	15	1.5	1



Figure 4.14: Modèle réduit n° 1



Figure 4.13: Modèle réduit n° 2



Figure 4.15: Modèle réduit n°3

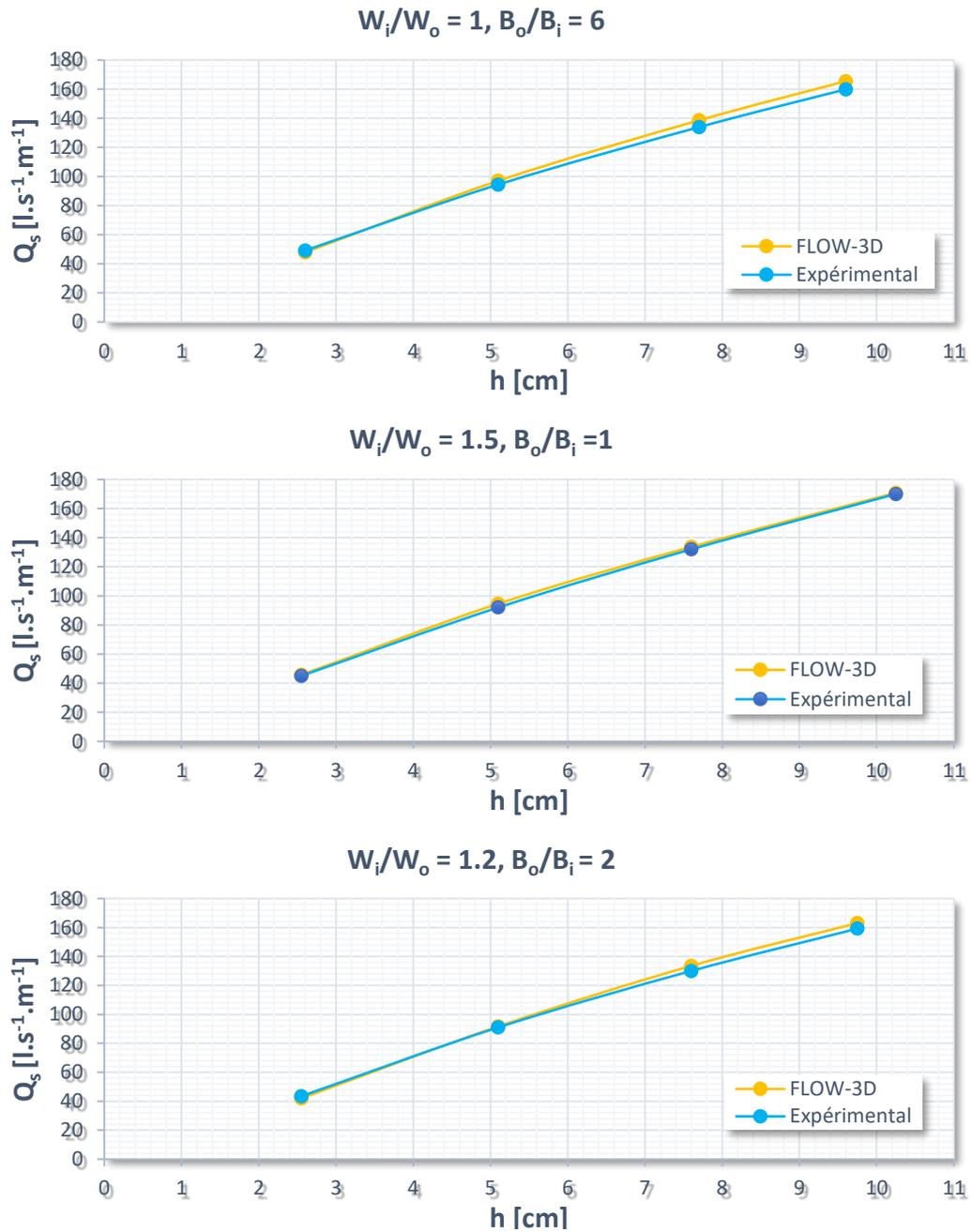


Figure 4.16: Résultats en débits spécifiques

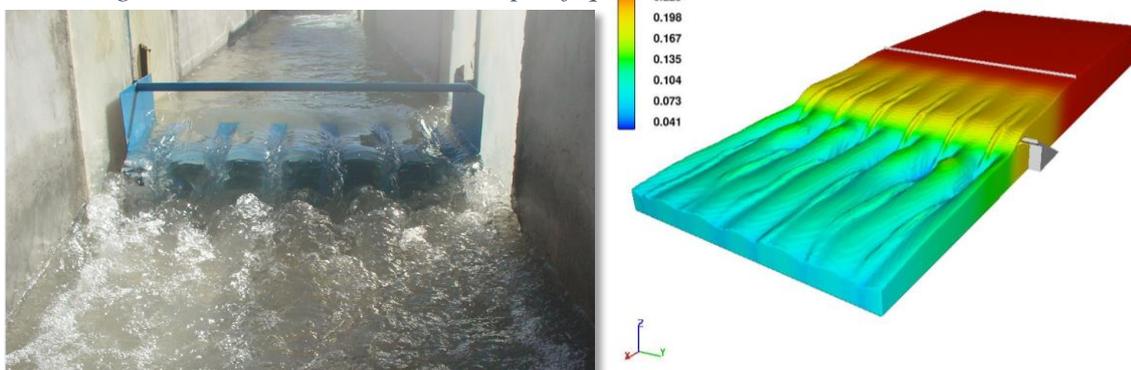


Figure 4.17: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

Le tableau 4.5 montre l'écart entre les valeurs de débit expérimental et le débit obtenu par voie de modélisation numérique. Le pourcentage d'erreur est calculé par la relation suivante :

$$Ecart (\%) = \frac{Q_s(\text{Expérimental}) - Q_s(\text{Numérique})}{Q_s(\text{Expérimental})} \times 100$$

Suite aux essais expérimentaux réalisées dans le cadre de la comparaison des débits mesurer avec les résultats des simulations, il ressort que désormais :

- Les débits calculés et mesurer sont très proche
- Les écarts maximaux varient entre -3.5 et +3.4 % et inférieure à 2.5% en moyenne.

Tableau 4.5: Comparaison entre les résultats (Q_s) physiques et numériques.

<i>PK-WEIR modèle n° 1</i>		<i>$W_i/W_o = 1, B_o/B_i = 6$</i>	
h	Q_s (Expérimental)	Q_s (Numérique)	Error
<i>cm</i>	<i>l/s.m</i>	<i>l/s.m</i>	%
2.55	49.12	47.79	2.7
5.1	94.41	96.97	-2.7
7.6	133.88	138.53	-3.5
9.6	159.88	165.45	-3.5
<i>PK-Weir modèle n° 2</i>		<i>$W_i/W_o = 1.2, B_o/B_i = 2$</i>	
h	Q_s (Expérimental)	Q_s (Numérique)	Error
<i>cm</i>	<i>l/s.m</i>	<i>l/s.m</i>	%
2.55	43.50	42.01	3.4
5.1	91.00	91.68	-0.7
7.6	130.00	133.49	-2.7
9.75	159.19	163.00	-2.4
<i>PK-Weir modèle n° 3</i>		<i>$W_i/W_o = 1.5, B_o/B_i = 1$</i>	
h	Q_s (Expérimental)	Q_s (Numérique)	Error
<i>cm</i>	<i>l/s.m</i>	<i>l/s.m</i>	%
2.55	45.00	45.67	-1.5
5.1	92.00	94.55	-2.8
7.6	132.00	133,65	-1.2
10.25	170.00	170.83	-0.5

D'après les résultats expérimentaux et numériques tridimensionnels, les simulations réalisées donnent des résultats très proches aux résultats expérimentaux. Cela correspond au fait que le modèle numérique établie est fiable.

4.4 Conclusion

Ce chapitre représente une contribution à l'étude de l'écoulement sur le PK-Weir par voies expérimentale et de modélisation numérique. Ce travail a été réalisé essentiellement par le biais du code Flow-3D[®]. La capacité de la modélisation à simuler tous les types de déversoir en PK-Weir a été démontrée. L'utilisation de cet outil numérique a permis de modéliser l'écoulement pour mieux comprendre le phénomène hydraulique et l'effet des paramètres géométriques.

Les résultats obtenus par voie de modélisation numérique ont montré que le meilleur rendement du PK-Weir est obtenu pour $W_i/W_o = 1.5$ et $B_o/B_i = 2$ pour des charges relatives pratiques h/P situé entre 0.3 et 0.5. Cependant, si le PK-Weir est conçu pour fonctionner sous des fortes charges ($h/P > 0.6$), le meilleur rendement est atteint pour un PK-Weir avec des porte-à-faux symétriques ($B_o/B_i = 1$, soit $B_o = B_i$). Ces résultats ont été confirmés par voie d'expérimentation sur modèles physiques.

Conclusion générale

1 CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail effectué est une contribution à l'étude de l'écoulement sur le PK-Weir par voies expérimentale et de modélisation numérique. Ce travail a été réalisé essentiellement par le biais du code Flow-3D. La capacité de la modélisation à simuler tous les types de déversoirs en PK-Weir. Pour mieux comprendre les phénomènes étudiés et pour atteindre les objectifs visés, le travail présenté a été scindé en trois parties.

Dans la première partie, nous avons attiré l'attention du lecteur sur les différents travaux réalisés durant les dernières années. Il apparaît que plusieurs classifications sont possibles parmi les évacuateurs de crues. On peut citer deux grandes classes, rectilignes et non rectilignes qui ont été présentés dans cette étude.

Dans cette thèse, on s'est intéressé particulièrement à l'optimisation du modèle numérique et à la validation des modèles que nous avons présentés dans la deuxième partie.

La dernière partie de notre travail a été consacrée à l'optimisation du PK-Weir par le biais du modèle numérique optimisé. Ceci permet de simuler les écoulements sur le déversoir et d'étudier leur comportement hydraulique.

En premier lieu, un état de l'art sur quelques types de déversoirs a été présenté. L'étude bibliographique a montré que le déversoir en touche de piano se caractérise par une forme de crête non rectiligne permettant d'augmenter la longueur du seuil d'une manière significative pour une largeur donnée. Par conséquent, la capacité d'évacuation croît proportionnellement avec l'augmentation de la longueur du seuil. Cette configuration du seuil non rectiligne engendre un écoulement différent de celui d'un déversoir rectiligne. Ainsi, l'écoulement sur le PK-Weir est défini par un écoulement caractérisé par deux nappes distinctes, la première sous forme d'un écran de surface et la seconde sous forme d'un jet de fond en fonction de la charge sur le seuil du déversoir. Cette étude a montré aussi que peu d'intérêt a été donné à la modélisation numérique du PK-Weir, seul quelques travaux ont été réalisés par EDF.

En second lieu, une description des principales étapes de la modélisation numérique avec le code de calcul Flow-3D® dans le cadre de modélisé l'écoulement sur le PK-Weir a été réalisée. Cette phase a été suivie par une optimisation du modèle numérique dans le but de le rendre plus rentable. Enfin, une vérification de la validité du modèle optimisé a été conduite.

Deux étapes de la modélisation numérique de l'écoulement sur le PK-Weir ont été optimisées. Tout d'abord, un modèle numérique du PK-Weir avec un seul élément a été proposé. Celui-ci est constitué d'une outlet et une inlet dans le but de réduire la largeur du modèle (réduction du nombre de cellules du maillage). Ce modèle a été comparé à un modèle avec six éléments. Le modèle proposé s'est avéré efficace, d'une part la précision des résultats et d'autre part le faible temps de calcul. Ensuite, deux configurations de maillages ont été testé. La configuration multi-bloc s'avère être celle retenue pour son faible temps de simulation. Ainsi, le temps de calcul le plus faible va permettre un nombre plus important de variation de géométrie sur les PK-Weirs. Dans la dernière phase de cette partie, nous avons validé les étapes optimisées. Chaque modèle a été testé et validé par des comparaisons avec des résultats expérimentaux.

En dernier lieu, nous avons appliqué la démarche de modélisation 3D élaborée dans la partie précédente sur les tests des modèles de PK-Weir. Les résultats des simulations ont donné, pour chaque charge d'eau sur le PK-Weir une configuration optimale.

Les résultats obtenus par voie de modélisation numérique ont montré que le meilleur rendement du PK-Weir est obtenu pour $W_i/W_o = 1.5$ et $B_o/B_i = 2$ pour des charges relatives pratiques h/P situé entre 0.3 et 0.5. Cependant, si le PK-Weir est conçu pour fonctionner sous des fortes charges ($h/P > 0.6$), le meilleur rendement est atteint pour un PK-Weir avec des porte-à-faux symétriques ($B_o/B_i = 1$, soit $B_o = B_i$). Ces résultats ont été confirmés par voie d'expérimentation sur modèles physiques.

La modélisation 3D à l'aide du code CFD Flow-3D est donc un outil performant pour le prédimensionnement du PK-Weir, elle représente un outil plus économique de point de vue coût et temps d'exécution que l'expérimentation sur modèle physique. Mais ne peut en aucun cas être une solution de remplacement du modèle physique.

Bibliographie

1. Anderson R.M." *Piano key weir head discharge relationships*". Thèse de Master en sciences dans Génie civil et de l'environnement, Université de UTAH STATE, 2011.
2. Athmani B. : " *Analyse expérimentale et numérique du déversoir en touche de piano « PK-Weir »*". Thèse du Magister en Hydraulique, Université de Biskra, 2014.
3. Athmani B. et Ouamane A. : "*Modélisation numérique de l'écoulement sur le Pk-Weir*", 1^{ier} Colloque International Sol, Eau et Environnement (CISEE'2014) Annaba le 10 et 11 novembre 2014.
4. Athmani B. et Ouamane A.: "*Optimization of the piano key weir by numerical modeling and experimental validation analyses*". International Journal on Hydropower & Dams Vol. 26 - Issue 2, 2019.
5. Athmani B., Belaabed F., Ouamane A., et Layadi A.: "*Effect of submerged by the downstream level on the performance of piano key weir (pk-weir)* ", Le journal de l'eau et de l'environnement LJEE, N°27, 2015.
6. Athmani B., Sekkour I., Layadi A., et Ouamane A. : " *Optimisation de la Modélisation Numérique de l'Écoulement sur le Piano Keys Weir (PK-Weir)* ", Première Conférence Internationale sur les Barrages ICD, Biskra 2018.
7. Barcouda M., Cazaillet O., Cochet P., Jones B. A., Lacroix S., Laugier F., Odeyer C. et Vigny P.J.: "*Cost effective increase in storage and safety of most dams using fuse gates or PK-Weirs*". Vingt deuxièmes congrès des grands barrages, Barcelona, 2006.
8. Belaabed F., Athmani B., Ouamane A., et Layadi A." *Study of the influence of submergence on the upstream flow of Piano Key Weir*". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW III, 83-90. London: CRC Presse. 2017.
9. Belaabed F., Ouamane A. : « *Etude de déversoir Piano Key Weir noyés par l'aval*. International Symposium for water management and desertification, Istanbul, 2014.
10. Belaabed F., Ouamane A.: "*Effect of the Downstream Level on the Performance of the PK-Weir and Linear Weir*", 5th International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Liege, Belgium, 2015.
11. Belaabed F. : " *Contribution à l'étude des déversoirs en touche de piano (PK-Weir) noyés par l'aval* ". Thèse du Magister en Hydraulique, Université de Biskra, 2011.

12. Belaabed, F., Ouamane A.: “*Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level*”, Labyrinth and Piano Key Weirs I. pp. 89-95. 2011.
13. Belaabed, F., Ouamane A.: “*Submerged flow regimes of PK-Weir*”, Labyrinth and Piano Key Weirs II, pp 85-92. 2013.
14. Ben said, M. : « *Etude de l’optimisation des évacuateurs de crues en labyrinthe* », Mémoire de Magister en Hydraulique, université de Med Khider. Biskra, 2008.
15. Ben Saïd, M., et Ouamane A.: “*Study of optimization of labyrinth weir*”, Labyrinth and Piano Key Weirs, pp 67-74, 2011.
16. Blancher B., Montarros F., Laugier F. "Hydraulic comparison between piano-keys weirs and labyrinth spillways". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 141-150.London: CRC Press. 2011.
17. Bremer F.L. et Oertel M.: “*Numerical investigation of wall thickness influence on Piano Key Weir discharge coefficients: A preliminary study*”, Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW III, 101-108. London: CRC Presse. 2017.
18. Bruce M. Savage B.M. et Michael C.J.: “*Flow over ogee spillway: physical and numerical*” Journal of Hydraulic Engineering, 127, P: 640-649. AUGUST 2001.
19. Cicero G. M., Delisle J.R., Lefebvre V. et Vermeulen J.: " *Experimental and numerical study of the hydraulic performance of a trapezoidal Piano Key Weir*". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW II 2013, 265-272.London: CRC Press. 2014.
20. Crookston B.M., Paxson G. S. et Savage B. M.: “*Hydraulic performance of labyrinth weirs for high headwater ratios*”, 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, Portugal, 9-11 February 2012.
21. Crookston B. M., Anderson R.M. et Tullis B.P.: “*Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries*”, Journal of Hydro-environment Research, 160-167, 2017.
22. David K.H. Ho, Boyes K.M. et Donohoo S.M.:” *Investigation of Spillway Behaviour under Increased Maximum Flood by Computational Fluid Dynamics Technique*”. 14th Australasian Fluid Mechanics Conference Adelaide University, Adelaide, Australia 10-14 December 2001.
23. David K.H. Ho, Boyes K.M., Donohoo S.M. et Brian C.:” *Numerical flow analysis for spillways*”. 43rd ANCOLD Conference Hobart, Tasmania, 24-29 October 2003.
24. Erpicum, S., Machiels, O., Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M. (2011). Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano Key Weir – Experimental study. Labyrinth and Piano Key Weirs -PKW2011, London: CRC Presse, Pp. 105-111 2011.

25. Erpicum, S., Machiels, O., Dewals, B., Archambeau, P. & Piroton, M.: "*Considerations about the optimum design of PKW*", Proc. of the Int. Conf. Water Storage and Hydropower Development for Africa, Addis Ababa, Ethiopia, 2013.
26. Flow Science Inc, "Flow-3D version 10.0 user's manual", SanataFe, N.M., 2011.
27. Guillaume B., Vincent S., Caltagirone J.P. & Meillot E. : " *Utilisation d'une méthode de suivi d'interface mixte eulérienne/lagrangienne pour les écoulements diphasiques*". 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.
28. Hager H. et Schleiss A.J. : "*Constructions Hydrauliques – écoulements stationnaires*", Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Vol 15, 2009.
29. Han H., Zhongdong Q., Wei Y., Dongmei H. et Lan D.: "*Numerical study of characteristics and discharge capacity of piano key weirs*", Flow Measurement and Instrumentation 62 27–32, 2018.
30. Hirt C.W., Nichols B.D. et Romero N.C.: "*SOLA - a numerical solution algorithm for transient fluid flows*", (Los Alamos Scientific Laboratory report LA-5852, 1975.
31. Hirt, C.W., Ramshaw J.D. et Stein L.R.: "Numerical simulation of three-dimensional flow past bluff bodies", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 14. 93-124, 1978.
32. Hirt, C.W. et Nichols, B.D., «*Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*», Journal of Computational Physics 39, 201-225 1981.
33. Ho Ta Khanh M., Hien T.C., Pinchard T. et Pralong J.: "*Utilizations of Piano Key weirs for low barrages*", Bilbao, Spain Hydro 2012.
34. Laiadi A. : "*Étude de l'écoulement sur le déversoir en touches de piano en absence de la contraction latérale*", Thèse de doctorat LMD en Hydraulique, université de Med Khider. Biskra, 2018.
35. Laugier F. Guyot G., Vamentte E., Blancher B. et Arnaud O. : "*Utilisation industrielle de la modélisation hydrodynamique 3D pour l'évaluation de la débitance d'un évacuateur*". La Houille Blanche, N° 2, 2010, pp. 36-46.
36. Laugier F. Pralong J., et Blancher B.: "*Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spillway discharge capacity*", Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 159-165. London: CRC Presse. 2011.
37. Laugier F., Guyot G., Valette E., Blancher B., Oguic A. et Lincker L. : "*Utilisation industrielle de la modélisation hydrodynamique 3d pour l'évaluation de la débitance d'un évacuateur*", Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues » Paris, 20-21 janvier 2009.

38. Laugier F., Pralong J., Blancher B. "*Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spillway discharge capacity*". Labyrinth and Piano Key Weirs -PKW2011, 159-165. London: CRC Presse. 2011.
39. Layadi A., Athmani B., Belaabed F. et Ouamane A.: "*Study of the influence of submergence on the upstream flow of Piano Key Weir*". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW III, 93-100. London: CRC Presse. 2017.
40. Layadi A., Sekkour I., Athmani B., et Ouamane A. : "*Optimisation de la géométrie du déversoir en touche Piano*", Première Conférence Internationale sur les Barrages ICD, Biskra 2018.
41. Leite Ribeiro M., Pfister M. et Schleiss M.J.: «*Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations*». Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW II 2013, 273-281. London: CRC Presse. 2014.
42. Leite R.M., Pfister M. et Schleiss A.J.: «*Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs*». Journal of Hydraulic Research Vol. 50, No. 4 (2012), pp. 400–408.
43. Lempérière F., Ouamane A.: "*The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways*". The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Four. 2003.
44. Lemperiere F., Vigny J." *International symposium on Dam safety*". Analysis and low-cost mitigation of the flood risk of Asian dams, Xian.2005.
45. Lemperiere F., Vigny J. : "*Economie et sécurité des déversoirs du Burkina Faso*". 1^{er} congrès national des barrages Burkina Faso. 2006.
46. Machiels O, Erpicum S., Archambeau P, Benjamin D. et Piroton M. :"*Analyse expérimentale de l'influence des largeurs d'alvéoles sur la débitance des déversoirs en touches de piano*". La Houille Blanche, N° 2, 2010, pp. 22-28.
47. Nichols B.D., et Hirt C.W.: "*Improved Free Surface Boundary Conditions for Numerical Incompressible-Flow Calculations*", Journal of Computational Physics 8, 434-448, 1971.
48. Nichols B.D., et Hirt C.W.: "*Calculating Three-Dimensional Free Surface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures*", Journal of Computational Physics 12, 234-246, 1973.
49. Noui A. et Ouamane A. :"*Etude de l'optimisation de l'évacuateur de crues en touches de piano (PK-Weir)*". Mémoire Magister en Hydraulique, Université de Biskra. 2007.
50. Noui A. et Ouamane A.: "*Study of optimization of the Piano Key Weir*". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 175-182.London: CRC Press. 2011.

51. Oertel M.: “*Discharge coefficients of piano key weirs from experimental and numerical models*”, E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands, 28 June – 3 July 2015.
52. Ouamane A.: “*A new cost-effective solution for must spillways*”. Al-Azhar University, 2005.
53. Ouamane A.: “*Hydraulic and Costs data for various Labyrinth Weirs*”, Q 84, 22^{ème} Congrès International des Grands Barrages. Barcelona. Spain, 2006.
54. Ouamane A., Lempérière F. : “*Nouvelle conception de déversoir pour l’accroissement de la capacité des retenues des barrages*” Colloque International sur la protection et la préservation des ressources en eau, Blida. 2006.
55. Ouamane A., Lempérière F. : “*Amélioration de la forme des déversoirs en labyrinthe pour l’évacuation des grands débits*”. Séminaire National sur les ressources en eaux et leurs utilisations, Centre Universitaire Khemis Meliana. 2006.
56. Ouamane A., Lempérière F.: “*Design of a new economic shape of weir*”, International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century. Barcelona, Spain, pp. 463-470, 2006.
57. Ouamane A., Lempérière F. : « *Amélioration du rendement des évacuateurs de crues en labyrinthe* », 2^{ème} Colloque International Eau et Environnement, ENSH, Blida, 2007.
58. Ouamane A., Lempérière F.: “*Increase of the safety of existing dams - Rehabilitation of weir*”. Symposium: Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams» ICOLD 75th Annual Meeting Saint Petersburg, Russia. 2007.
59. Ouamane A., Lempérière F.: “*Increase of the safety of existing dams - Rehabilitation of weirs*”, Symposium: Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams. ICOLD 75th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Saint Petersburg, Russia, 2007.
60. Ouamane A., Lempérière F. : « *Nouvelles solutions économiques permettant l’accroissement de la capacité des retenues des barrages existants* », Séminaire National l’Eau dans son Environnement SNEE, Blida, 2008.
61. Ouamane A., Lempérière F.; “*The Piano Key Weir is the solution to increase the capacity of the existing spillways*” Progressing World Hydro Development. Conference International, Ljubljana, Slovenia, HYDRO 2008.
62. Ouamane A. “*Dam engineering in Algeria: progress, needs and prospects*”, The International Journal on Hydropower & Dams, Volume 16, Issue Six, 75-79, 2009.

63. Ouamane A. : « *Étude de l'effet de la géométrie et des conditions d'écoulement aval sur la performance du PK-Weir* », Séminaire International sur les déversoirs en touches de piano, Lyon. France, 2009.
64. Ouamane A. : « *Amélioration de la forme de déversoir en labyrinthe pour mieux gérer le passage des crues exceptionnelles* ». 5^{ème} Conférence Internationale sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen, Watmed 5, Lille- France, 2010.
65. Ouamane A., Ben Said M., 2010. “*Economic conceptions of the labyrinth weir allowing the improvement of the management of floods and the increase of the useful capacity of the reservoir*”, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Germany, pp 303-311. N° 158, 2010.
66. Ouamane A., Lempérière F.: “*Study of various alternatives of shape of piano key weirs*», conference International, - Meeting Demands in a Changing World, Lisbon, Portugal, HYDRO 2010.
67. Ouamane A. "Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra Lessons and reflections". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 51-58. London: CRC Presse. 2011.
68. Ouamane A. (Keynote lectures): “*Improvement of labyrinth weirs shape*”. Labyrinth and Piano Key Weirs, pp 15-22. 2013.
69. Ouamane A., Debabeche M., Lempérière F., et Vigny J.P., "Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra Lessons and reflections". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKWIII, 51-58. London: CRC Presse. 2017.
70. Oukid Y., Libaud V. and Daux C.: “*3D CFD modelling of spillways: Practical feedback on capabilities and challenges*”, International Journal on Hydropower & Dams Vol. 22 - Issue 6, 2015.
71. Patankar, S. V. "Numerical heat transfer and fluid flow". Series in Computational and Physical Processes in Mechanical and Thermal Sciences, Taylor and Francis, 1980.
72. Paxson G. S. et Savage B.M.: “*Labyrinth spillways: comparison of two popular U.S.A. design methods and consideration of non-standard approach conditions and geometries*”, International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, J. Matos and H. Chanson (Eds), Report CH61/06, Div. of Civil Eng., The University of Queensland, Brisbane, Australia, 2006.
73. Pfister M. et Schleiss M.J." *Comparison of hydraulic design equations for A-type Piano Key weirs*". Conf. Stockage de l'eau et le développement de l'hydroélectricité pour l'Afrique, Addis Ababa, Ethiopia, 16-18 Avril 2013.

74. Poitevin J.M. : "*Outils mathématiques pour physiciens et ingénieurs*". Dunod, Paris, 2012.
75. Pralong J., Montarros F., Blancher B. et Laugier F.: "A sensitivity analysis of Piano Key Weirs geometrical parameters based on 3D numerical modeling", Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 133-139. London: CRC Presse. 2011.
76. Ranald V.G., Jack B.E. et Cheng L. : "Série Schaum - Mécanique des Fluides et Hydraulique" McGraw-Hill, Inc., Paris, 1975.
77. Robbe R., Sparks D. : "Calcul de la courbe de capacité des pertuis de fond du barrage Matawin avec Flow-3D". La Houille Blanche, N° 2, pp. 29-35, 2010
78. Sadegh D.B. et Parsaie A.: "Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran ", Alexandria Engineering Journal 55, 467–473, 2016.
79. Safarzadeh A. et Noroozi B.: "3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways", International Journal of Civil Engineering Volume 15, Issue 1, pp 89–101, 2017.
80. Savage B., Frizell K. et Crowder J.: "Brains versus Brawn: The Changing World of Hydraulic Model Studies", 2004.
81. Savage B.M., Crookston B.M., et Paxson G.S.: "Physical and Numerical Modeling of Large Headwater Ratios for a 15° Labyrinth Spillway", American Society of Civil Engineers, 2016.
82. Schleiss A.J.: "From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review". Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 3-15. London: CRC Press. 2011.
83. Sekkour I. : " Contribution à l'étude des déversoirs auto-stables", Mémoire de Magister en Hydraulique, université de Med Khider. Biskra, 2016.
84. Sekkour I., Athmani B., Layadi A., et Ouamane A. : " Blocs fusibles et PK-Weir, Solution future pour l'accroissement du stockage et l'évacuation des crues (Etude théorique et expérimentale) ", Première Conférence Internationale sur les Barrages ICD, Biskra 2018.
85. Voronetska K. : "Simulation numérique directe des écoulements à phases dispersées". Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 2012.