

UTILISATION INDUSTRIELLE DE LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE 3D POUR L'EVALUATION DE LA DEBITANCE D'UN EVACUATEUR

Engineering use of hydrodynamic 3D simulation to assess spillway discharge capacity

Frédéric Laugier⁽¹⁾, Grégory Guyot⁽²⁾, Eric Valette⁽³⁾, Benoît Blancher⁽⁴⁾, Arnaud Oguic⁽⁵⁾, Lily Lincker⁽⁶⁾

(1), (2), (3), (4), (5) EDF-CIH, Savoie-Technolac, 73 393 Le-Bourget-Du-Lac, France

Tél: +33 4 79 60 60 60, Fax: +33 4 79 60 62 31

e-mail: ⁽¹⁾frederic.laugier@edf.fr, ⁽²⁾gregory.guyot@edf.fr, ⁽³⁾eric.valette@edf.fr, ⁽⁴⁾benoit-externe.blancher@edf.fr

⁽⁵⁾oguica@eleves.enpc.fr, ⁽⁶⁾lili.lincker@insa-lyon.fr

Jusqu'à présent, la représentation fine des phénomènes hydrauliques complexes a essentiellement fait appel à la modélisation physique par le biais de la réalisation de coûteux modèles réduits hydrauliques. Selon les lois de similitude adoptées, ces derniers permettent d'appréhender certains phénomènes physiques complexes comme les écoulements tridimensionnels, les problématiques de débitance et d'amortissement d'énergie, les transports solides...

L'approche de ces phénomènes hydrauliques complexes par le calcul s'est graduellement développée depuis une vingtaine d'années. D'abord réservés aux centres de recherches et aux universités, les outils de calcul ont progressivement évolué pour être aujourd'hui utilisables à un stade industriel par des sociétés d'ingénierie grâce à la croissance exponentielle des capacités de calculs des PC et aux progrès des logiciels de modélisation tant en matière d'interface utilisateur, de convivialité, qu'en matière de méthodes de calculs.

Dans ce contexte, cet article présente un certain nombre de résultats issus de simulations numériques réalisées avec le logiciel Flow3D®, pour l'évaluation de la débitance des évacuateurs de crue. Les résultats obtenus sont très prometteurs puisque les corrélations obtenues par comparaison avec des données issues de la littérature ou de modèles physiques récents sont très bonnes, souvent inférieures à 5%, voire moins pour les seuils profilés.

En conclusion, l'utilisation de codes d'éléments finis 3D comme Flow3D®, peut être dès à présent, une alternative à la réalisation de certains modèles réduits physiques simples. Pour les configurations plus complexes, il sera un complément extrêmement utile à l'exploitation du modèle physique, grâce à la rapidité et au faible coût d'implémentations de modifications d'optimisation du modèle. En outre, une fois le modèle numérique calé, il donne accès à un vaste nombre de données de sortie inaccessibles avec un modèle physique. Un tel outil permet donc d'ores et déjà de gagner plusieurs semaines voire plusieurs mois sur cette phase d'étude d'un projet hydraulique.

Until now, physical models were most of the time required to properly understand complex hydraulic problems. According to the choice of dimensionless numbers, they allow to understand physical issues such as 3D flows, discharge capacity and energy dissipation, sediment transport..

Numerical approaches have been gradually developed for 20 years. They were first appropriate for university or research centres. Numerical tools are nowadays suitable to be used by engineering consultancy services thanks to exponential increase of PC powers ,performing numerical methods and user friendly interfaces.

This article presents results of numerical simulations carried out with Flow3D®, to assess discharge capacity of spillways. Results are very promising as correlations with proven data coming from both literature and physical models are very good, mostly less than 5%, even less for standard spillways.

As a conclusion, numerical codes such as Flow3D®, might from now on be used without any physical models for basic issues. They can also be used, in more complex configurations, in addition to physical models to optimise projects because numerical models and project variations are quick and cheap to run. Furthermore, 3D numerical models also provide large quantity of output data, which cannot be supplied by a physical model. 3D numerical models are therefore a way to substantially reduce hydraulic studies schedule by weeks or months.

I CONTEXTE DE LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE 3D

Jusqu'à présent, la représentation fine des phénomènes hydrauliques complexes a essentiellement fait appel à la modélisation physique par le biais de la réalisation de modèles réduits hydrauliques.

Selon les lois de similitude adoptées, ces derniers permettent d'appréhender certains phénomènes physiques complexes comme les écoulements tridimensionnels, les problématiques d'amortissement d'énergie, les transports solides...

L'approche de ces phénomènes hydrauliques complexes par le calcul s'est graduellement développée depuis une quinzaine d'années. D'abord réservés aux centres de recherches et aux universités, les outils de calcul ont progressivement évolué pour être aujourd'hui utilisables à un stade industriel par des sociétés d'ingénierie.

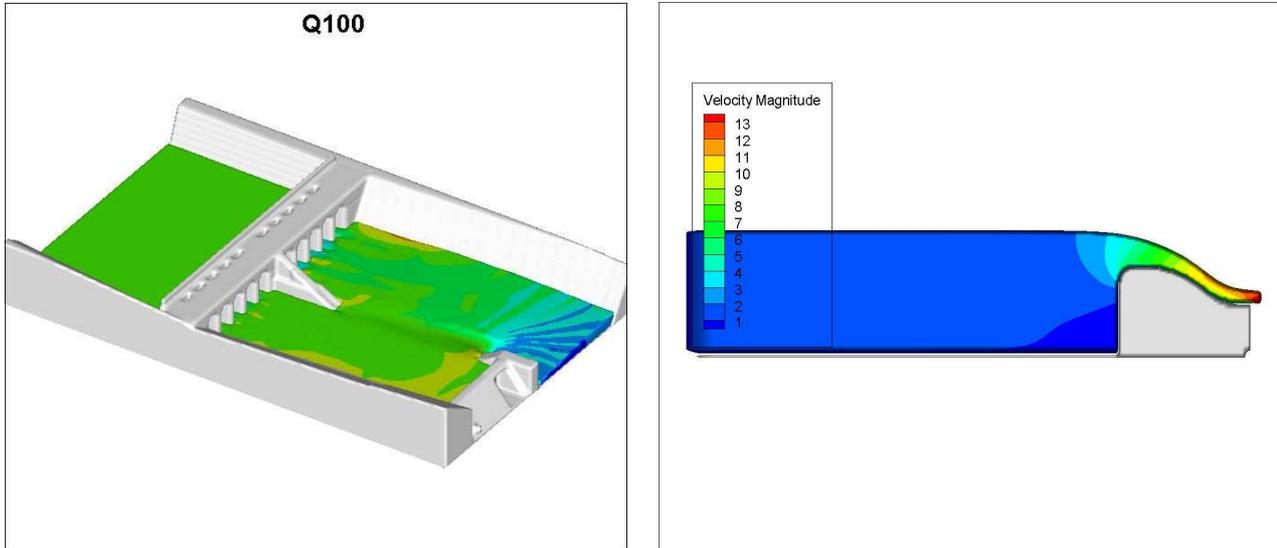


Figure 1 : (a) Modélisation 3D du site du Gouffre d'Enfer, (b) Barrage de Roche-Talamie

Ce développement a été rendu possible par des progrès significatifs réalisés en quelques années sur :

- La convivialité des interfaces (graphiques, menus déroulants, onglets..), la facilité d'utilisation des logiciels (maillages automatiques, importation de géométrie depuis les logiciels de C.A.O. type Autocad®...), la qualité et la facilité d'exploitation des résultats de sortie. Ces éléments facilitent la prise en main du logiciel par des ingénieurs de bureau d'études qui ne consacraient qu'un temps partiel à cette activité.
- La rapidité des calculs. Les progrès suivants ont été accomplis :
 - o L'augmentation continue des puissances de calcul des machines (loi de Moore) permet aujourd'hui de disposer de stations de « bureau » extrêmement puissantes.
 - o Aux progrès du matériel (hardware) s'ajoutent les progrès du système d'exploitation (software – Microsoft® XP pro 64 par exemple) fonctionnant en 64 bits et capable de gérer les programmes et machines multi-processeurs.
 - o La capacité de certains logiciels de calcul de fonctionner en mode multi-processeur et en 64 bits.

A ce titre, en 2008, une machine de quelques milliers d'euros, et donc accessible par tout bureau d'études, sera dotée de deux processeurs quadricoeur permettant de faire fonctionner jusqu'à 8 processeurs cadencés à 2 GHz en parallèle, de 8 Go de mémoire vive, et d'une puissante carte graphique permettant des affichages graphiques complexes.

Associé au logiciel de calcul Flow3D®, une telle machine pourra réaliser des calculs de plusieurs millions d'éléments en quelques jours là où hier une à plusieurs semaines de calculs étaient requis sur des systèmes informatiques « clusterisés » complexes et coûteux.

Il est essentiel de préciser que la loi de Moore continuant de s'appliquer durant encore quelques années, cette tendance va se prolonger et rendre ces calculs toujours plus rapides et accessibles.

Les systèmes parallélisés (de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de processeurs) peuvent offrir des solutions numériques d'une puissance considérable et sans commune mesure. Leur domaine d'application, de part leur complexité d'utilisation aussi bien en terme de hardware que de software, rend ce type de système, peu applicable pragmatiquement à une utilisation « industrielle » d'ingénierie classique.

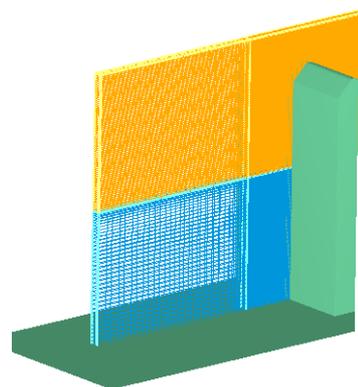
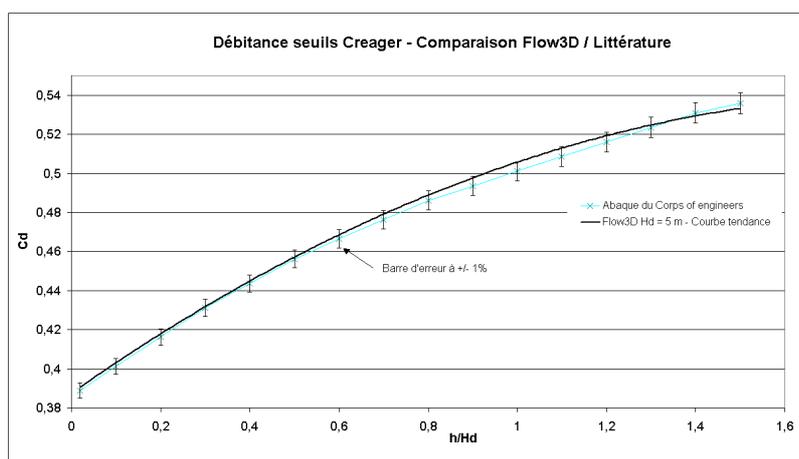


Figure 2 : Vérification de la débitance 2D de seuils Creager – Adéquation des résultats de calcul avec une marge inférieure à 2%

II VALIDATION ET PRECISION DES CALCULS NUMERIQUES – DEBITANCE DES SEUILS

Suite à un processus de Benchmarking industriel basé sur une utilisation de plusieurs codes, EDF-CIH a décidé d'acquérir le logiciel d'écoulement Flow3D® (<http://www.flow3d.com>) afin qu'il devienne un outil applicable aux différents niveaux d'études d'un projet depuis les études préliminaires jusqu'aux avant projets détaillés.

Flow3D® est un des logiciels leader du marché concernant les écoulements à surface libre. Il dispose de nombreux modules et est très utilisé dans l'industrie mécanique (fonderie, peinture, microfluidique...) pour des problématiques complexes faisant appel aux phénomènes de viscosité, de tension superficielle, de gradient thermique, de turbulence, cavitation, entraînement d'air...

Dans ce contexte, les sujets abordés dans le cadre de l'hydraulique traditionnelle à surface libre du monde des barrages, apparaissent plus simples : faible influence de la tension superficielle, du facteur thermique ou de la viscosité...

La première étape faisant suite à l'acquisition de Flow3D®, a consisté, à valider et évaluer la pertinence et la stabilité des résultats obtenus. Il s'agit d'une problématique profonde des outils modernes de calcul numérique. Les puissantes et nombreuses options disponibles avec Flow3D®, doivent ainsi être comprises et maîtrisées.

II.1 Modélisation d'un seuil standard Creager 2D

La figure 2 ci-avant illustre certains des résultats obtenus avec des modélisations 2D (une seule maille en largeur) de seuil standard Creager définis géométriquement par leur charge de dimensionnement H_d et leur charge hydraulique H . Les temps de calcul sur des seuils en 2D sont très rapides y compris avec des maillages fins (de quelques minutes à une heure). Cette rapidité de calcul a permis de réaliser des tests exhaustifs de fiabilité et de sensibilité pour un grand nombre de configuration faisant varier le rapport H/H_d , la pelle, le maillage... et certains paramètres du code (rugosité...).

Les résultats montrent un écart inférieur à 2% entre les calculs numériques ayant fait l'objet d'un traitement statistique de base (approximation par un polynôme de degré 2 ou 3), et les références de la littérature (coefficient de débitance des seuils Creager selon la formule de Brudenell [1]). Nous touchons là une démarche très similaire à celle s'opérant lors du traitement de résultats expérimentaux issus d'un modèle réduit physique par exemple. Un point de mesure pris isolément est entaché d'une incertitude expérimentale qui sera en partie gommée par le lissage de la courbe obtenue à partir d'un ensemble plus important de points. Cette démarche, appliquée à « l'expérimentation numérique », nous a permis de réduire considérablement les écarts entre les résultats numériques « lissés » et la référence choisie.

Des calculs 2D sur des seuils à la géométrie non standard ont également montré une différence inférieure à 2% avec des résultats issus de modélisations sur modèle physique. C'est le cas des évacuateurs de crue du barrage de Roche-Talamie, illustré par la figure 1b ci-avant, dont le modèle réduit a été exploité durant l'année 2008 au laboratoire d'hydraulique d'EDF-RD à Chatou.

En complément, l'effet du noyage aval sur la débitance des seuils profilés a été testé. Une adéquation très correcte entre les calculs numériques et les abaques fournis par l'USBR [2] a été obtenue comme l'illustre la figure 3 qui compare les résultats obtenus avec Flow3D® avec plusieurs références tirées de la littérature.

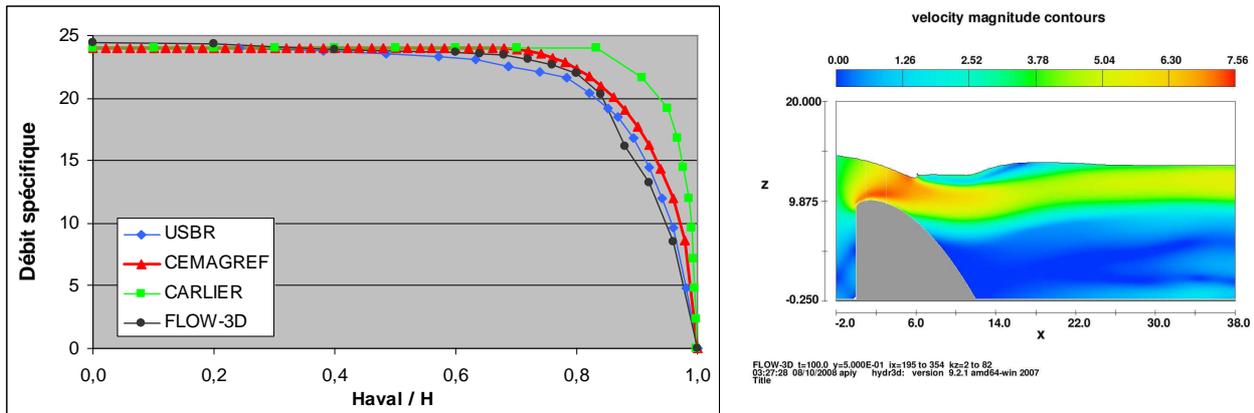


Figure 3 : Modélisation numérique du noyage aval d'un seuil Creager / Comparaison avec la bibliographie

II.2 Modélisation d'un seuil standard Creager 3D

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 et l'autre dit fin, sont construits. Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques des 2 maillages créés, représentés sur les figures ci-dessous.

Code	Raffinement du maillage	Type de maillage	Taille moyenne d'une arête (mm)	Raffinement local du maillage	Nombre de kilo-mailles
Flow-3D	Grossier	Structuré	25	Pas de couche limite	80
	Fin		12		640

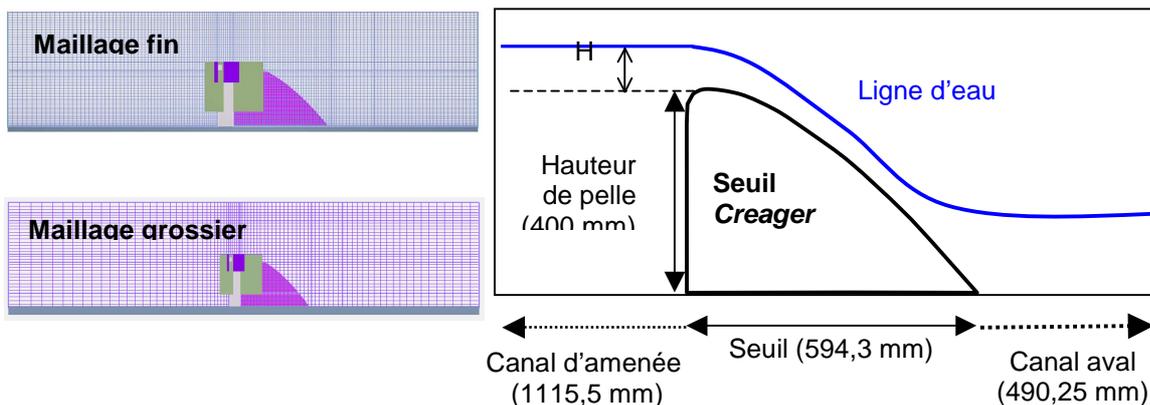


Figure 4 : Vérification de la débitance 3D de seuils Creager

La débitance du seuil Creager est analysée au travers du coefficient de débit C_d issu de la formule semi-empirique $Q = C_d L H \sqrt{2gH}$ où $C_d = C_p \left(\frac{H}{H_d} \right)^{0,12}$

Avec Q : le débit (m³/s) ; L : la largeur du seuil (m) ; H : la charge hydraulique amont (ou charge) (m) ; H_d : la charge de dimensionnement (m) ; C_d : un coefficient de calage ; C_p : un coefficient de calage fonction de la hauteur de pelle. Le coefficient C_p est généralement pris égal à 0,494 dans l'hypothèse où la hauteur de pelle est grande devant la charge hydraulique.

Le tableau ci-dessous présente la débitance du seuil calculée par les codes et comparée à celle fournie par l'expérimentateur.

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 calcul/mesure	+2,9%	0 %	+2,7%	+0,2%	+1,6%	+0,2%

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

Etude de la position de la ligne d'eau

Sous Flow-3D®, un seul fluide, l'eau, est pris en compte par défaut, et l'interface est une condition à la limite « mouvante » localisée avec précision par le code au cours de la résolution. Les figures ci-dessous représentent les lignes d'eau calculées par le codes et comparées aux mesures expérimentales (notons cependant qu'il est possible d'activer une option « bifluide » et de caractériser une interface eau/air par exemple).

Avec E_L : erreur relative calcul/mesure ; N : nombre de points de mesure ; hcalcul : hauteur de la ligne d'eau calculée par le code (m); hmesure : hauteur de la ligne d'eau mesurée (m); H_d : charge amont de dimensionnement (m).

H/H_d	0,5	1,0	1,33
Flow-3D®	$E_L < 1\%$		$E_L \approx 3\%$

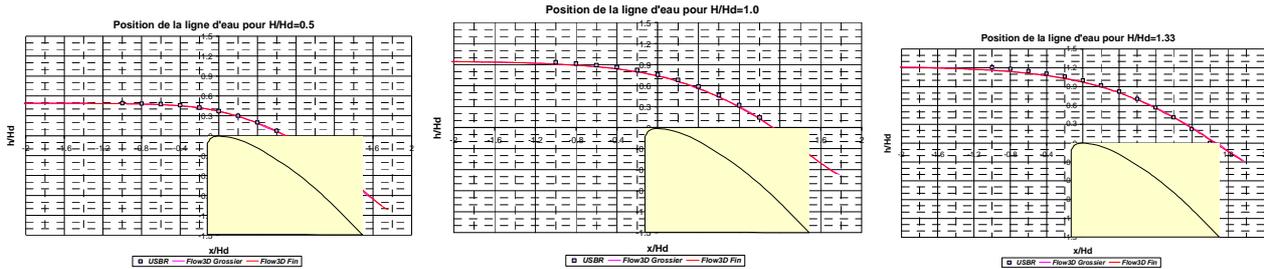


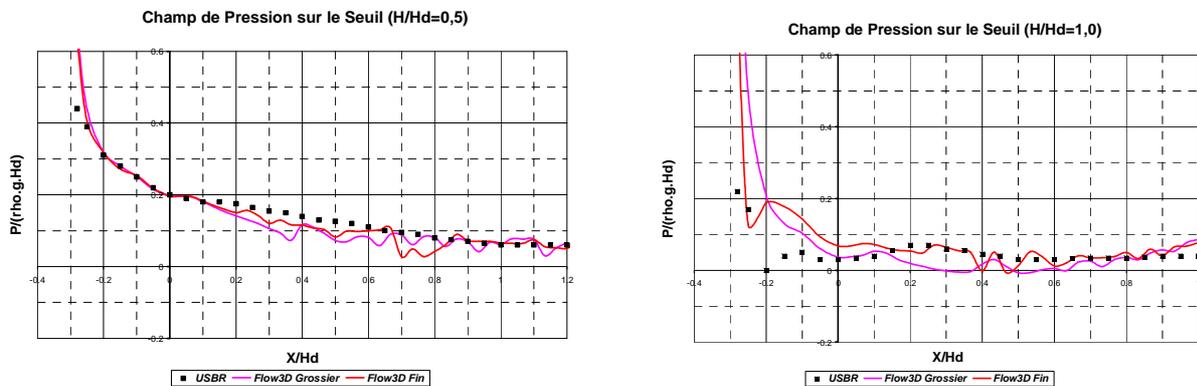
Figure 5 : Position de la ligne d'eau – comparaison calcul numérique / données expérimentales

Etude de la distribution de pression pariétale

Les figures suivantes représentent la distribution de pression statique sur le parement du seuil. Le tableau ci-dessous présente pour chaque cas l'écart entre les résultats du calcul et les mesures expérimentales.

Les résultats permettent de montrer :

- à faibles charges : une adéquation correcte entre les calculs et les mesures,
- à forte charge : calculs et mesures sont sensiblement divergents ; sur la partie amont du seuil, une plus grande qualité du maillage induit une amélioration des résultats numériques.



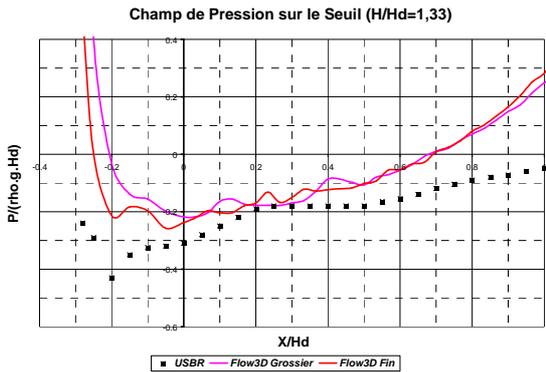
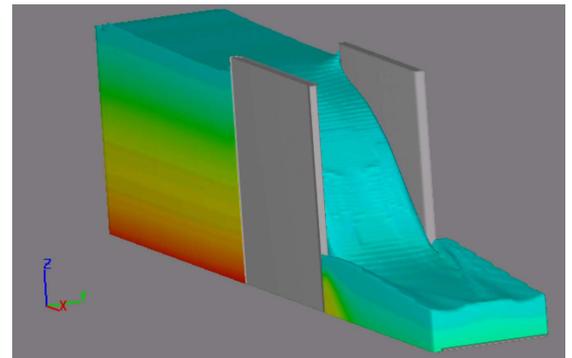


Figure 6a, b, c : Champs de pression sur le seuil pour différentes charges – comparaison calcul numérique / données expérimentales

Etude 3D complémentaire : Seuil 3D avec piles

Un cas test complémentaire en trois dimensions est succinctement étudié sous Flow-3D®. Il s'agit d'intégrer deux piles de part et d'autre du seuil Creager. Dans ce cas, la référence [3] propose une formulation semi-empirique de la débitance du seuil via la correction de sa largeur. La figure 12 représente la géométrie étudiée.

Le tableau ci-dessous présente les débits du seuil avec piles calculés par le code Flow-3D® et comparés aux valeurs expérimentales. L'adéquation entre les calculs et les mesures est aussi bonne que dans le cadre de la simulation 2D.



H/H _d	0,5	1,0	1,33
Débit mesuré	45,08 l/s	135,9 l/s	212,9 l/s
Débit sous Flow-3D®	45,95 l/s	138,7 l/s	213,4 l/s
Ecart	+1,93%	+2,02%	+0,23%

II.3 Sensibilité et stabilité du code - Recherche d'un compromis précision / finesse de maillage

Des démarches de validation de Flow3D® ont naturellement déjà été publiées par le passé [6] - [7]. Nous avons souhaité entreprendre des démarches complémentaires avec deux objectifs :

- Tester la robustesse du code vis à vis du maillage.
- Recherche d'un compromis précision / maillage.

La figure 7 ci-après illustre quelques exemples de maillages testés parmi plusieurs dizaines de simulations.

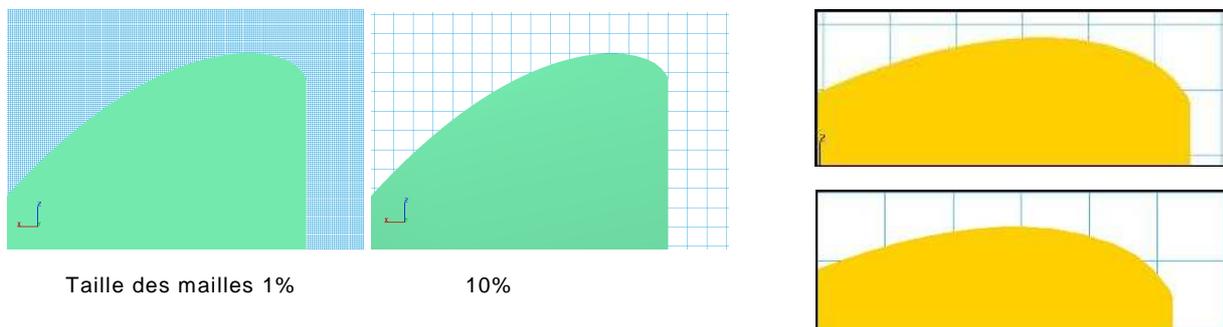


Figure 7 : Exemples d'études de sensibilité du maillage

Pour un maillage suffisamment fin, nous avons volontairement fait varier la position du maillage vis à vis de la géométrie du seuil en testant des configurations a priori non pertinentes en décalant la position des mailles par rapport aux bords de la géométrie. Même en se positionnant de façon aberrante, le code n'a pas divergé et les résultats sont restés très stables dans une fourchette inférieure à 2%. Il s'agit bien là d'un des atouts principaux de ce type de code de calcul utilisant un maillage structuré avec des mailles géométriques de forme parallélépipédique, simples et robustes. Plutôt que d'adapter le maillage à une géométrie souvent complexe et irrégulière, c'est bien la géométrie qui est adaptée au maillage, elle est discrétisée en quelque

sorte par pans coupés : un maillage qui pourrait paraître assez grossier donne in-fine des résultats très satisfaisants. Ce n'est évidemment pas le cas des maillages non structurés traditionnels qui posent souvent des problèmes de bord non négligeables pouvant amener à des non robustesses des résultats.

La figure 8 ci-après fournit une synthèse des simulations menées comparant la taille relative des mailles dans l'écoulement, les 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. Ces considérations ne sont pas forcément très pertinentes pour les seuls calculs menés en 2D pseudo 3D puisque les temps de calcul sont très réduits. Elles prennent en revanche une certaine signification pour les simulations 3D pour lesquels les simulations vont aller de quelques heures à plusieurs jours selon les simulations menées. Cette démarche nous permet de définir un premier niveau de maillage, correspondant à une finesse de maille de 6-7% de hauteur d'eau qui pourra nous permettre de dégrossir les problématiques en restant a priori dans des niveaux de précisions très satisfaisants.

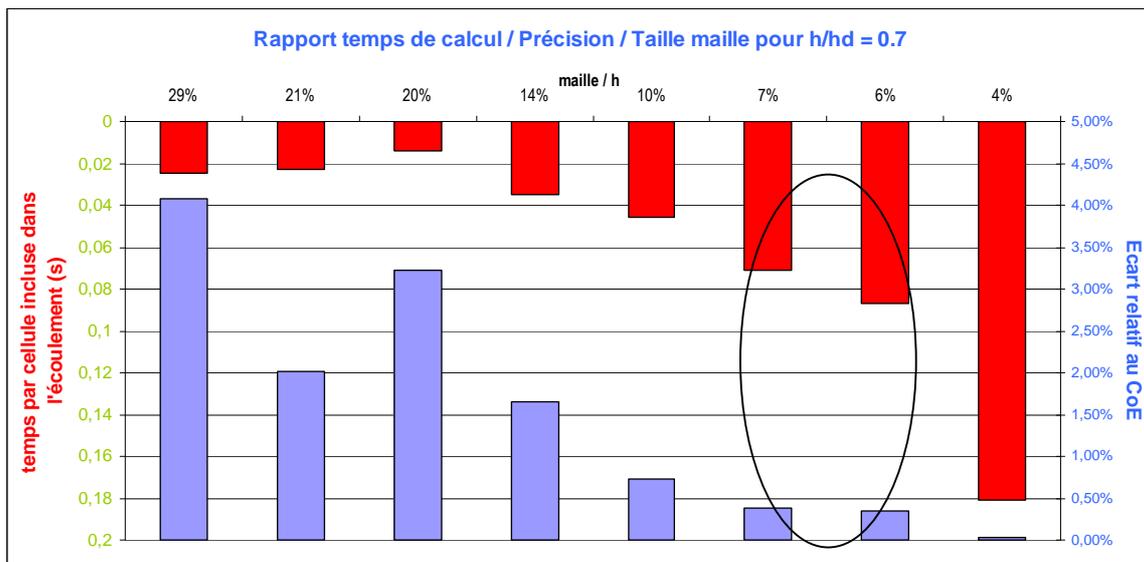


Figure 8 : Exemples d'études de sensibilité du maillage

II. 4 Limitations méthodologiques – Précision des références étalons

Les précisions des calculs que nous avons fait apparaître ci-dessus soulèvent un certain nombre de questions méthodologiques de fond. La première d'entre elle est la qualité / précision des étalons de référence choisis pour caler ces calculs.

En ce qui concerne le calage avec des modèles réduits traditionnels, les calculs d'incertitude que l'on peut mener (incertitude sur la mesure des débits, la mesure des hauteurs, la géométrie de la maquette, la similitude choisie...) nous amènent fréquemment à des incertitudes de l'ordre de 5%, parfois moins. Quel sens y-a-t-il alors à prétendre caler un modèle numérique avec une précision moindre ? On pourrait penser que certaines références incontournables mais anciennes de la littérature comme Ven Te Chow [3] ou l'USBR [2] donnent des références extrêmement fiables. La lecture de ces documents de référence ne nous a pas permis de conclure sur le sujet. On peut avoir plus de confiance sur certains résultats plus récents qui ont pu être publiés par exemple dans les traités de l'EPFL [1].

En d'autres termes, et concernant la débitance des seuils, la limite ne vient plus à ce jour, des modélisations numériques, mais de notre capacité à caler correctement les modèles numériques avec une physique expérimentale précise en deçà de certains niveaux d'incertitude.

=> Ces problématiques d'évaluation des incertitudes hydrauliques seront, à n'en pas douter, des questions clés pour l'ingénieur dans les années à venir dans le cadre de la progression des réflexions sur les analyses de risque ou les études de danger issues des évolutions très récentes de la réglementation.

Cette limitation méthodologique est particulièrement illustrée par deux exemples que nous avons tentés d'approcher :

- (I) Modélisation des effets de pile de contraction latérales
- (II) Modélisation des seuils épais / semi-épais / minces à arête amont vive ou arrondie.

Dans les cas de (I), les quelques références existantes dans la littérature (Ven Te Chow [3] ou l'EPFL [1]) fournissent des abaques potentiellement contradictoires où le traditionnel coefficient K_p de contraction latérale peut varier de plusieurs ordres de grandeur (ce qui peut correspondre à une variation de débitance du seuil de plusieurs pourcents selon ses caractéristiques : largeur, charge) !

La problématique est relativement similaire pour la débitance des seuils épais / semi-épais ou minces. La littérature fournit un grand nombre de formulations, formant un ensemble peu cohérent comme l'illustrent le recueil du CETMEF [4] ou ACKERS [5] avec une dispersion forte des résultats pouvant dépasser 15-20% pour certains cas. Les calculs menés et illustrés par la figure 9 ne peuvent donc raisonnablement être calés ni évalués, même si la référence choisie (ACKER), nous semble par ailleurs une source intéressante et que les écarts à cette référence restent inférieurs à 5%, voire 2-3% pour les rapports hauteurs d'eau / largeur du seuil inférieurs à 1.

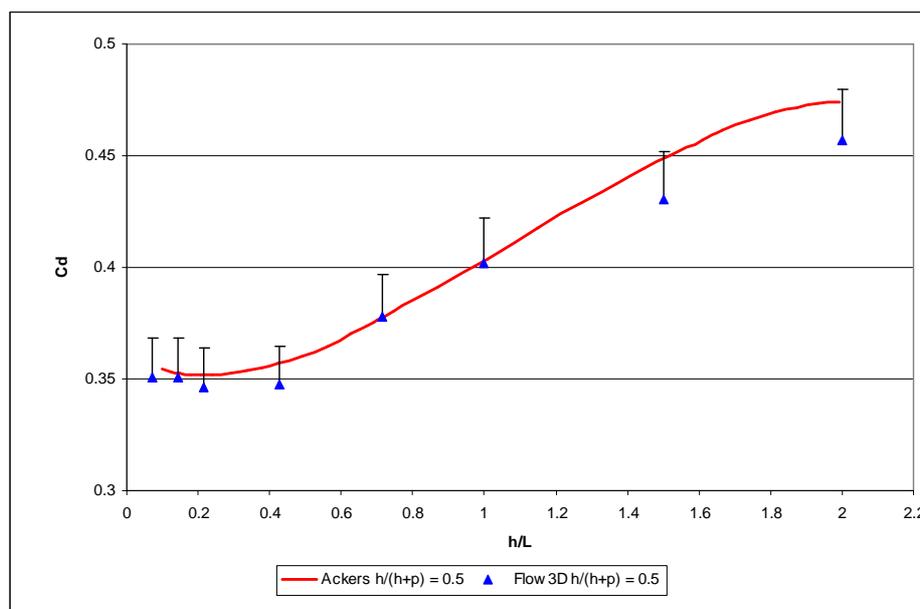


Figure 9 : Modélisation d'un seuil épais à arête amont vive (barre d'erreur à 5%)

En conclusion et quant à la détermination de la débitance des seuils, la précision atteinte avec le logiciel Flow3D® nous semble aujourd'hui très satisfaisante et au moins de l'ordre de celle fournie par les modèles réduits hydrauliques pour les seuils profilés. Une limitation méthodologique apparaît cependant quant au calage, en général, des modèles numériques, sur des sources suffisamment fiables.

III UTILISATION INDUSTRIELLE PRATIQUE

La phase de validation ayant donné des résultats satisfaisants, l'utilisation industrielle « d'ingénierie » a pu commencer, tout en continuant en parallèle l'exploration du logiciel et sa validation sur des phénomènes hydrauliques de plus en plus sophistiqués (entraînement d'air, écoulements des seuils labyrinthes PKW...).

La figure 1a illustre les calculs réalisés pour le barrage du Gouffre d'Enfer.

La figure 10 ci-dessous montre les capacités de calcul de Flow3D® pour la détermination des caractéristiques des écoulements dans une vanne de fond pour le barrage du Rizzanèse en Corse, dont la construction a commencé en 2008.

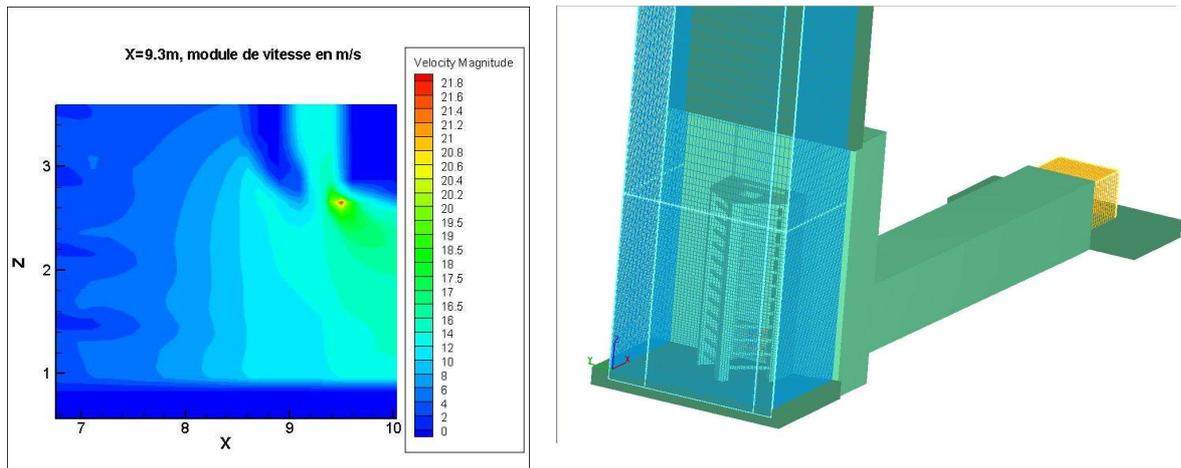


Figure 10 : Modélisation de la vidange de fond du futur barrage du Rizzanèse (Corse), (a) Profil de vitesse à l'entrée du conduit – (b) Modèle et maillage

Les calculs menés ont été calés à partir d'essais sur modèles réduits. Par la suite, les profils de vitesse obtenus ont permis de délimiter les zones à blinder en fonction des critères de dimensionnement. L'obtention de profils de vitesse dans n'importe quelle zone du modèle est une fonctionnalité puissante des modèles numériques qui permettent de fournir facilement un grand nombre de données de sortie, là où on se heurte à des obstacles expérimentaux parfois infranchissables. Par ailleurs, le modèle étant calé, le bureau d'études a pu procéder à des modifications et optimisations des formes de génie civil, qui ont pu être testés dans la foulée par ces calculs d'hydraulique numérique, moyennant les mêmes modifications mineures du modèle numérique. L'importation directe des plans de CAO 3D, et la génération rapide des maillages structurés de Flow3D®, facilite ces opérations de tests de différentes configurations.

La figure 11 ci-après présente la modélisation réalisée pour l'optimisation des évacuateurs de crue du barrage aval du projet Nam Theun2 actuellement en fin de construction au Laos.

Le modèle numérique a dans un premier temps été calé sur un modèle réduit physique. Par la suite, une phase d'optimisation du coursier, du bassin de dissipation et des déflecteurs a été réalisée numériquement.

Seule la version définitive, mise au point à l'aide des simulations numériques, a finalement été testée sur le modèle réduit physique. Au regard des coûts et des temps d'exploitation d'un tel modèle physique, l'utilisation de la modélisation numérique, a permis de gagner plusieurs semaines, voire mois sur le chemin critique de l'opération globale.

La figure 12 ci-dessous illustre les calculs menés pour déterminer la débitance du barrage de Luzières, dont les écoulements sont complexes avec un couplage d'un déversement à surface libre sur un clapet de surface avec un écoulement à travers une vanne de fond, qui peut se trouver noyé en fonction de la loi hauteur/débit à l'aval.

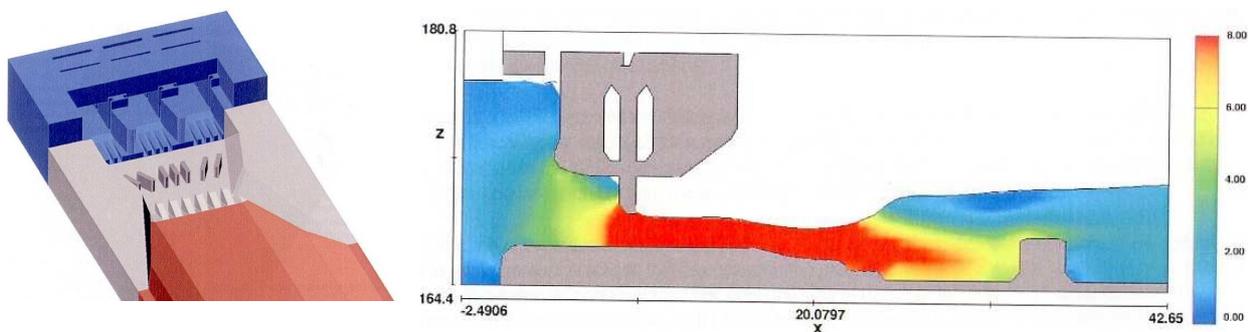


Figure 11 : Modélisation des évacuateurs de crue du barrage aval du projet Nam Theun2 (Laos)

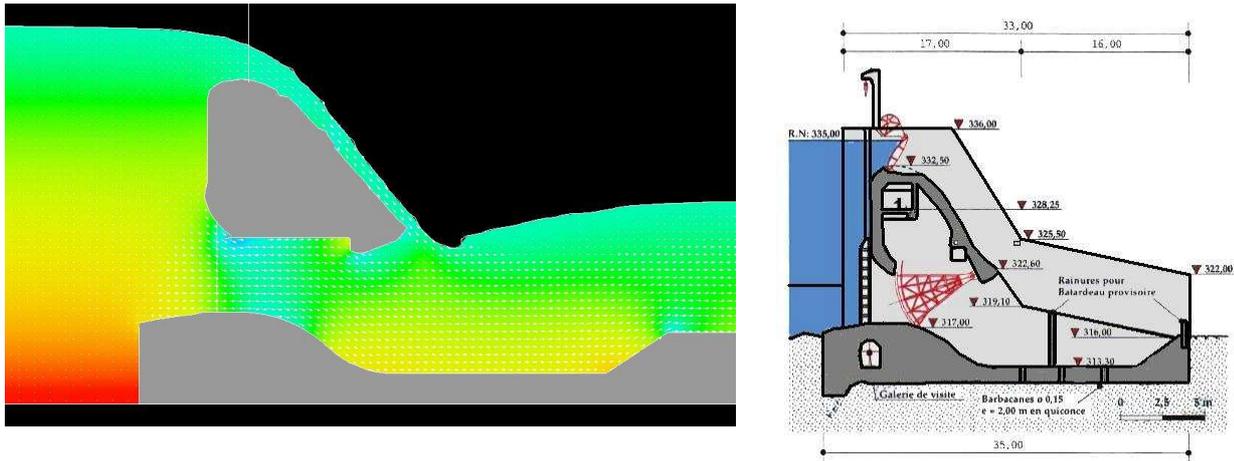


Figure 12 : Estimation numérique de la débitance du barrage de Luzières

IV EXEMPLE : DEBITANCE DES EVACUATEURS DE LAOUZAS

La débitance du système d'évacuation des crues du barrage de Laouzas a été estimée à partir de deux approches : une approche bibliographique et des modélisations numériques, bidimensionnelles et tridimensionnelles des écoulements menée avec le logiciel Flow3D®.

Le seuil déversant de Laouzas est exceptionnel de par sa forme puisque seule sa partie amont est profilée, la partie aval étant constituée d'une saillie suivie d'un plan incliné. L'aération de la lame déversante est assurée par l'intermédiaire de cette saillie dont les prises d'air sont situées dans les piles. Cette particularité ne permet pas de l'apparenter à un type de seuil particulier.

Dans un premier temps, une approche bibliographique a été effectuée pour tenter d'estimer la débitance de ce seuils. La forme inhabituelle de ce seuil ne nous a pas permis de conclure fermement, d'autant plus qu'aucune valeur de modèle réduit n'est disponible (A titre d'information, la valeur retenue jusqu'à présent pour le coefficient de débit vaut 0,45). Différentes formules de la bibliographie ont été abordées (seuil circulaire, elliptique, mince, profilé..) et une analyse critique de formulations proposées nous laisse penser qu'un coefficient de débit d'environ 0,49 (en tenant compte des contractions latérales) semble raisonnable, bien que très élevé en première approche.

Deux modélisations numériques du barrage de Laouzas ont été réalisées sur le logiciel Flow3D® afin de comparer les résultats aux valeurs théoriques de débitance des évacuateurs de crues.

- La première simulation modélise le profil réel du seuil en 2D (maillage de 20 cm), la passerelle et la vanne en position levée, et ce pour une gamme de cotes étendue (771 à 778.6 NGF).
- La deuxième simulation modélise le barrage de Laouzas dans sa quasi totalité en 3D (maillage plus grossier de 50 cm), pour quelques cotes de retenue (RN, PHE...) de façon à se positionner sur la concordance avec les résultats 2D plus simpliste et à appréhender les effets dus aux piles et à l'interaction des 3 passes déversantes sur la débitance de chaque seuil déversant.

N.B. : La modélisation ne reflète pas exactement la réalité physique puisque les phénomènes d'aération ne sont pas modélisés.

La modélisation numérique a permis de caractériser:

- la débitance de cet évacuateur de crue,
- la charge de dimensionnement équivalente théorique du profil associé à l'écoulement libre,
- la cote de mise en charge de l'ensemble vanne/passerelle ,
- le coefficient de débitance de l'écoulement en charge.

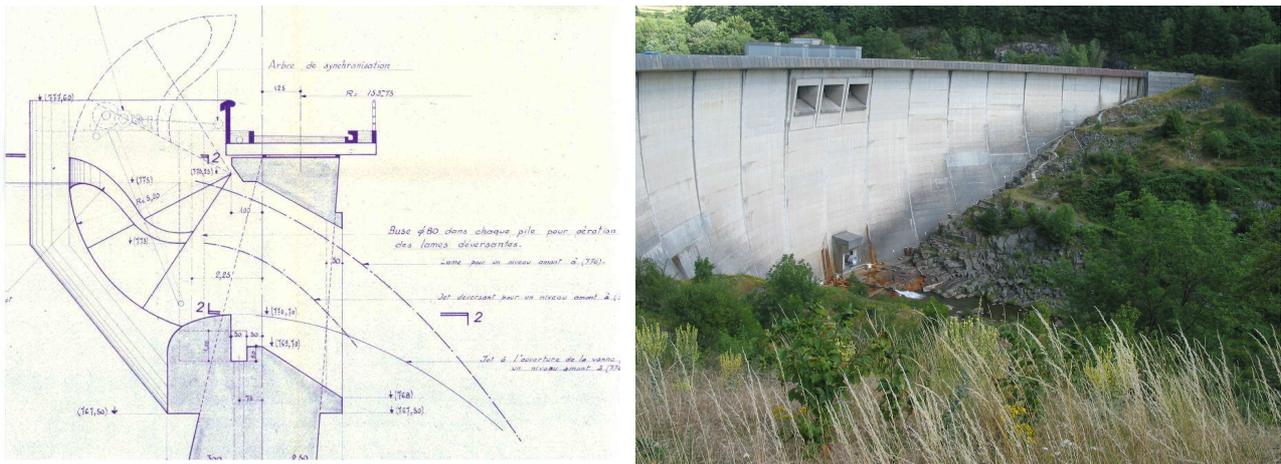


Figure 13 : Barrage de Laouzas – Seuils existants et modélisation numérique 3D et 2D

Les valeurs de débitance obtenues attestent de deux régimes d'écoulement différents, à savoir un écoulement à surface libre jusqu'à une certaine cote de retenue, puis un écoulement en charge sous la passerelle. Cette transition, s'effectuerait pour une cote supérieure à celle de la crête de l'ouvrage. Le coefficient de débit, ajusté par rapport au coefficient de contractions latérales, varie entre 0.50 et 0.51. Il est ainsi supérieur à l'estimation bibliographique semblant a priori optimiste.

Concernant la modélisation 3D, les valeurs de débitance obtenues sont légèrement supérieures (quelques pourcents) à celles de la modélisation 2D. Ce résultat peut s'expliquer par la mise en vitesse commune de l'écoulement à l'amont des trois passes, ce qui semble confirmé par une débitance de la passe centrale supérieure de 3 % à celles des passes latérales. Flow3D® a donc permis de quantifier la débitance du barrage passe par passe, mesure qui s'avérerait très délicate à réaliser sur un modèle réduit physique

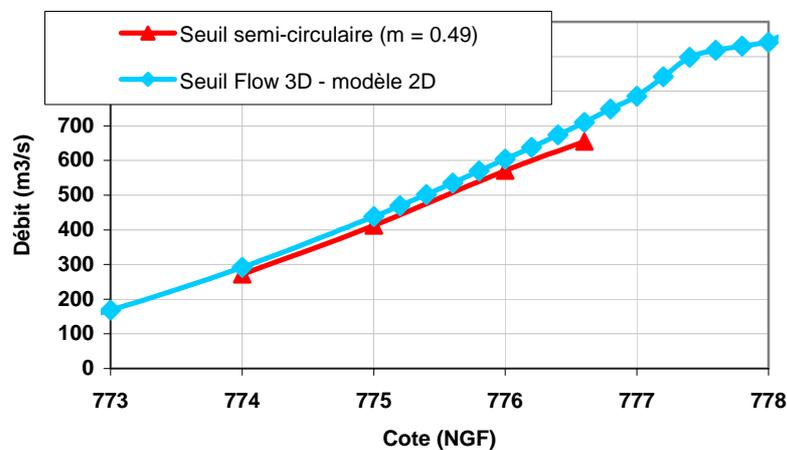


Figure 14 : Barrage de Laouzas – Comparaison bibliographie / modélisation 2D

En conclusion de cette étude, la valeur du coefficient de débitance retenue à partir de la bibliographie, valeur qui pouvait sembler optimiste en première approche, peut être maintenue et considérée comme une valeur plutôt conservatrice pour la réalisation des premiers calculs de passage de crue. Au regard de la forme peu commune du seuil déversant du barrage de Laouzas et de la relative dispersion des résultats présentés, il apparaît difficile de trancher fermement sur une valeur de débitance de l'évacuateur de crue, sans réalisation d'un modèle réduit. En première approximation, un coefficient de débit proche de 0.49 semble une hypothèse moyenne.

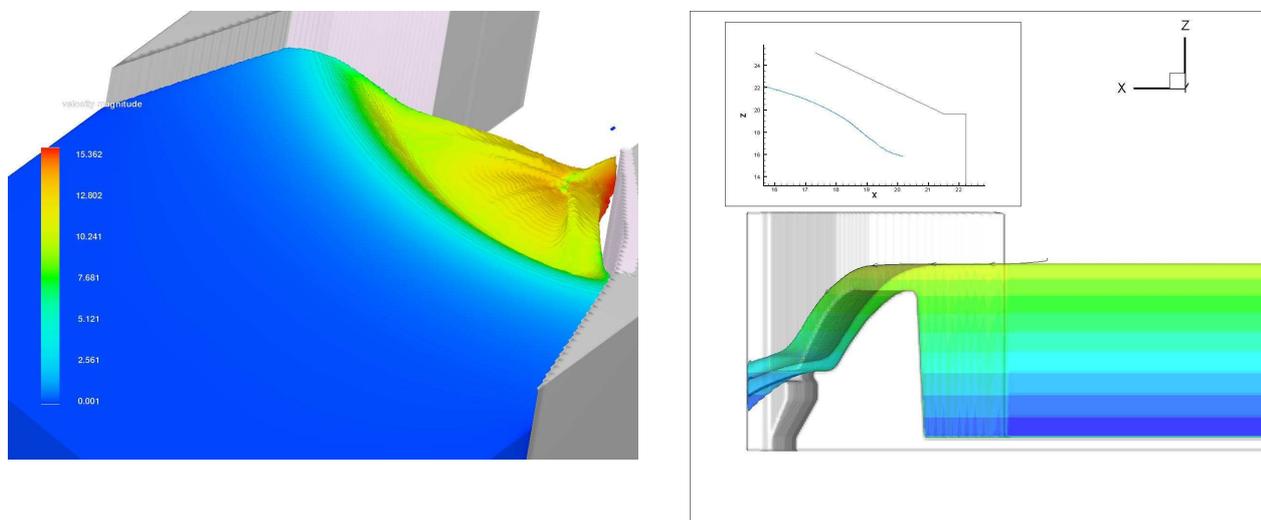


Figure 15 : Barrage de Riou Majou – Estimation de débitance du barrage et de la revanche sur les bajoyers

V CONCLUSION

Même si un certain optimisme est permis au regard des premiers résultats, il convient de bien souligner les difficultés réelles inhérentes à la maîtrise de ces nouveaux outils de calcul 3D.

Les calculs aux éléments finis fournissent des résultats certes « vendeurs » à l'esthétique incontestable « it looks good ». Cependant ils demandent, une grande prudence quant à la pertinence et l'interprétation des résultats obtenus, même si Flow3D®, de ce point de vue, semble plus robuste que d'autres codes. Enfin, il ne faut pas sous-estimer le fait que l'utilisation de ces codes représente un investissement initial matériel, mais aussi humain significatif, non seulement pour acquérir ces compétences en calcul mais pour les conserver et les capitaliser.

En conclusion, l'utilisation de codes numériques 3D comme Flow3D® peut être dès à présent une alternative à la réalisation de certains modèles réduits physiques simples quant à la détermination de la débitance des seuils. A minima, en complément d'un modèle physique plus complexe, il sera un appoint extrêmement utile à l'exploitation de ce modèle physique, quant à l'optimisation des configurations de projet, que permet la rapidité et le faible coût d'implémentations de variantes ou modifications. Un tel outil permet d'ores et déjà de gagner plusieurs semaines voire mois sur le déroulement d'un projet hydraulique.

VI REFERENCES

- [1] "Traité de Génie Civil de l'EPFL, Constructions Hydrauliques", Volume 15, Ecoulements stationnaires, R.O. SINNIGER, W. H.HAGER, 1989.
- [2] "Design of Small Dams" – USBR
- [3] "Open Channel Hydraulics", V.T.CHOW, Mac Graw Hill Book Company, 1959, édition de 1988
- [4] "Notice sur les déversoirs" – CETMEF, Février 2005
- [5] "Weirs and Flume for flow measurement", Acker et al., *John Wiley and Sons Ltd, 1978
- [6] "Application of numerical modelling to spillway in Australia" – DKH Ho et al. – Dams and Reservoirs, Societies and environment in the 21st century – Berga et al. (2006)
- [7] "Brain versus brawn, the changing world of Hydraulic Study" – B. Savage et al.
- [8] "Flow over Ogee spillway : Physical and numerical model case study" – B. Savage et M. Johnson, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, August 2001.