EVACUATEURS DE CRUES : COMPLEMENTARITE ET LIMITES DES MODELES PHYSIQUES ET NUMERIQUES

Spillways: complementarity and limitations of physical and numerical models

Salah SHAIEK, Akim SALMI
ISL ingénierie, 65 avenue Clément Ader, 34170 Castelnau-le-Lez, France
shaiek@isl.fr ; salmi@isl.fr

MOTS CLEFS

Barrage, évacuateur, étude de dangers, modélisation physique, modélisation hydraulique 3D, CFD

KEY WORDS

Dam, spillway, risk assessment study, scale model, physical modelling, numerical modelling, CFD

RÉSUMÉ

Les organes d'évacuation des crues sont des dispositifs essentiels à la sécurité des barrages, et une connaissance détaillée de leur fonctionnement est fondamentale à l'évaluation du niveau de sûreté d'un ouvrage.

Au stade de projet, cette connaissance est acquise lors de l'optimisation et la validation du dimensionnement du dispositif. Cette phase requiert l'emploi de méthodes de modélisation, allant des plus simples au plus complexes. Lorsque la géométrie impose à l'écoulement de franchir des seuils, des courbures, des marches et autres obstacles, il est généralement nécessaire de recourir à une modélisation physique et/ou numérique 3D (CFD).

Pour un barrage en service, cette analyse du fonctionnement intervient lors du diagnostic exhaustif dans le cadre de l'étude de dangers de l'ouvrage. Il s'agit d'une donnée d'entrée du bilan de conception permettant de caractériser les sollicitations liées aux aléas naturels. Quand la capacité d'évacuation des crues est incertaine, il est commun de privilégier les méthodes de modélisation numériques à la modélisation physique pour simuler le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage.

La modélisation physique, méthode traditionnellement utilisée dans les études hydrauliques, consiste à reproduire la structure à une échelle généralement réduite pour observer et mesurer directement les caractéristiques de l'écoulement de l'eau dans des conditions contrôlées. Le respect des lois de similitude dynamique est nécessaire pour que les résultats du modèle réduit soient représentatifs du modèle réel.

Depuis plus d'une décennie, le recours à la modélisation numérique 3D dans les études hydrauliques s'est démocratisé sous l'impulsion de l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs courants. Cette méthode s'appuie sur la résolution numérique approchée des équations de Navier-Stokes implémentée dans des logiciels de mécanique des fluides numérique CFD (Computational Fluid Dynamics).

La concurrence des deux méthodes est souvent discutée, alors qu'il est plus adéquat de mettre en exergue leur complémentarité. Le moindre coût et la puissance des outils CFD font de la modélisation numérique 3D un outil adapté à l'optimisation préalable d'une conception ou à l'évaluation d'ouvrages existants. En parallèle, la modélisation physique est un outil fiable et plus flexible pour certaines optimisations, qu'il convient d'employer dans la validation finale d'une conception.

L'objet de la publication consiste à mettre en avant la complémentarité des deux modélisations en confrontant leurs limites à travers des exemples de projets ISL.

ABSTRACT

Flood discharge structures are crucial devices for the safety of dams, and a detailed understanding of their operation is essential to evaluate the safety level of structure.

At project phase, this knowledge is acquired while optimizing and validating the device's design. This requires the use of modeling methods, ranging from the simplest to the most complex. When geometry requires the flow to overcome weirs, curves, steps and other obstacles, it is often necessary to employ physical modeling or 3D computational fluid dynamics (CFD) simulations, or both.

For an existing dam, this functioning analysis takes place during the comprehensive examination as part of the risk assessment study of the structure. It is an input data for the design review, allowing the characterization of the stresses related to natural hazards. When the flood discharge capacity is uncertain, it is common to prioritize numerical modeling methods over physical modeling to simulate the hydraulic functioning of the structure.

Physical modeling, traditionally used in hydraulic studies, involves replicating the structure at a reduced scale to directly observe and measure the water flow characteristics under controlled conditions. Respect of the dynamic similarity laws is necessary for the results from the scale model to be representative of the prototype.

For over a decade, the adoption of 3D numerical modeling in hydraulic studies has become widespread, driven by the increasing computational power of standard computers. This method relies on the approximate numerical solution of the Navier-Stokes equations implemented in Computational Fluid Dynamics (CFD) software.

The competition between the two methods is often debated, whereas it is more appropriate to highlight their complementarity. The lower cost and the power of CFD tools make 3D numerical modeling suitable for preliminary optimization of a design or assessment of existing structures. Concurrently, physical modeling is a reliable and more flexible tool for some optimizations, which should be employed for the final validation of a design.

The purpose of the publication is to showcase the complementarity of the two modeling approaches by comparing their limitations through examples of ISL projects.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude de dangers d'un barrage, la caractérisation du fonctionnement de son évacuateur de crues est nécessaire pour l'analyse de tous les modes de rupture. Cette connaissance apporte les éléments requis pour l'appréciation des cotes de retenue atteintes lors des crues, du risque de surverse par-dessus le barrage, du risque de débordement de l'évacuateur, des sollicitations exercées par l'écoulement sur les structures et du risque d'érosion à l'aval de l'évacuateur.

Pour répondre à ce besoin, les approches analytiques souffrent de carences quand il s'agit d'étudier des géométries complexes avec présence de singularités ou de caractériser des écoulements tridimensionnels présentant une répartition non uniforme des champs de vitesse et de pression.

D'autre part, la modélisation physique est un outil fiable mais couteux et nécessite des délais importants. Cette méthode est également affectée d'une limitation physique du fait de l'impossibilité de satisfaire simultanément la similitude de Froude et de Reynolds. Dans un modèle réduit suffisamment grand, les effets visqueux ne sont pas significatifs par rapport à la force de gravité et la similitude de Froude est privilégiée à la similitude de Reynolds avec l'utilisation des fluides du prototype dans le modèle réduit. Cependant, en réduisant la taille du modèle la hauteur de l'écoulement diminue augmentant ainsi l'impact de la viscosité. Cela peut occasionner des écarts entre les mesures du modèle et la réalité.

La modélisation hydraulique 3D, basée sur la mécanique des fluides numériques (CFD), est une approche intermédiaire en termes de coût et de délais. Celle-ci permet également de pallier les insuffisances des approches analytiques et les limites de la modélisation physique. Le principal désavantage de cette méthode est la forte dépendance des résultats aux paramètres de modélisation, notamment la finesse du maillage.

Dans la suite du présent article, seront présentés trois études de dangers réalisées par ISL et ayant nécessité le recours à une modélisation hydraulique 3D pour caractériser le fonctionnement du dispositif d'évacuation des

crues. Ensuite, la complémentarité entre les modélisations physique et numérique sera mise en avant à travers deux projets de barrage.

2. ETUDES DE DANGERS ET MODELISATION HYDRAULIQUE 3D

2.1. Barrage A

- Description de l'évacuateur de crues

L'ouvrage est un barrage poids construit entre 1888 et 1891. L'évacuateur de crues du barrage est constitué d'un déversoir latéral de type seuil non profilé arasé à 489,50 m NGF, de forme courbe, associé à un deuxième seuil frontal arasé à 488,25 m NGF, équipé d'un clapet et déversant dans une auge. Le débit collecté est ensuite acheminé vers une cascade à l'aval via un coursier de section trapézoïdale caractérisé par un passage sous un pont, deux rétrécissements permettant de réduire la largeur de 5,5 m à 2,5 m, plusieurs marches, un mur rive droite en béton et une paroi de la rive gauche au rocher.

Figure 1 – Photos de l'évacuateur du barrage A

- Difficultés

Le maître d'ouvrage ne dispose d'aucune note relative à la débitance de l'évacuateur ou à son dimensionnement hydraulique. Par ailleurs, la complexité de l'écoulement rend difficile l'utilisation des approches analytiques : direction des vecteurs vitesse tridimensionnelle dans la zone de prise, submersion du seuil frontal, forme du seuil latéral non standard, marches et courbure dans le coursier. Une modélisation hydraulique 3D de l'évacuateur de crues a été mise en œuvre.

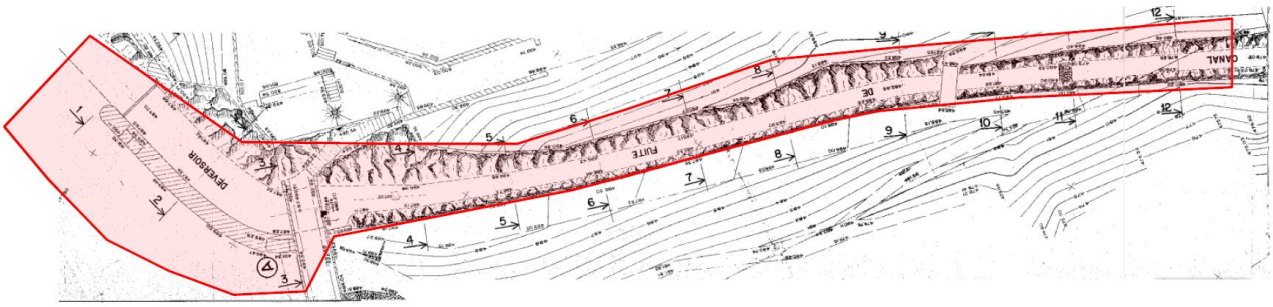

Figure 2 – Périmètre du modèle hydraulique 3D – Evacuateur – Barrage A

- Résultats

Les simulations réalisées sur le modèle hydraulique 3D ont permis d'estimer la loi de débitance de l'évacuateur de crues et de vérifier l'absence de débordement dans le coursier jusqu'à la crue de projet (3 000 ans).

Les simulations réalisées sur le modèle hydraulique 3D ont permis de vérifier l'absence de débordement dans le coursier jusqu'à la crue de projet (3 000 ans), y compris dans les zones avec surélévation locale due à la formation d'ondes stationnaires, phénomène attendu en raison du changement brusque de direction.

Les résultats ont aussi mis en évidence les conditions d'ennoiement des seuils par un contrôle aval du fait de l'étroitesse du canal. La loi de débitance de l'évacuateur obtenue est différente de la courbe estimée par les méthodes analytiques.

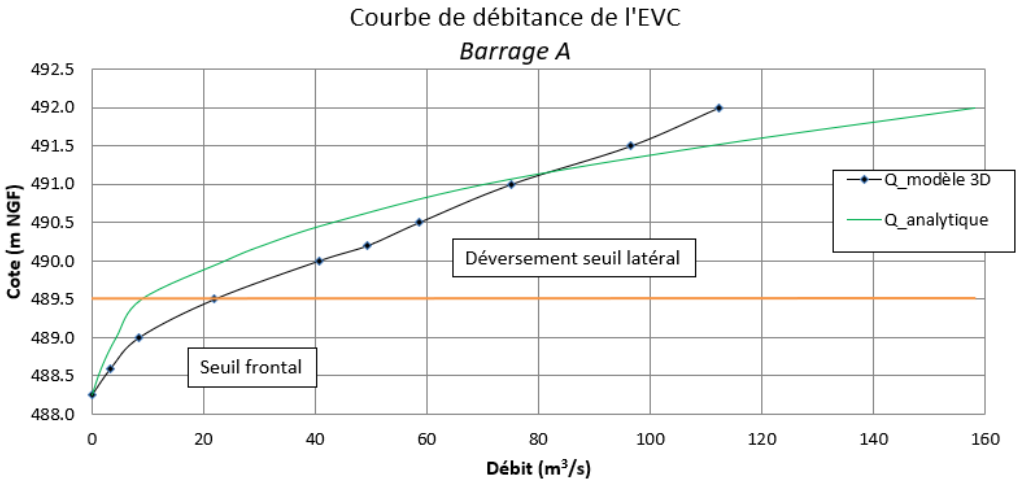

Figure 3 – Courbe de débitance de l'évacuateur – Barrage A

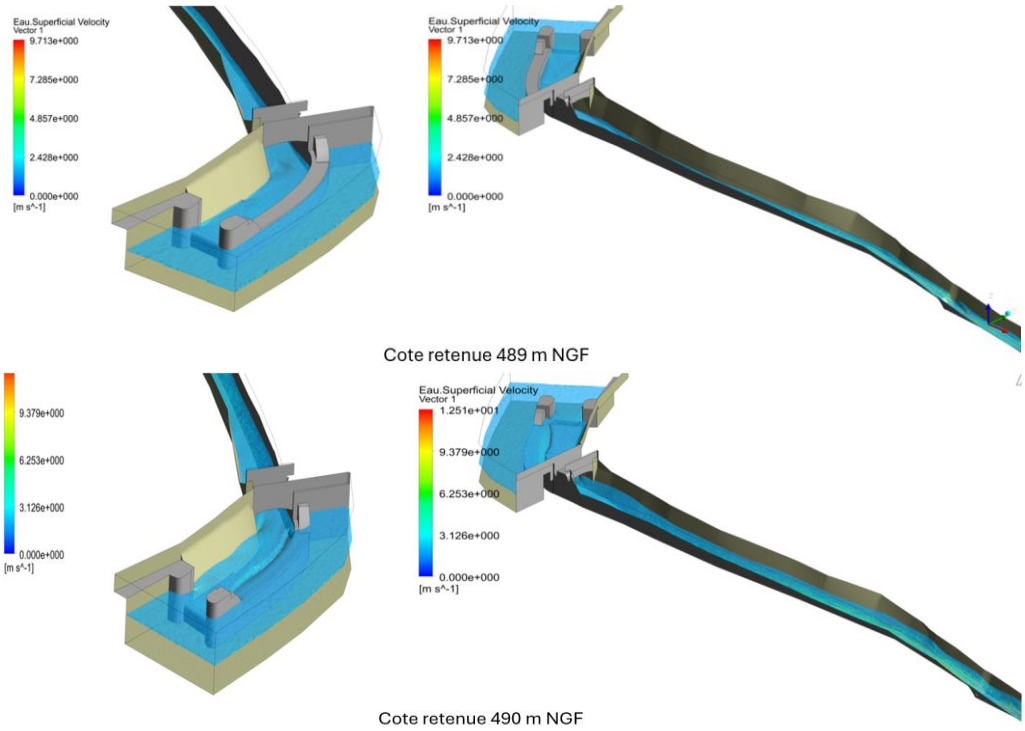

Figure 4 – Forme de la surface libre pour deux débits – Evacuateur – Barrage A

2.2. Barrage B

- Description de l'évacuateur de crues

L'ouvrage est un barrage poids en maçonnerie construit entre 1881 et 1910 puis conforté par une recharge aval. L'évacuateur de crues, situé en rive droite du barrage, est constitué de deux pertuis voutés d'une hauteur maximale d'environ 0,9 m et de section totale 9 m^2. Ils déversent dans une auge prolongée par un coursier qui rejoint une rigole de restitution en aval du barrage.

Figure 5 – Photos de l'évacuateur du barrage B

- Difficultés

Historiquement, le débit de l'évacuateur a été déterminé par des approches analytiques en considérant le fonctionnement d'un seuil épais jusqu'à mise en charge des pertuis suivi d'un écoulement de type orifice. Etant donnée la configuration de l'ouvrage, le choix du coefficient de débit à associer au pertuis parait aléatoire. Par ailleurs, il s'avère que le seuil n'est pas horizontal, mais qu'il présente une pente ascendante dans la direction amont-aval. La géométrie du pertuis s'apparente ainsi davantage à celle d'un ajutage convergent.

Enfin, l'évaluation du risque d'érosion de la recharge aval nécessite de vérifier le confinement de l'écoulement dans le coursier et le canal de restitution. Etant donné la complexité de l'ouvrage, une modélisation hydraulique 3D de l'évacuateur de crues a été mise en œuvre.

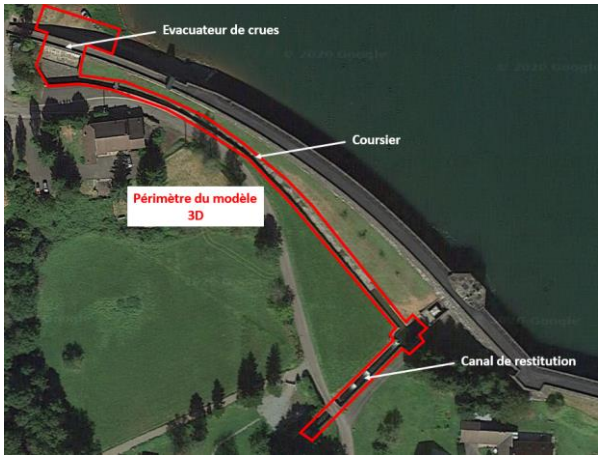

Figure 6 – Périmètre du modèle hydraulique 3D – Evacuateur – Barrage B

- Résultats

Les simulations réalisées avec le modèle hydraulique 3D ont permis de redéfinir le fonctionnement de l'évacuateur de crues. Par rapport aux approches analytiques, il débite plus que prévu avant la mise en charge des pertuis (-15 à -20%) et moins après.

L'analyse de la surface libre de l'écoulement a mis en évidence la nécessité de rehausser localement les murs du coursier afin de garantir l'absence de débordement pour la crue de projet (10 000 ans). Une revanche a été considérée en affectant la réhausse minimale nécessaire d'un coefficient de sécurité de 1,5 afin de pallier les éventuelles incertitudes dues à des écarts géométriques ou à des comportements instationnaires de l'écoulement.

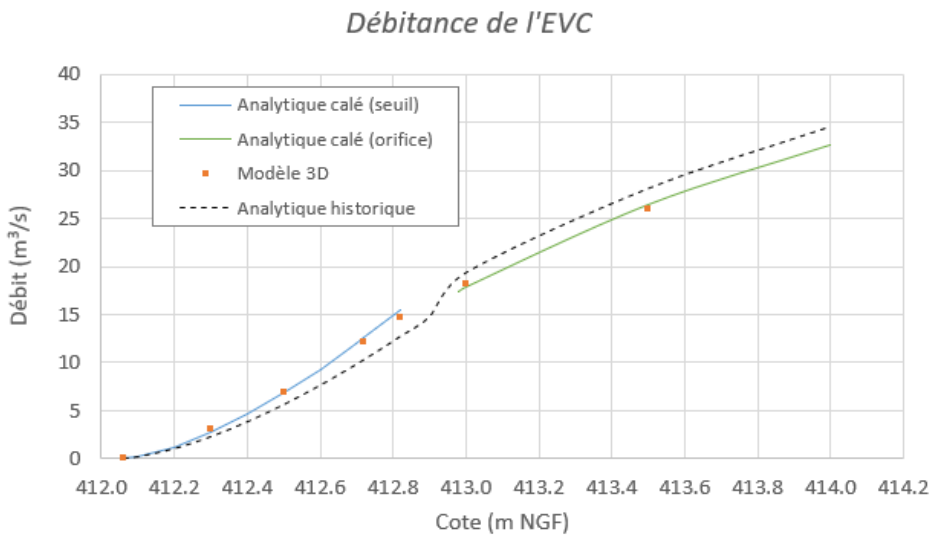

Figure 7 – Courbe de débitance de l'évacuateur – Barrage B

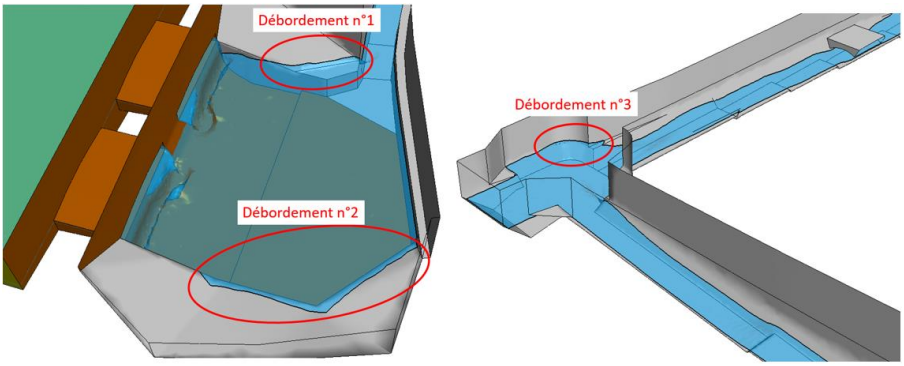

Figure 8 – Zones de débordement dans le coursier de l'évacuateur – Barrage B

2.3.Barrage C

- Description de l'évacuateur de crues

Il s'agit d'un barrage en remblai, mis en eau en 1979. L'évacuateur de crues, situé en rive droite du barrage, est composé d'un seuil latéral déversant dans une auge puis d'un coursier se terminant par un saut de ski. Un seuil situé au départ du coursier participe au contrôle du niveau d'eau dans l'auge.

- Difficultés

Historiquement, le fonctionnement hydraulique de l'évacuateur de crues a été analysé par des approches analytiques. Une modélisation hydraulique 3D de l'évacuateur de crues a été mise en œuvre pour fiabiliser l'analyse du fonctionnement.

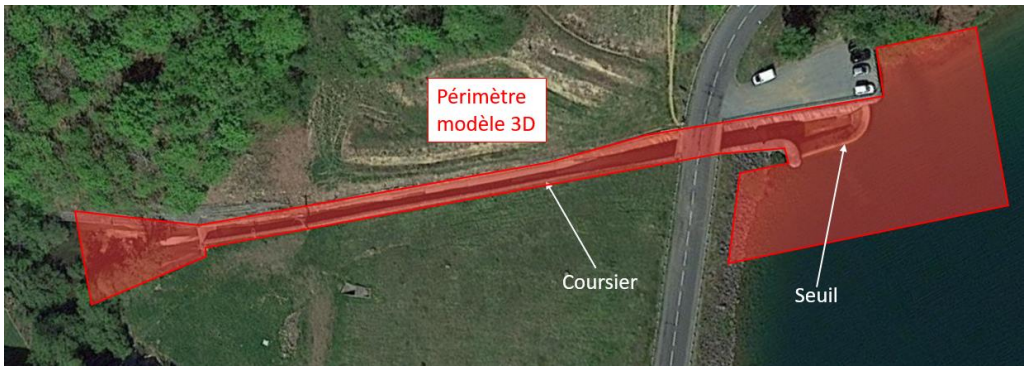

Figure 9 – Périmètre du modèle hydraulique 3D – Evacuateur – Barrage C

- Résultats

Les simulations réalisées avec le modèle hydraulique 3D ont permis de redéfinir le fonctionnement de l'évacuateur qui, lors de fortes crues, débite moins que prévu par les approches analytiques adoptées dans les études précédentes. La raison de cet écart est l'ennoiement du seuil par le niveau d'eau dans l'auge.

L'analyse de la surface libre de l'écoulement a mis en évidence la nécessité de rehausser localement les bajoyers du coursier afin de garantir l'absence de débordement pour la crue de projet (10 000 ans). Une revanche a été considérée, permettant de contenir l'écoulement jusqu'à la crues extrême (100 000 ans).

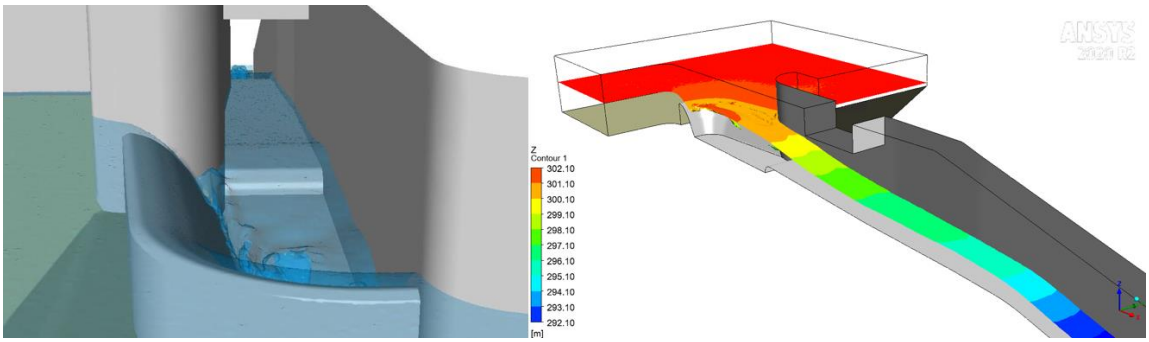

Figure 10 – Surface libre de l'écoulement – Evacuateur – Barrage C

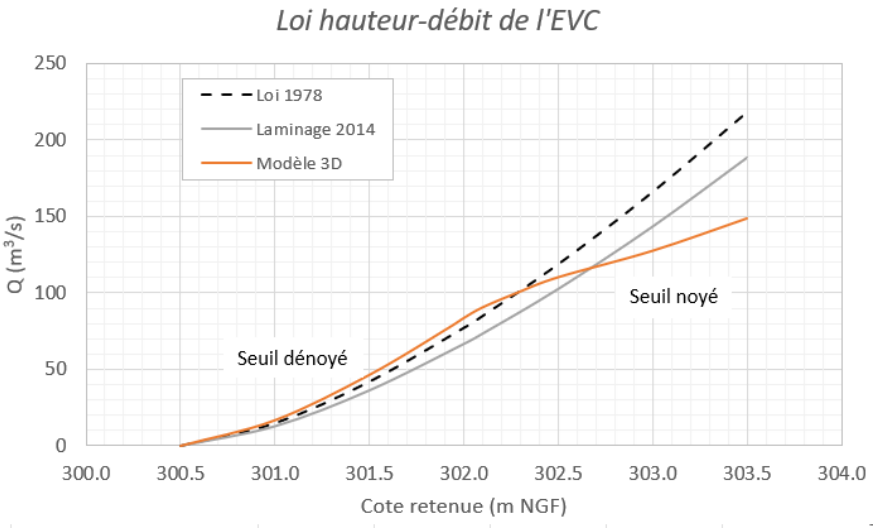

Figure 11 – Courbe de débitance de l'évacuateur – Barrage C

3. COMPLEMENTARITE MODELES HYDRAULIQUES 3D ET PHYSIQUE

Deux exemples de MOE ISL ayant nécessité le recours à un modèle hydraulique 3D et un modèle physique sont présentés dans ce chapitre.

3.1. Barrage D

- Description du système d'évacuation des crues

Le dispositif initial d'évacuation de crues est constitué d'une double tulipe comprenant 2 pertuis de demi-fond qui alimentent 2 galeries sous remblais de 6 m de diamètre. Dans le cadre du projet de sécurisation du barrage, il est prévu la construction d'une carapace en BCR sur le remblai dont la partie centrale assurera la fonction d'évacuateur complémentaire. Il s'agit d'un seuil trapézoïdal déversant dans un coursier à marches d'escalier.

- Méthodologie

Le dimensionnement du nouvel évacuateur de crues a nécessité 4 étapes :

- Etape 1 (phase AVP) : prédimensionnement de plusieurs conceptions à l'aide d'approches analytiques et modélisation hydraulique 3D : seuil épais, seuil Creager, coursier avec saut-de-ski, coursier à marches d'escalier ;
- Etape 2 (phase AVP) : vérification de la solution retenue (seuil + marches d'escalier) sur modèle physique à l'échelle 1/40 ;
- Etape 3 (phase PRO) : optimisation de façon itérative de la solution retenue sur modèle hydraulique 3D (coût inférieur à un modèle physique) ;
- Etapes 4 (phase PRO) : validation des optimisations sur modèle physique (seuil non profilé déplacé vers l'amont, profil en marches d'escalier du coursier et entonnement modifiés, bassin de dissipation supprimé).

Figure 12 – Modèle physique et hydraulique 3D de l'évacuateur projeté – Barrage D

- Résultats

La débitance du nouvel évacuateur de crues a été validée par les deux modèles physique et numérique 3D.

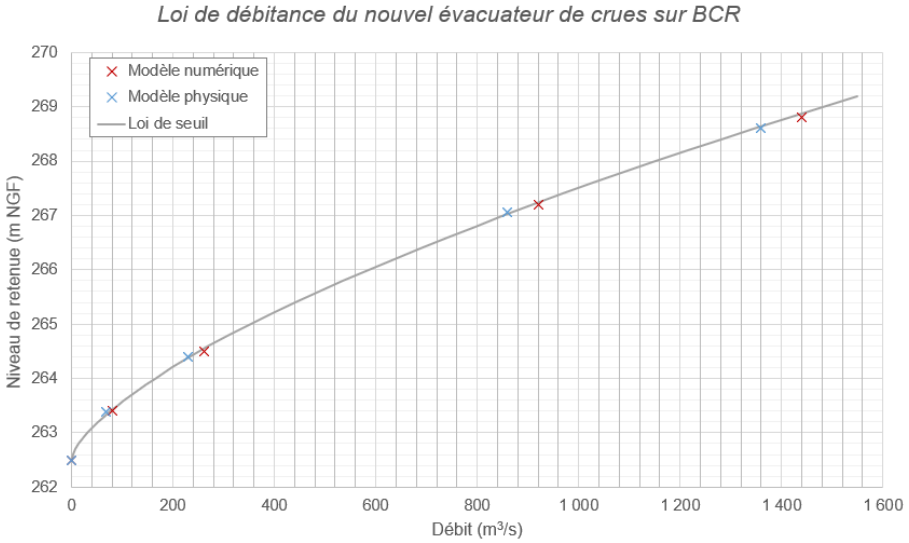

Figure 13 – Débitance de l'évacuateur projeté sur le barrage D – Résultats modèles physique et numérique

L'écart entre les deux modèles sur la hauteur de la lame d'eau dans le coursier est d'au maximum 12%. Il est observé dans le cas des plus faibles débits. Cet écart est atténué avec l'augmentation du débit et par conséquent de l'épaisseur de la lame d'eau. Ces deux indices montrent que l'écart peut être imputé, pour le modèle physique, à une forte incertitude des mesures de hauteurs d'eau dans un écoulement fluctuant et qui plus est constitué d'un mélange air/eau.

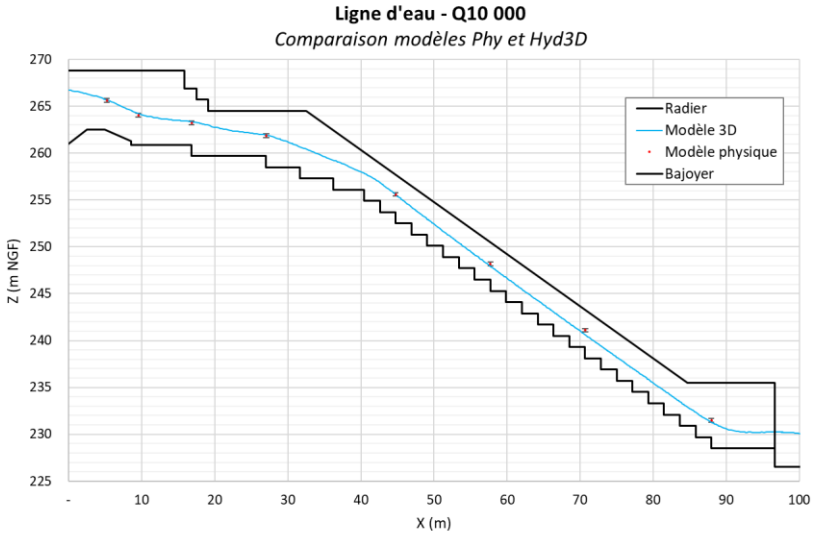

Figure 14 – Ligne d'eau dans l'axe de l'évacuateur projeté sur le Barrage D – Résultats modèle physique et numérique

Figure 15 – Illustration de la difficulté de mesurer la hauteur d'eau dans la zone aérée – Evacuateur barrage D

La fiabilité de la mesure des vitesses peut également poser question compte tenu du diamètre du moulinet de 50 mm par rapport à l'épaisseur de la lame d'eau à l'échelle du modèle physique de l'ordre de 25 mm à l'aval immédiat du seuil pour la Q1 000. Cela peut en effet expliquer la dissymétrie constatée sur le modèle physique pour les valeurs de vitesse entre les deux rives de l'évacuateur qui s'atténue avec l'augmentation du débit évacué et qui n'est pas présente dans les résultats du modèle numérique.

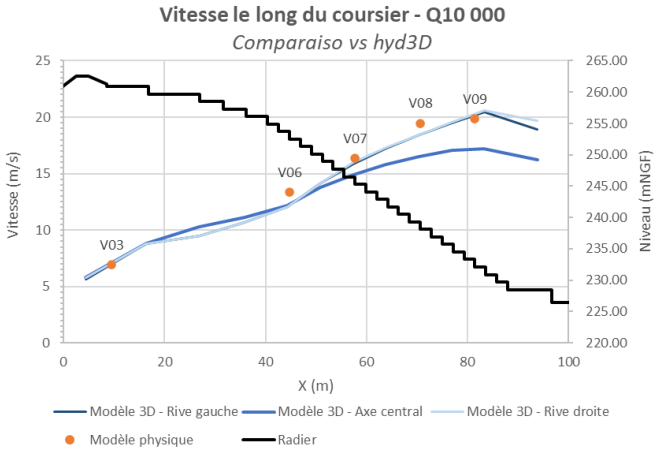

Figure 16 – Vitesse le long du coursier – Résultats modèles physique et numérique – Evacuateur barrage D

Concernant le risque de cavitation, le modèle numérique montre que la pression la plus basse apparait dans la zone de décollement de la lame d'eau entre les marches 5 et 6, en cohérence avec la dynamique de l'écoulement. Le calcul de l'indice de cavitation à cet endroit montre qu'il s'agit d'une zone à risque d'endommagement par cavitation. Sur le modèle physique les capteurs de pression n'ont pas été installés à cet endroit, et les mesures ne permettent donc pas de mettre en évidence ce risque.

Par ailleurs, l'érodabilité du substratum au pied de coursier a pu être évaluée grâce à la fourniture par le modèle numérique de la contrainte de cisaillement générée par l'écoulement au contact du rocher. Cette contrainte a été utilisée pour estimer la puissance surfacique dissipée qui, croisée avec l'indice d'érodabilité du rocher sur l'abaque d'*Annandale*, a permis de juger du risque d'érosion des matériaux.

3.2. Barrage E

- Description du système d'évacuation des crues

Le projet consiste à rehausser un seuil existant de type Creager de 210 m de longueur de déversement et à construire un évacuateur additionnel de type PK-Weir constitué de 50 alvéoles sur une largeur total de 242 m. Chaque seuil déverse dans une auge prolongée d'un coursier acheminant l'eau jusqu'à un saut-de-ski situé à quelques centaines de mètres à l'aval.

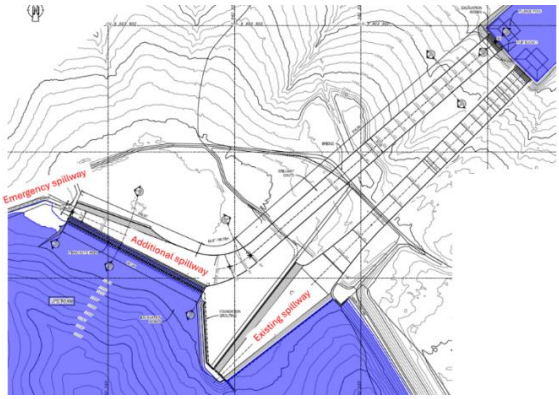

Figure 17 – Vue en plan du système d'évacuation des crues prévu – Barrage E

- Méthodologie

La phase de dimensionnement et d'optimisation des évacuateurs de crues s'est déroulé en 3 étapes :

- Etape 1 (phase AVP) : prédimensionnement avec les approches analytiques et modèle hydraulique 2D des évacuateurs de type Creager et PKW.
- Etape 2 (phase AVP) : dimensionnement sur la base d'un modèle hydraulique 3D de l'évacuateur PKW.
- Etape 3 (phase PRO) : optimisation et validation avec modèle physique des évacuateurs de type Creager et PKW.

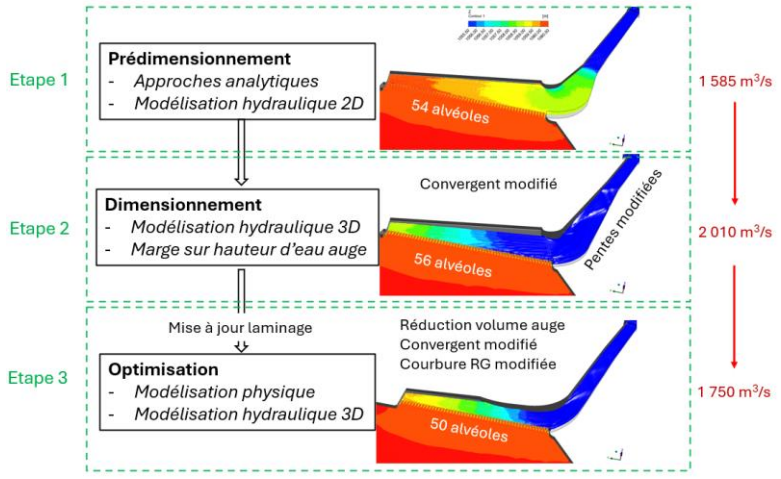

Figure 18 – Schéma présentant les étapes de déploiement des différents modèles

Modèle hydraulique 3D

Le modèle hydraulique 3D mis en place ne concerne que le nouvel évacuateur de type PKW. Le débit de ce type de seuil dépend de plusieurs paramètres géométriques et les approches analytiques disponibles [1, 2, 3] ne couvrent pas toutes les géométries possibles.

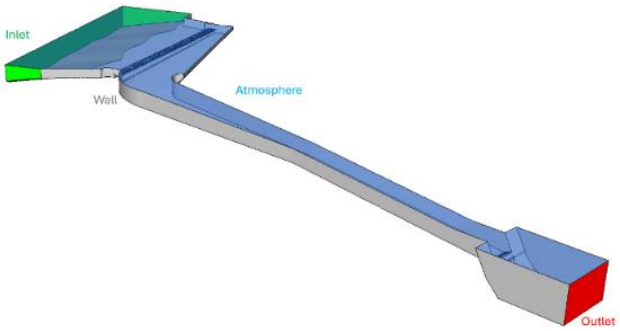

Figure 19 – Modèle hydraulique 3D de l'évacuateur type PKW – Barrage E

Modèle physique

L'hétérogénéité des dimensions des évacuateurs de crues est telle que les dimensions dans les directions horizontales (quelques centaines de mètres) sont plus de deux ordres de grandeur supérieures aux dimensions dans la direction verticale (quelques mètres). Pour cette raison, deux modèles à deux échelles différentes ont été réalisés :

- Un modèle global à l'échelle 1 :100, incluant la totalité des deux évacuateurs, permettant d'analyser le comportement de l'écoulement depuis les seuils jusqu'au bassin de réception.
- Un modèle local à l'échelle 1 :10, représentant deux alvéoles du PKW et permettant de mesurer la débitance du seuil en minimisant les effets d'échelle.

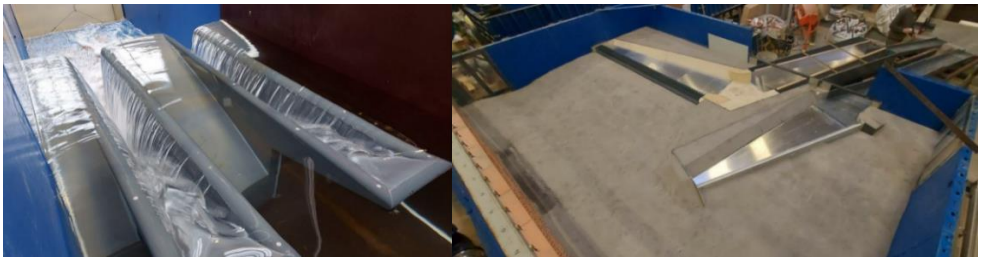

Figure 20 – Modèles physiques du système d'évacuation des crues – Barrage E

- Résultats

Etape 2 : dimensionnement avec modèle 3D

Le modèle 3D réalisé avec la géométrie dimensionnée à l'étape 1, montre que le débit évacué pour la cote de projet est inférieur à la valeur estimée par la méthode analytique. L'écoulement sur le seuil est noyé par le niveau d'eau dans l'auge qui a été sous-estimé lors des études de prédimensionnement du fait de la complexité du comportement de l'écoulement : déversement suivi d'un ressaut et d'un changement de direction de l'écoulement avec élargissement de section de l'auge. Cette complexité n'est pas prise en compte dans les formules analytiques et les modèles hydrauliques 2D utilisés.

Sur la base du modèle 3D des corrections ont été apportés à la géométrie (nombre d'alvéoles, pentes du radier du coursier et convergent) de sorte à respecter le critère de débit initial.

Etape 3 : optimisation avec modèle physique

La mise à jour du calcul de laminage a conclu que l'EVC était surdimensionné. La crue de projet (10 000 ans) pouvait être évacuée avec une débitance moindre de l'évacuateur. Ces observations déduites de l'étape 2 ont conduit, pour l'étape 3, à réduire le nombre d'alvéole du PKW et le volume de l'auge.

Deux optimisations supplémentaires ont été amenées par le modèle physique et concernent la forme des bajoyers. Ces modifications visent à atténuer deux phénomènes observés à la fois sur le modèle hydraulique 3D et le modèle physique comme le montre les figures ci-dessous. Il s'agit du développement d'ondes stationnaires dans le coursier conduisant à des surélévations locales sur les bajoyers, et la formation d'une zone de recirculation à l'aval immédiat de la courbure du mur rive gauche.

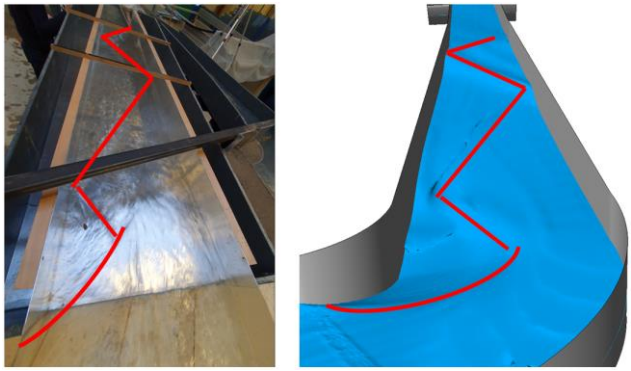

Figure 21 – Ondes stationnaires dans le coursier de l'évacuateur – Barrage E

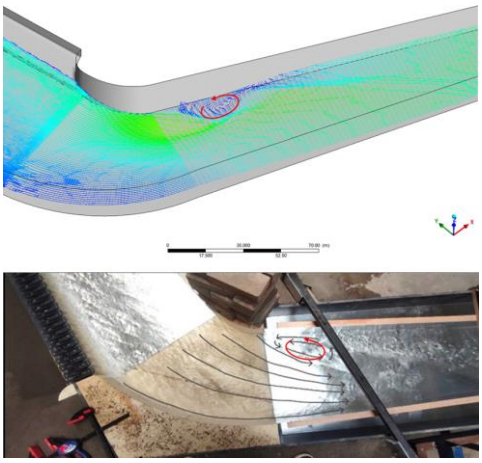

Figure 22 – Zone de recirculation en début de coursier – Evacuateur – Barrage E

Les tests nécessaires à l'optimisation de la forme des bajoyers ont été réalisés sur le modèle physique, étant donné que leur mise en œuvre a été moins coûteuse que sur le modèle hydraulique 3D. Une fois les modifications fixées, le modèle numérique a été mis à jour afin de confronter les résultats des deux méthodes.

Les débits et les niveaux d'eau sur les bajoyers sont présentés sur les figures ci-dessous. La différence de débit entre les deux modèles physiques, local et global, met en évidence l'importance des effets d'échelle. Quand le seuil déverse sans influence du niveau aval, le modèle global sous-estime le débit par rapport au modèle local et au modèle numérique, en raison des effets visqueux observés pour des charges au-dessus de la crête du PKW inférieures à 1 cm. L'impact du non-respect de la similitude de Reynolds peut également expliquer les niveaux d'eau mesurés au droit des bajoyers globalement plus élevés que les valeurs du modèle hydraulique 3D.

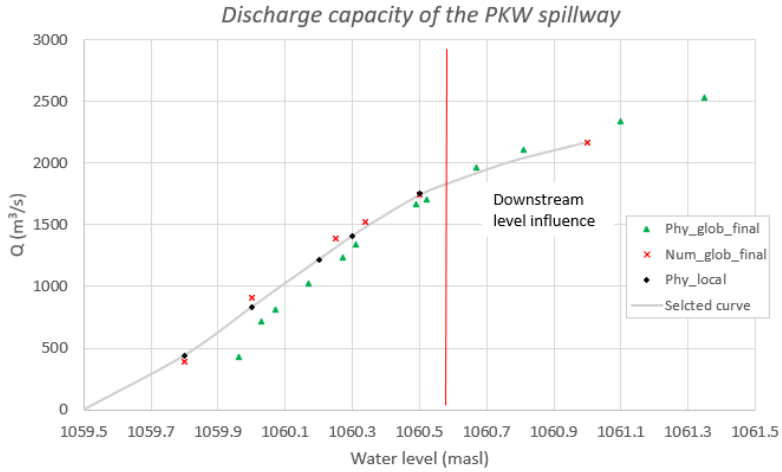

Figure 23 – Débitance de l'évacuateur type PKW – Barrage E – Résultats modèles physique et numérique

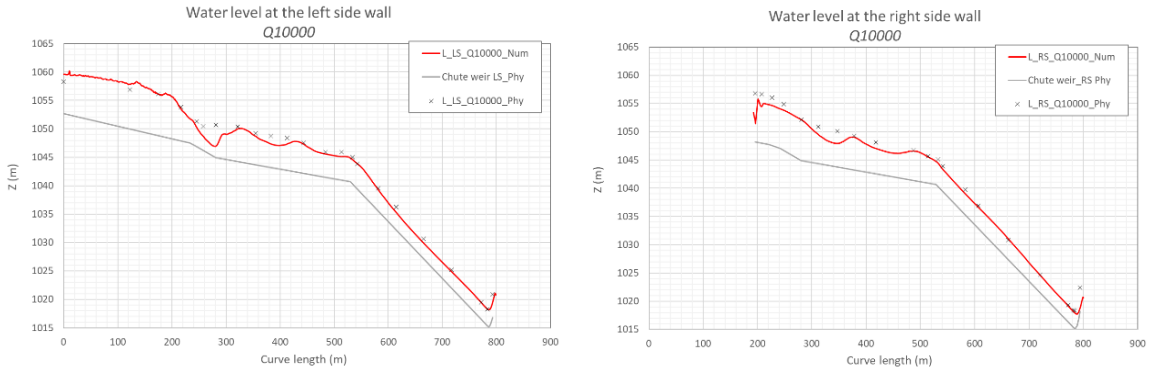

Figure 24 – Niveau d'eau sur les bajoyers de l'évacuateur type PKW – Barrage E – Résultats modèles physique et numérique

4. LES INCERTITUDES ET LES TESTS DE SENSIBILITE SUR LES MODELES 3D

La principale source d'incertitude pouvant affecter les résultats d'un modèle hydraulique 3D est relative au maillage. Il est usuellement recommandé de considérer au minimum une dizaine de mailles sur la hauteur de l'écoulement avec des éléments relativement fins à l'interface eau/air. Une analyse de sensibilité des résultats est toujours nécessaire. La figure ci-dessous présente un exemple d'une analyse de sensibilité d'un modèle hydraulique 3D au maillage avec la variation du débit et le temps de calcul sur 4 processeurs à fréquence 3 GHz.

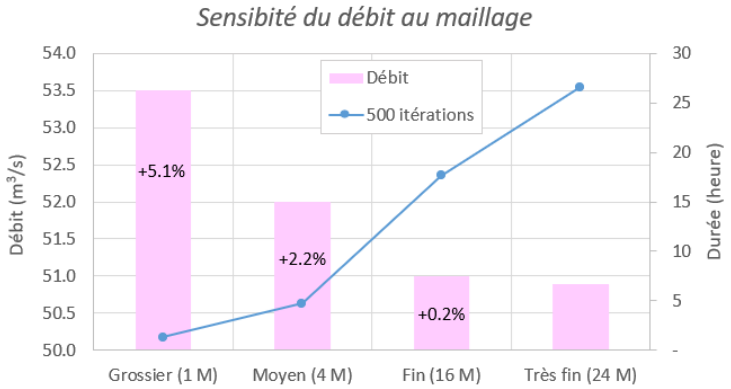

Figure 25 – Analyse de sensibilité du débit au maillage – Modèle 3D EVC

La rugosité des parois peut également introduire une incertitude sur les résultats d'un modèle 3D. Il s'agit de la difficulté à modéliser l'état d'une surface présentant en réalité une forte hétérogénéité de rugosité. Des écarts non negligeables peuvent être produits sur les hauteurs d'écoulement si l'épaisseur de la lame d'eau est faible avec une surface très rugueuse. Sur le débit l'impact est en ravanche negligeable étant donné qu'il est généralement controlé par des surfaces en béton.

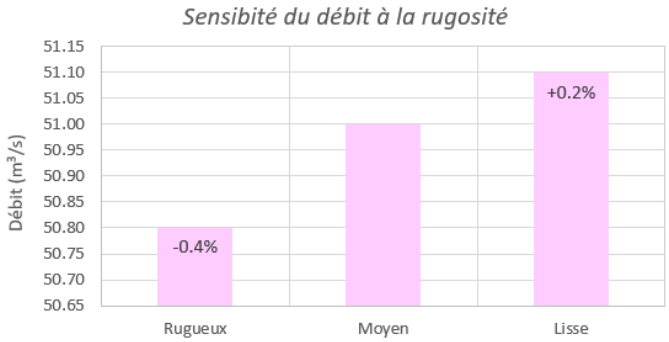

Figure 26 – Analyse de sensibilité du débit à la rugosité du béton – Modèle 3D EVC

De façon plus général, un modèle hydraulique 3D d'évacuateur de crues, correctement maillé avec des rugosités cohérentes avec la réalité, en supposant une incertitude de 5 % sur le calcul du débit, l'incertitude induite sur la hauteur de la lame d'eau au-dessus du seuil est de 3,35 %. Cet écart est faible comparé à ceux induits par les incertitudes liées à l'hydrologie ou au modèle de laminage.

5. CONCLUSION

Pour la compréhension du fonctionnement des évacuateurs de crues, dans certaines études de dangers, les exemples présentés mettent en évidence la nécessité de recourir à la modélisation hydraulique 3D (CFD) pour pallier les insuffisances des méthodes analytiques. En effet, si les approches analytiques ne peuvent fournir une fiabilité suffisante vis-à-vis de l'analyse de certains phénomènes tels que la débitance d'un seuil noyé ou complexe, la formation d'ondes, le risque d'érosion ou d'endommagement par cavitation, la modélisation hydraulique 3D est une alternative adaptée. En revanche, la modélisation physique ne peut être envisagée dans ces cas en raison d'un coût très élevée.

La modélisation hydraulique 3D est donc un outil à la fois accessible et fiable. Il est toutefois important de souligner qu'une validation du modèle numérique est indispensable, nécessitant au minimum une analyse de la sensibilité des résultats au maillage.

Dans les études de projets, si le budget et les délais le permettent, il est recommandé d'employer conjointement la modélisation physique et la modélisation hydraulique 3D, en raison de leur nature complémentaire. Il est par ailleurs rappelé l'importance de considérer les effets visqueux dans l'interprétation des mesures d'un modèle physique de très petite échelle.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] HAGER W., SCHLEISS A., Traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Volume 15. Constructions Hydrauliques. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Switzerland. (Edition 2009)

[2] LE DOUCEN O., LEITE RIBEIRO M., BOILLAT J.-L, SCHLEISS A., LAUGIER F. (2009). Etude paramétrique de la capacité des PK-weirs. Société Hydraulique de France : « Modèles physiques hydrauliques – outils indispensables du XXIe siècle », 24-25 novembre 2009, Lyon

[3] PFISTER M., SCHLEISS A. (2013). Estimation of A-type Piano Key weir rating curve. Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH - 1015 Lausanne, Switzerland