

EXPLOITATION DES BARRAGES VANNES - RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE CALCUL DE LA DEBITANCE DES BARRAGES - ETUDES SUR MODELES PHYSIQUE ET MODELES NUMERIQUES

Operation of gated dams- feedback on physical and numerical models studies for calculation of dams flow rates

Magali, de Cachard¹, Pierre, Roumieu, Sébastien, Roux
4 rue de Chalon sur Saône, 69007 Lyon
m.decachard@cnr.tm.fr, s.roux@cnr.tm.fr, p.roumieu@cnr.tm.fr

Nicolas, Boisson, Antoine, Vollant, Yannick, Baux
66 boulevard Niels Bohr, CE11, CS 52132, 69603 Villeurbanne Cedex, France
nicolas.boisson@optifluides.net, antoine.vollant@optifluides.net, yannick.baux@optifluides.net

MOTS CLÉS

Modèle hybride, Modèle de turbulence, Maillage, Ecoulement mixte, Vannes segment

RÉSUMÉ

CNR exploite une vingtaine de barrages vannés dont la mise en exploitation a été réalisée entre 1949 et 1987. L'article rappelle en premier lieu les enjeux liés à la bonne connaissance des débits transitant par les ouvrages, en particulier dans le cadre du mode d'exploitation Rhône. Il décrit les principaux résultats des études de débitance réalisées sur modèles physiques, outils utilisés à la CNR depuis 70 ans, qui permettent d'être garant de la cohérence des débits sur le Rhône. L'article traite en particulier de la débitance des vannes en fonction de leurs localisations (passe de rive ou centrale) et du mode d'exploitation du barrage. Pour cela, des essais récents ont été réalisés sur un modèle physique (échelle 1/30) représentant l'ensemble de l'aménagement de Vaugris. La problématique d'écoulement mixte (volet + vanne) est également abordée, et l'intérêt d'une modélisation hybride (couplage modèle numérique/ modèle physique) est présentée.

ABSTRACT

CNR operates around twenty gated dams whose operation began between 1949 & 1987. This article mainly describes the stakes regarding the appropriate knowledge of the flow passing through the structures, specifically in the context of Rhône River Valley scheme operation principle.

It deals with the main tests and results of physical scale modelling, tool that has been used by CNR for the last 70 years in order to ensure the consistency of flow rates along the Rhône River. Specific analyses have been performed on the flow rates related to the operation of the dams and the location (side or central pass) of the opened gates. For that purpose dedicated tests have been performed on overall physical scale model. The issues of shared flows (i.e both under the gates and over the flaps) and of the benefits of hybrid modelling (coupling between numerical modelling and physical experiments) are addressed.

¹Auteur correspondant

1. CONTEXTE

Créée en 1933, la Compagnie Nationale du Rhône a reçu de l'Etat en 1934 la concession du plus puissant fleuve français pour l'aménager et l'exploiter selon trois missions solidaires : production, navigation, irrigation et autres usages agricoles. La CNR a construit, développé et mis en service sur le Rhône 19 centrales hydroélectriques. Ces installations de fortes capacités (entre 45 et 420 MW de puissance installée) sont complétées par 4 Petites Centrales Hydroélectriques (PCH, puissance inférieure à 10 MW) et par 8 Mini-Centrales Hydroélectriques (MCH de 0.5 à 2 MW), pour la plupart destinées à valoriser énergétiquement les débits réservés.

2. ENJEUX LIES A LA BONNE CONNAISSANCE DES DEBITS

Assurer la sûreté hydraulique sur les aménagements est la priorité pour la Compagnie Nationale du Rhône. Pour la régulation automatique des aménagements, le calcul de la commande prédictive s'appuie sur des mesures de niveaux en certains points caractéristiques des retenues (points de réglage), ainsi que sur les débits aux ouvrages (barrages et usines). Il est donc nécessaire de disposer de données de débits suffisamment précises pour obtenir une régulation globale efficace de la chaîne des aménagements hydroélectriques du Rhône. Le débit des barrages est déterminé par un calculateur dans lequel sont intégrées les équations appelées « Equations Rhône 2000 ». Ces équations permettent de déterminer le débit transitant par les volets supérieurs et par les vannes (cf. Figure 1). Elles ont été ajustées, pour chaque barrage à partir d'essais réalisés sur modèle physique, dans les années 2000, représentant une vanne et deux demi-passes latérales à l'échelle 1/35 (cf. Figure 2).

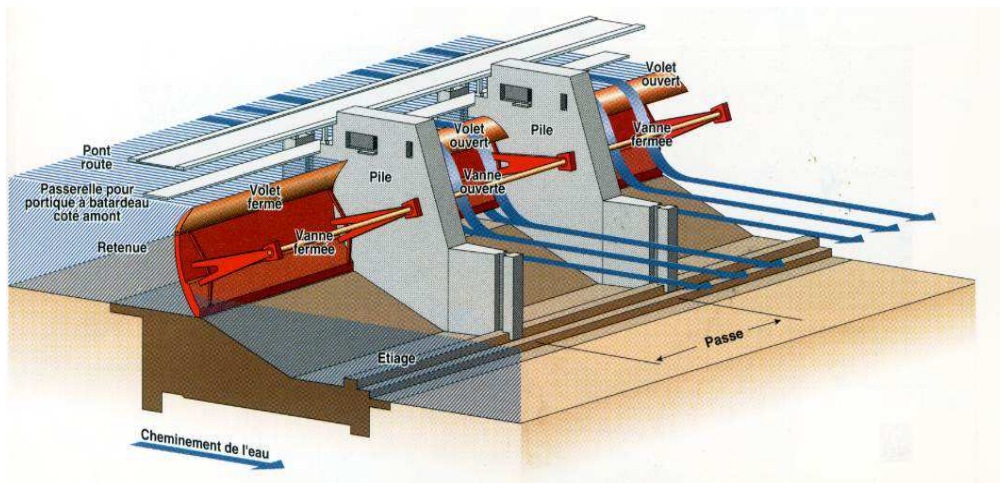


Figure 1 : Schéma de principe d'un barrage équipé de vannes segments et de volets

Dans une démarche d'amélioration continue de la connaissance de la débitance² des ouvrages, des études permettant de prendre en compte certains phénomènes de second ordre sont menées. Il s'agit de déterminer notamment l'influence du fonctionnement des barrages en équi-ouverture (influence du fonctionnement des passes adjacentes), l'influence de la localisation de la passe (en rive, ou dans la zone centrale) ou encore l'influence d'un fonctionnement d'une passe en écoulement mixte (écoulement simultané sur le volet et sous la vanne). Pour ce faire, une étude sur un modèle physique de l'ensemble d'un ouvrage (aménagement de Vaugris) a été réalisée, et des études numériques 3D (avec calage préalable sur les résultats du modèle physique) sont en cours.

L'article balaira la méthodologie des études menées et finalisera sur l'intérêt, aujourd'hui, d'un modèle hybride permettant d'analyser l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu.

² Débit qui transite par le barrage pour des conditions hydrauliques définies (niveau amont, niveau aval, ouverture des passes du barrage)

3. ETUDES 2000-2004 - MODELE PHYSIQUE AVEC UNE PASSE DU BARRAGE

Les équations de débitance ont été déterminées à partir des résultats d'essais en canal vitré au 1/35 (cf. Figure 2). Un modèle a été réalisé pour chaque barrage. Il représente une passe complète (une vanne avec volet et deux piles) et la moitié des 2 passes adjacentes, ces dernières étant fermées lors des essais.



Figure 2 : Vue de l'amont du modèle physique de Vaugris en canal vitré au 1/35

Les études ont été menées en canal vitré de 2000 à 2004 sur 12 barrages du Rhône en aval de Lyon. Les essais ont été réalisés de manière à balayer l'ensemble des débits, des niveaux et des ouvertures de vanne et volet possibles. Ils ont permis de déterminer les équations de débitance des vannes en fonction des niveaux d'eau amont/aval et des ouvertures vanne/volet. Pour chaque barrage, environ 350 essais ont été réalisés. L'écoulement au-dessus des volets est toujours dénoyé. En revanche, en ce qui concerne les vannes, il existe quatre régimes d'écoulement en fonction des hauteurs amont et aval, et en fonction de l'ouverture de la vanne: submergé noyé et submergé dénoyé, non submergé noyé et non submergé dénoyé (cf. Figure 3).

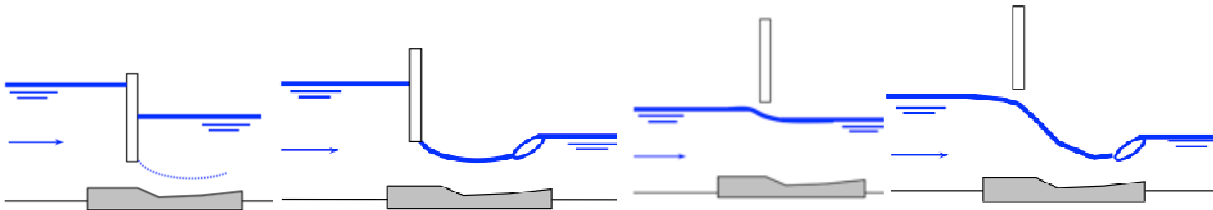


Figure 3 : Régime submergé noyé, submergé dénoyé, non submergé noyé et non submergé dénoyé

A chacun de ces quatre régimes d'écoulement correspond une équation de débitance de la vanne, de la forme suivante (en négligeant les termes d'énergie cinétique) :

$$Q = m \cdot A_{eq} \cdot L \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{am,eq} - h_{av,eq})} \quad (1)$$

où m est le coefficient de débitance, L est la largeur de la vanne, g est l'accélération de la pesanteur, A_{eq} , $h_{am,eq}$ et $h_{av,eq}$ sont définis dans le tableau 1.

Régime	A_{eq}	$h_{am,eq}$	$h_{av,eq}$	x	y	z
Submergé noyé	A	h_{am}	h_{av}	h_{am}	h_{av}	A
Submergé dénoyé	A	h_{am}	$m \cdot A$	h_{am}	$knd \cdot A$	A
Non submergé noyé	h_{av}	h_{am}	h_{av}	h_{am}	h_{av}	$\alpha^* h_{am}$
Non submergé dénoyé	h_{am}	h_{am}	-	h_{am}	$\alpha^* h_{am}$	$\alpha^* h_{am}$

Tableau 1 : Variables A_{eq} , $h_{am,eq}$ et $h_{av,eq}$ de l'équation (1) et variables x, y, z des équations (2) et (3) en fonction du régime d'écoulement sous la vanne

L'équation Rhône 2000 (2) a été définie pour calculer la débitance des vannes quel que soit le régime d'écoulement. Cette équation comporte notamment un coefficient de débitance m (3) qui est exprimé sous forme paramétrique (cf. tableau 1) et qui a été calé à partir des essais réalisés, pour chacun des barrages étudiés.

$$Q_{vanne}(x, y, z) = m(x, y, z)zL\sqrt{2g(x - y)} \quad (2)$$

$$m(x, y, z) = a + b * \left(\frac{z}{x}\right) + c * \left(\frac{y}{x}\right) + d * \left(\frac{z}{x}\right)^2 + e * \left(\frac{y}{x}\right)^2 + f * \left(\frac{z}{x} * \frac{y}{x}\right)^2 \quad (3)$$

Les équations calées sur les résultats du modèle physique permettent gérer les aménagements en calculant le débit transitant à travers les barrages.

4. ETUDES 2012-2014 MODELE PHYSIQUE D'ENSEMBLE

Le modèle d'ensemble choisi est celui de l'aménagement de Vaugris construit au 1/30 (cf. **Figure 4**). L'étude a été réalisée de 2012 à 2014. L'aménagement est composé d'un barrage comportant 6 passes dont 4 sont équipées de volets et d'une usine équipée de 4 groupes bulbes.

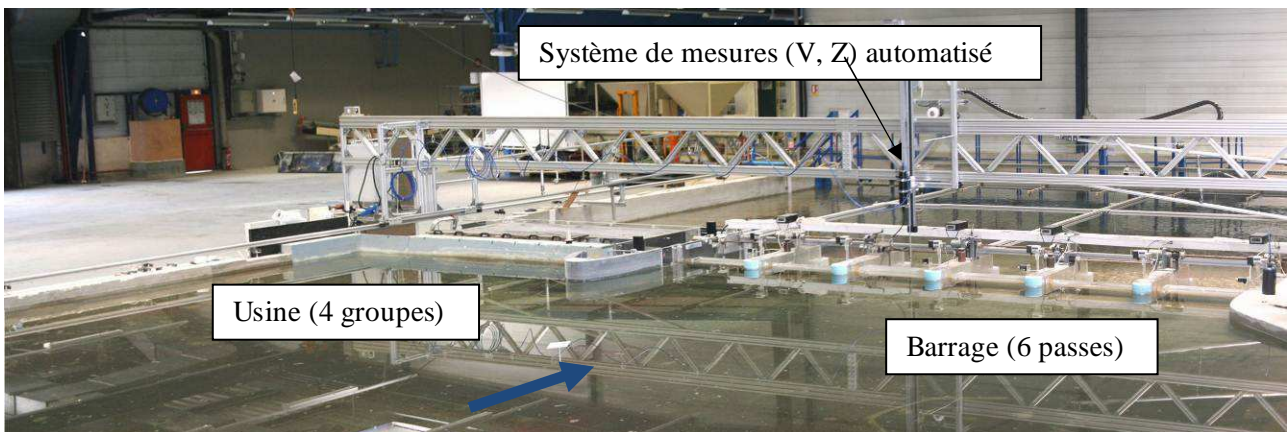


Figure 4 : Vue d'ensemble du modèle physique de Vaugris au 1/30 (à gauche l'usine et à droite les 6 passes du barrage)

4.1 Résultats du modèle physique d'ensemble

Les résultats du modèle physique d'ensemble sont cohérents avec ceux issus des modèles physiques réalisés en canal vitré.

L'exploitation du modèle physique d'ensemble a permis de fournir des résultats complémentaires aux études antérieures. Notamment, il a été mis en évidence les phénomènes hydrauliques principaux suivants :

- Le débit transitant par une passe est sensiblement plus important lorsque les passes adjacentes sont ouvertes. Il est probable que ce soit le phénomène de contraction en amont des passes qui modifie la débitance selon le nombre de passes ouvertes ou fermées au barrage ;
- Pour des débits par vanne inférieurs à environ 500 m³/s, le débit transitant par une passe de rive est légèrement plus faible que le débit transitant par une passe centrale. Pour les débits par vanne plus important cet écart devient négligeable ;
- Lorsque l'écoulement est en régime mixte (écoulement simultané sous la vanne et sur le volet), le débit est, en moyenne, très proche du débit calculé en réalisant la somme des débits de la vanne et du volet pris séparément. Toutefois, compte tenu des limites du modèle physique pour ce type d'essais (cf. 4.2.2), il a été décidé de lancer une étude spécifique sur modèle numérique.;
- Il existe un régime intermédiaire entre le régime noyé (le niveau aval est à prendre en compte pour le calcul du débitance des vannes) et le régime dénoyé (débitance des vannes indépendante du niveau aval).

4.2 L'écoulement mixte

4.2.1 Phénomène physique

Le phénomène d'écoulement mixte se produit pour des crues intermédiaires ($< \text{environ } Q_2$). Pour les crues plus importantes, l'écoulement ne se fait que sous les vannes, les volets étant hors d'eau.

Le calculateur détermine le débit en écoulement mixte en considérant la somme de la débitance du volet et de la vanne prise séparément « Q_{vanne} » + « Q_{volet} », cf. Figure 5.

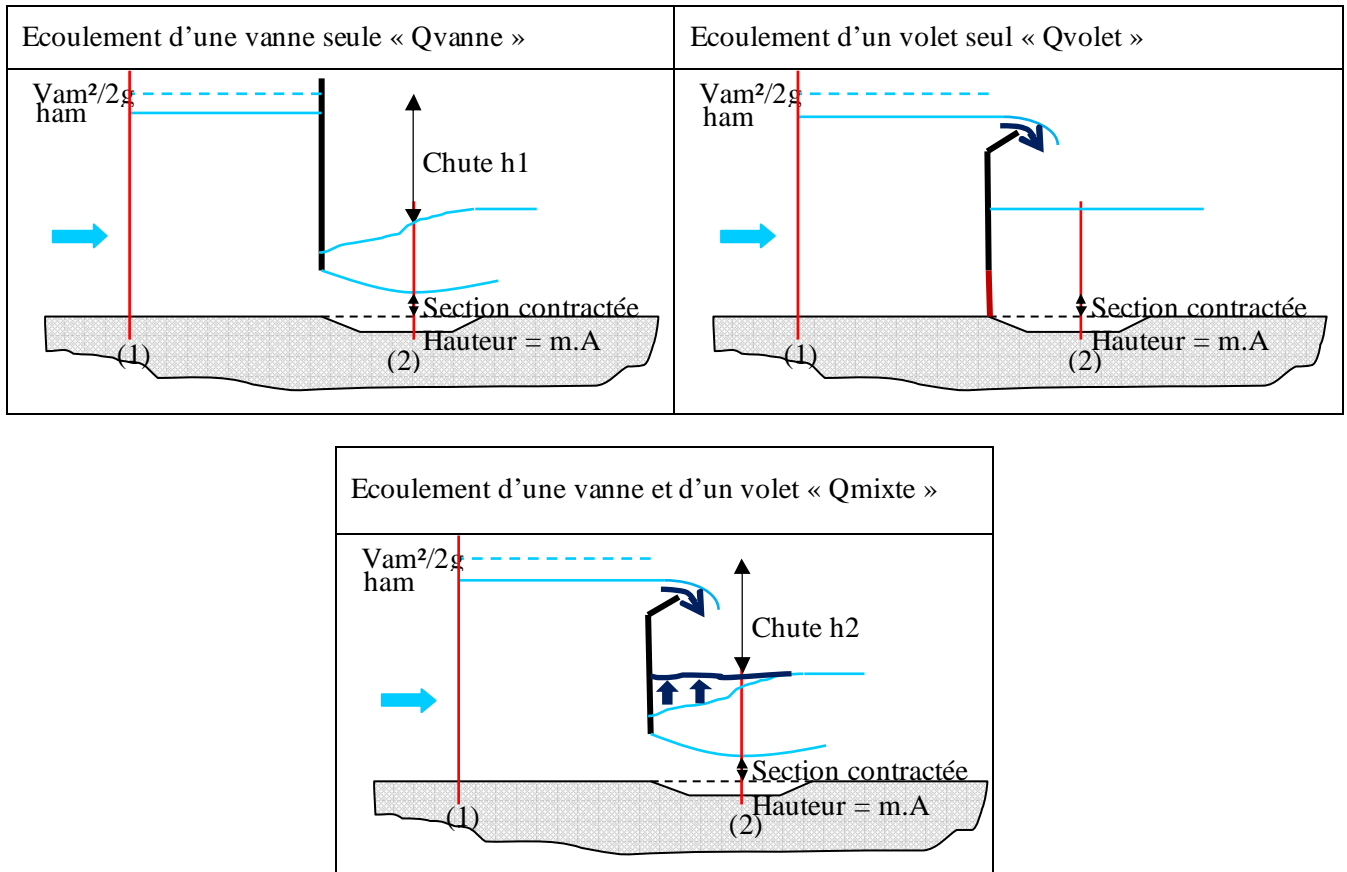


Figure 5 : Ecoulement d'une vanne seule, d'un volet seul et écoulement mixte (vanne et volet simultanément)

On notera que les conditions hydrauliques sont différentes pour les différents cas d'écoulements. On peut citer notamment, la modification du champ de vitesse à l'amont de la vanne, l'augmentation de la perte de charge liée à la rencontre du jet passant sous la vanne et du jet issu du déversement au-dessus du volet (cf. Figure 9), et l'augmentation du niveau à l'aval immédiat de la vanne (diminution de la hauteur de chute locale). Ainsi, afin de quantifier plus en détails les éventuelles corrections à apporter dans le calcul du débit en écoulement mixte, des essais complémentaires vont être réalisés sur modèle numérique (cf. §5).

4.2.2 Limites de l'étude sur modèle physique

Les mesures issues du modèle physique permettent de mettre en évidence et de quantifier le phénomène physique. Afin de pouvoir proposer une correction à appliquer au calculateur, il est nécessaire de disposer de valeurs sur l'ensemble de la gamme d'utilisation de la vanne et du volet.

Compte tenu d'une part, qu'il existe des effets d'échelle sur le modèle physique pour les faibles hauteurs d'eau sur les volets (hauteurs inférieures à 3 cm), et que d'autre part, il est nécessaire d'étudier les écoulements mixtes sur les autres barrages du Rhône, il a été décidé, à ce stade de l'étude de confier à la société Optifluides une étude sur modèle numérique 3D.

Dans une première phase, un modèle numérique 3D établi à l'échelle 1/30 est calé sur les résultats issus du modèle physique. Dans une deuxième phase, ce modèle numérique sera exploité à l'échelle réelle (échelle 1) afin d'évaluer et de corriger les effets d'échelle et de déterminer les lois de caractérisations en écoulement mixte.

5. ETUDE 2015 - MODELISATION HYBRIDE POUR LA PROBLEMATIQUE D'ÉCOULEMENT MIXTE

5.1 Présentation du modèle numérique

L'étude sur modèle numérique est en cours de réalisation. La démarche de modélisation hybride ainsi que les résultats de calage sont présentés. Elle constitue une démarche innovante car elle permet de bénéficier à la fois des atouts de la modélisation physique (pour exemple, représentation de l'ensemble des phénomènes 3D en similitude) et de ceux issus de la modélisation numérique 3D (pour exemple, détermination/visualisation des champs de vitesses, de pression sur de larges domaines), et ceci pour des coûts d'études optimisés.

L'étude sur modèle numérique est réalisée à l'aide d'une modélisation 3D à l'échelle 1 dont le domaine de calcul est restreint à une passe centrale et les deux demi-passes adjacentes (dit domaine intermédiaire). Les choix de modélisation (modèle de turbulence, domaine de calcul, maillage, etc.) sont fait dans une phase de calage. Le calage est réalisé en comparant les résultats du modèle physique à un modèle numérique à l'échelle du modèle physique (1/30) sur le domaine intermédiaire et sur le domaine de calcul complet, c'est-à-dire de même emprise que le modèle physique.

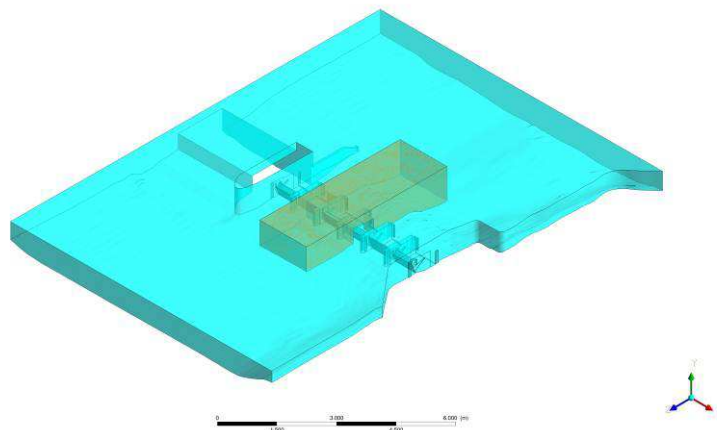


Figure 6 : Étendue du domaine de calcul complet, en bleu, et étendue du domaine de calcul intermédiaire, en vert.

5.2 Calage du modèle numérique

5.2.1 Système d'équations

L'écoulement concerné par cette étude est un écoulement gravitaire, diphasique air-eau à surface libre et incompressible. Il est instationnaire, c'est-à-dire que ses caractéristiques évoluent au cours du temps. Une estimation des nombres de Reynolds au niveau de la vanne prévoit l'apparition de structures turbulentes qui doivent être prises en compte dans la modélisation. D'autres phénomènes tels que la rugosité des parois ou les effets de tension superficielle sont susceptibles d'influer sur les caractéristiques de l'écoulement. L'ensemble des phénomènes physiques considérés permet de sélectionner les équations numériques qui vont servir à simuler le modèle numérique.

Les équations qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens comme l'air et l'eau sont les équations de Navier-Stokes. La méthode « volume of fluid » (VOF) introduite par Hirt et Nichols [1] est utilisée pour décrire l'écoulement diphasique. Cette méthode introduit un champ de scalaire α variant entre 0 et 1 qui

représente la fraction volumique d'eau dans le domaine de calcul. Les zones pour lesquelles α est strictement compris entre 0 et 1 contiennent un mélange diphasique qui indique la présence de l'interface. Cette approche complète les équations de Navier-Stokes avec une équation de transport non diffusive du scalaire α .

5.2.2 Discrétisation spatiale (maillage)

Le système d'équations évoqué dans le paragraphe précédent est résolu pour chaque maille. La qualité d'un maillage est conditionnée à la fois par l'assemblage régulier de ses mailles, et par leurs tailles suffisamment petites dans les zones de forts gradients. La taille des plus petites mailles est déterminée dans les zones de forts gradients de vitesse, qui se situent au niveau de la lame d'eau sur le volet et dans le rétrécissement brusque sous la vanne. Ailleurs, les mailles sont plus grandes car le nombre de mailles est limité par la complexité du modèle numérique à résoudre et par les capacités de calcul disponibles. Un exemple du maillage du domaine intermédiaire est présenté sur la **Figure 7**.

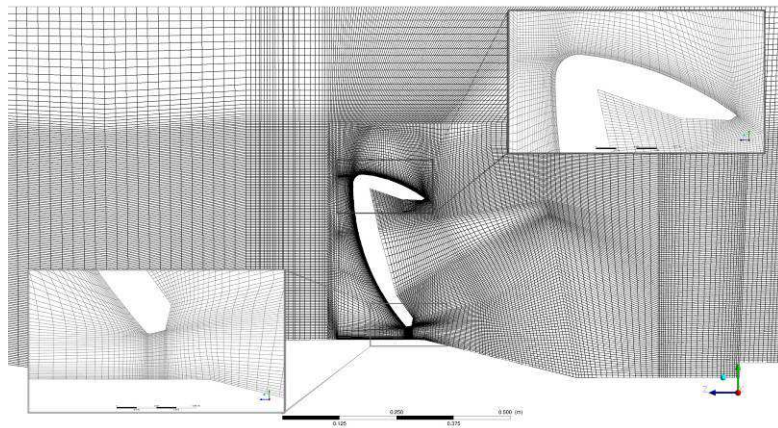


Figure 7 : Coupe et détails du maillage au niveau de la vanne 3 du domaine intermédiaire.

Dans un premier temps, l'intégralité du modèle physique a été maillée pour effectuer les premières simulations à l'échelle maquette. Les hypothèses faites *a priori* sur l'écoulement pour générer le maillage sont validées *a posteriori*. La précision de la description de l'interface air/eau, qui ne peut pas être prédite *a priori*, est améliorée par des étapes de raffinement de maillage en cours de calcul qui augmentent l'efficacité du processus de reconstruction d'interface air/eau du modèle VOF. Avec les raffinements successifs, le nombre de mailles des simulations à l'échelle maquette est de l'ordre de 16×10^6 cellules. Les dimensions à l'échelle maquette des plus petites cellules sont de l'ordre de 0.3 mm et celles des plus grandes sont d'environ 20 mm. Compte tenu du jeu d'équations à résoudre et des moyens de calcul (30 cœurs), il faut environ 2 à 5 jours pour que les statistiques des grandeurs physiques comme le débit convergent.

Le temps de résolution des équations sur le domaine intermédiaire à l'échelle modèle, qui contient 7×10^6 cellules, est réduit de 53%.

5.2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites suivantes sont utilisées dans le modèle numérique :

- Les parois et le fond du domaine de calcul sont définis en tant que murs avec une condition d'adhérence (la vitesse contre les parois est nulle) ;
En fonction du modèle de turbulence, une loi de paroi sera incluse pour modéliser le gradient de vitesse en proche paroi. De plus, une rugosité artificielle calibrée sur les états de surface du béton dans les ouvrages de génie civil [2] sera ajoutée afin de se rapprocher de la géométrie réelle.
- La face supérieure du domaine de calcul est définie comme condition de symétrie. Elle est positionnée suffisamment loin de la surface libre pour ne pas contraindre l'écoulement d'air et ainsi limiter les effets de confinement ;
- La section d'entrée du domaine est paramétrée comme "open channel pressure inlet", sur laquelle sont définies la hauteur de la surface libre et la vitesse de l'écoulement d'air ;
- La section de sortie du domaine est paramétrée comme "open channel pressure outlet", sur laquelle est définie la hauteur de la surface libre.

5.2.4 Paramètres de calage du modèle numérique

Le modèle numérique est calé en comparant le modèle numérique à l'échelle de la maquette sur le domaine intermédiaire aux paramètres d'entrée et de sortie du modèle physique :

- les paramètres de sortie sont le débit qui transite par les vannes, les mesures temporelles de vitesse en plusieurs points de plans orthogonaux à l'écoulement situés en amont et en aval immédiat de la passe 3, la hauteur d'eau en aval de la passe 3 et la hauteur de la lame d'eau sur les volets.
- Les paramètres d'entrées sont utilisés pour créer le domaine de calcul et définir les conditions aux limites. Les paramètres de sortie servent de référence pour caler le modèle numérique. L'objectif de cette étude étant d'extraire des lois de débitance, il est logique que le débit d'eau soit le paramètre majeur à respecter pour le calage du modèle. Les mesures de vitesses et de hauteurs d'eau, qui sont des grandeurs locales, serviront à confirmer le calage du modèle numérique lorsque leur précision le permet. Les paramètres numériques servant à étalonner le modèle numérique sont décrits dans le paragraphe suivant.

5.2.5 Modélisation de la turbulence

Les écoulements sous la vanne et sur le volet sont pilotés par la turbulence de paroi et donc par des phénomènes visqueux. Dans le cas de l'écoulement sous la vanne, la brusque accélération du fluide au passage de la vanne va générer un décollement en aval causé par le gradient de pression adverse à l'écoulement. La cellule de recirculation qui apparaît diminue la section de passage apparente du fluide à l'aval du couteau et influence immédiatement le débit sous la vanne. Par conséquent, un modèle de turbulence approprié à la simulation des décollements est recommandé. Quatre modèles de turbulence ont été testés. Le modèle k- ϵ standard de Launder et Spalding [3], sa correction "RNG" proposée par Yakhot et al. [4], sa version réalisable proposée par Shih et al. [5] et enfin le modèle k- ω SST de Menter [6]. La famille des modèles k- ϵ qui est généralement utilisée, n'est pas adaptée pour ce type d'écoulement contrairement au modèle k- ω SST qui associe les bonnes propriétés du k- ω en proche paroi avec un k- ϵ en champ lointain.

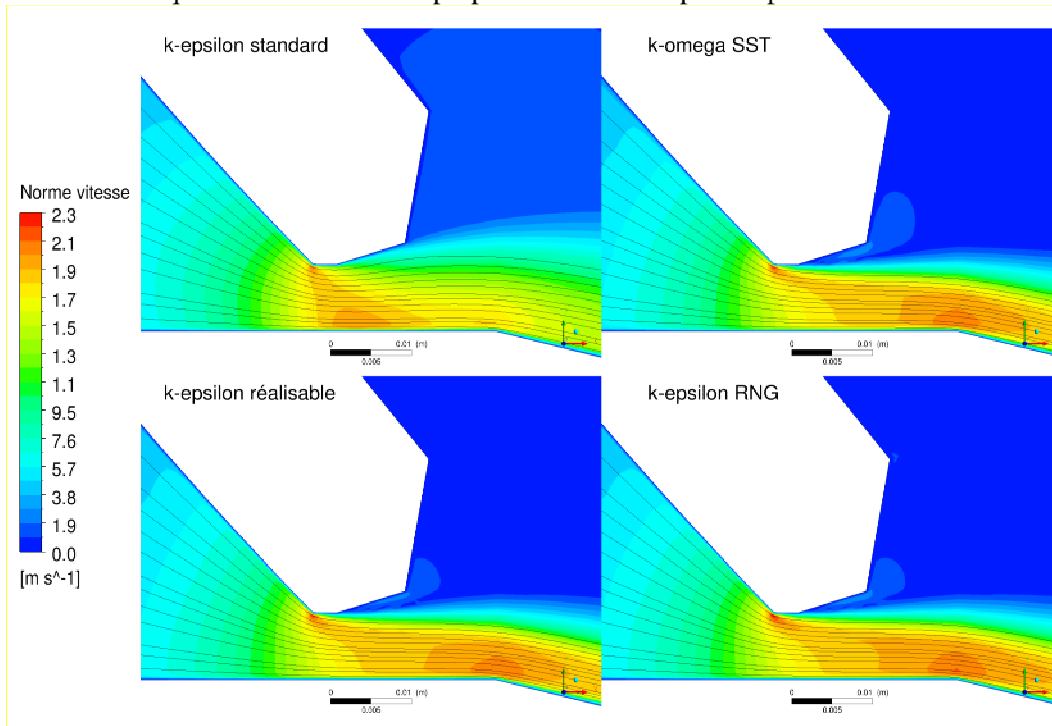


Figure 8 : Iso-contours de la norme du vecteur vitesse moyen de la phase eau au passage de la vanne avec une représentation des lignes de courant pour les simulations numériques utilisant les différents modèles de turbulence.

L'utilisation du modèle de turbulence est validée par la comparaison des champs de vitesse moyens de simulation 2D représentant l'écoulement dans le plan de coupe transverse de la vanne (cf. **Figure 8**). Les lignes de courant et les isocontours de la vitesse moyenne montrent que le modèle k- ϵ ne prédit pas de décollement de l'écoulement sur la face inférieure du couteau de la vanne. La prédiction de celui-ci est faite par les corrections RNG et réalisable du k- ϵ .

Pour chaque modèle de turbulence, le débit qui passe sous la vanne est comparé au débit du modèle physique. Le modèle k- ω SST présente le plus faible écart en termes de débit par rapport au modèle physique.

k-eps standard	k-epsilon RNG	k-epsilon réalisable	k-omega SST
+14.6 %	+8 %	+6.8%	+3.8 %

Tableau 2 : comparaison des débits dans le modèle par rapport au débit du modèle physique pour différents modèles de turbulence.

À l’instar de ces deux modèles le k- ω SST prédit un décollement plus important limitant d’autant plus la section de passage apparente. Ces prédictions sont consistantes avec les débits sous la vanne qui sont surestimés par les k- ϵ alors que le k- ω SST rentre dans les marges d’erreur des incertitudes des mesures. Ces résultats 2D sont confirmés par les résultats 3D sur les domaines intermédiaires en comparaison avec les mesures expérimentales menées sur le modèle physique.

5.3 Simulations à l’échelle 1 pour déterminer les lois de débitance des vannes

Le modèle à l’échelle 1 a été construit. A ce jour, le maillage est en cours d’optimisation. Les premiers résultats sont présentés dans la **Figure 9**.

Les simulations vont être réalisées pour 20 points de fonctionnement du barrage de Vaugris en écoulement mixte. Pour chaque point de fonctionnement, des simulations seront réalisées pour 3 cas, le débit transite uniquement par-dessus le volet, uniquement sous la vanne, simultanément sur le volet et sous la vanne, soit un nombre de 60 simulations du modèle numérique à l’échelle 1.

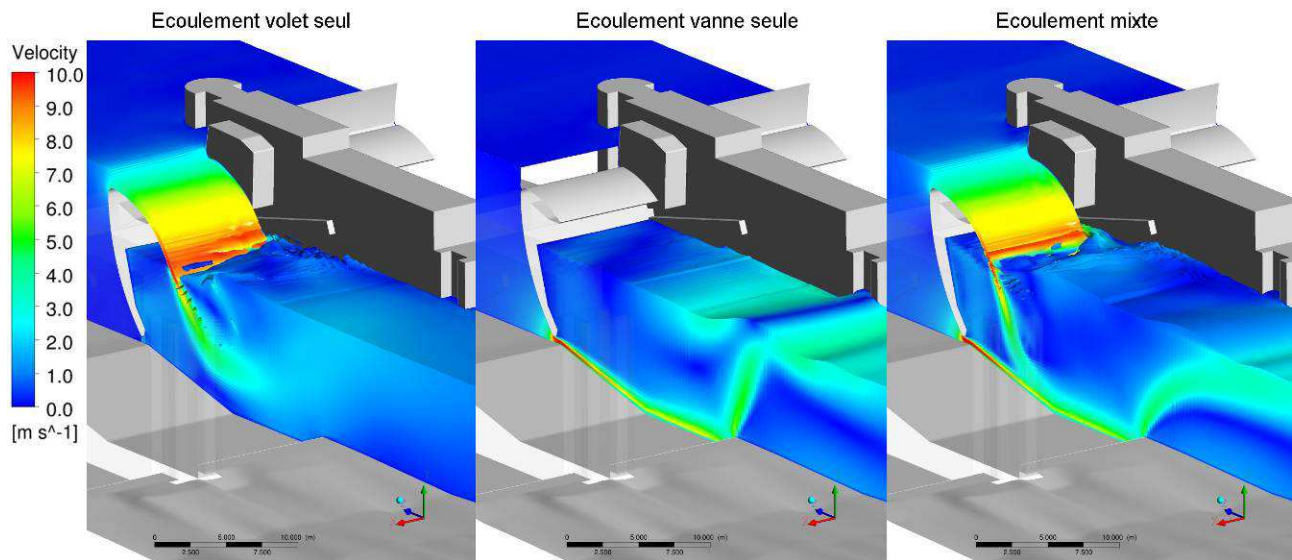


Figure 9 : Comparaison des champs de vitesse de la phase eau des régimes volet seul, vanne seule et écoulement mixte.

Il est prévu d’utiliser, très prochainement, ce type de modélisation sur un autre barrage du Rhône équipé de vannes secteurs. L’objectif étant de déterminer s’il est possible de proposer une correction adimensionnelle sur les lois de débitance pour les écoulements mixtes.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La connaissance de la débitance des barrages est un enjeu clé pour la CNR et les exploitants en général. La méthode choisie par la CNR pour établir les équations de débitance à partir de mesures réalisées sur un modèle physique en canal vitré est appropriée et performante. Des essais sur un modèle physique d'ensemble ont permis de valider le domaine d'application de ces équations.

Les dernières avancées en cours concernent l'utilisation d'un modèle hybride (modélisation physique et modélisation numérique) pour étudier les corrections de débit à apporter en écoulement mixte (écoulement simultané sous la vanne et sur le volet). Le modèle numérique 3D est calé sur les résultats du modèle physique. Il est d'ailleurs important de noter que cette phase de calage du modèle numérique est essentielle. En effet, les écarts peuvent être très significatifs (> 10%) suivant le choix des paramètres de calage. Les paramètres de calage sont la densité du maillage, le choix du modèle de turbulence, le choix du domaine de modélisation. Le modèle de turbulence retenu est le $k-\omega$ SST qui permet une bonne représentation des décollements à l'aval immédiat de la vanne.

Le modèle numérique à l'échelle 1 est en cours d'étude. Les résultats sont attendus pour 2016. Il est à noter que type de modélisation hybride a déjà fait ses preuves pour de nombreuses études réalisées par la CNR (études du système d'alimentation des nouvelles écluses de Panama, études de PCH, étude de la passe à poissons de Sauveterre sur le Rhône,..).

Le choix de la modélisation hybride permet de bénéficier à la fois des atouts de la modélisation physique (pour exemple, représentation de l'ensemble des phénomènes 3D en similitude) et de ceux issus de la modélisation numérique 3D (pour exemple, détermination/visualisation des champs de vitesses, de pression sur de larges domaines). L'ensemble des résultats va permettre de disposer d'une meilleure connaissance des phénomènes physiques mis en jeux.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Hirt, C.W. & Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. of Computational Physics*, **39**(1), 201–225.
- [2] Paraschivoiu, I., Prud'homme, M., Robillard, L. & Vasseur, P. (2003). *Mécanique des fluides*. Montréal, Presses internationales Polytechnique.
- [3] Launder, B.E. & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, **3**(2), 269–289.
- [4] Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, **32**(8), 1598–1605.
- [5] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. & Speziale, C.G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *AIAA J Physics of Fluids A: Fluid Dynamics.*, **4**(7), 1510–1520.
- [6] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. & Zhu, J. (1995). A new $k-\varepsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. Model development and validation. *Computers & Fluids.*, **24**(3), 227–238.