Lyon, le 28/10/2016

CACOH 2016-196-01
Semaine d'Études Maths Entreprise de l'École Centrale de Lyon
Sujet proposé par CNR

Inversion d'une loi d'ouvrage hydraulique comportant une bifurcation

Objet	**Exposé du sujet et transmission de données d'exemple**
Expéditeur	François-Xavier Cierco f.cierco@cnr.tm.fr, Pierre Balayn p.balayn@cnr.tm.fr
Destinataire	Céline Helbert celine.helbert@ec-lyon.fr
Confidentialité	Public
Pièces jointes	Fichier Excel des données SEME2017-CNR-LoiOuvrage.xlsx

Contexte

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) gère des aménagements hydrauliques dits « au fil de l'eau ». Dans ce type d'aménagement, un barrage de retenue permet de maintenir une cote à l'amont de l'ouvrage, en laissant transiter un certain débit ; la cote visée est constante pour une gamme de débit entrant dans l'aménagement, selon une courbe de consigne.

La question est donc le calcul du débit à faire passer pour maintenir la cote amont visée, ou de manière opérationnelle, la détermination du réglage du barrage –ouvertures des volets de surface et des vannes de fond– pour aboutir à ce résultat. L'optimisation de cette gestion nécessite de modéliser le comportement du barrage (régulation prédictive, en remplacement de la régulation PID initiale).

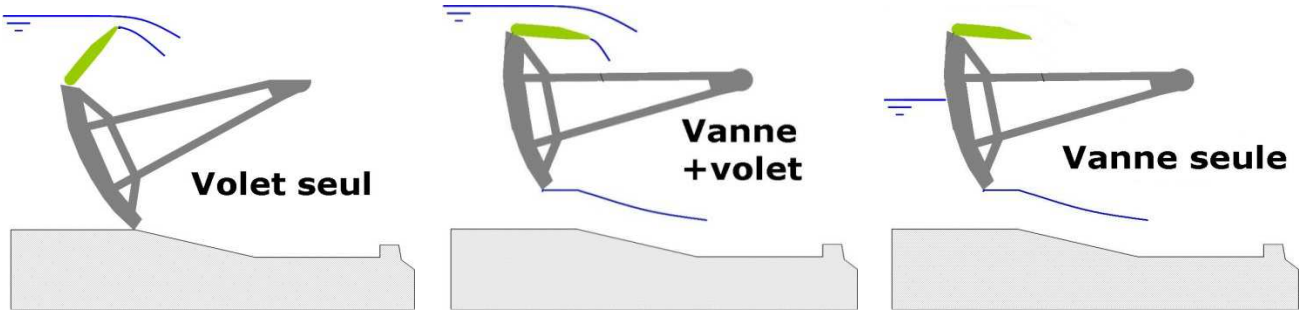
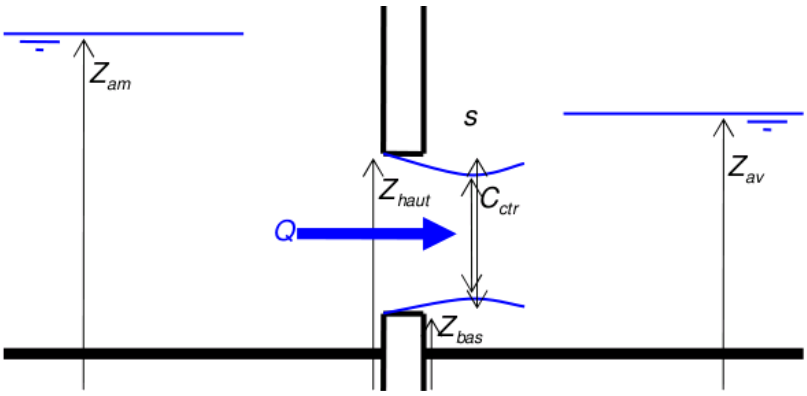


Illustration des manœuvres sur les organes de contrôle du barrage

Dans un premier temps, on peut simplifier le problème en se limitant au cas de l'utilisation d'une vanne seule. Une vanne peut être modélisée comme un orifice, avec les paramètres suivants :

- Z_{bas} : cote de la lèvre inférieure de l'orifice, ici cote du radier [mNGF]
- Z_{haut} : cote de la lèvre supérieure [mNGF] → $Ouv = Z_{haut} - Z_{bas}$: ouverture de la vanne [m]
- Z_{am} : cote amont [mNGF] → $Yam = Z_{am} - Z_{bas}$: tirant d'eau amont [m]
- Z_{av} : cote aval [mNGF] → $Yav = Z_{av} - Z_{bas}$: tirant d'eau aval [m]
- Q : débit à travers l'orifice [m³/s]
- L : largeur de l'orifice [m]



Modélisation d'un orifice (cas d'utilisation : vanne seule)

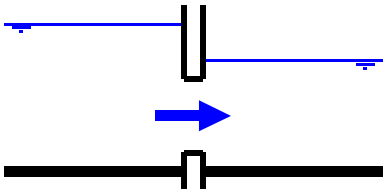
L'écoulement à travers l'orifice est décrit selon 4 régimes, qui correspondent au croisement de 2 phénomènes :

- orifice submergé ou non-submergé : dans le premier cas, l'écoulement est affecté par la lèvre supérieure, dans le second, l'orifice se comporte comme un seuil,
- écoulement noyé ou dénoyé : dans le premier cas, le niveau à l'aval influence l'écoulement (écoulement partout fluvial ou subcritique, la vitesse est inférieure à la célérité d'une onde mécanique), dans le second, l'écoulement n'est déterminé que par l'amont (écoulement torrentiel ou supercritique, l'inertie l'emporte sur la pesanteur).

En conséquence, les lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont déclinées sous la forme de 4 relations indiquées ci-dessous. Le choix de la relation à utiliser est déterminé par l'estimation du régime d'écoulement, ce qui occasionne une bifurcation.

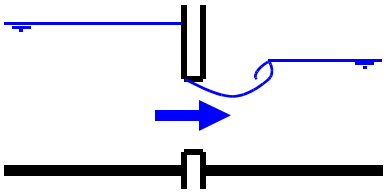
Par ailleurs, la géométrie réelle de l'ouvrage joue sur le rendement de l'orifice. De plus, selon les conditions d'écoulement, la contraction de la veine C_{ctr} varie. On introduit donc un coefficient de débitance C [adimensionnel] qui englobe ces effets et traduit un écart à l'idéal théorique. Ce coefficient d'ajustement n'étant pas constant, la formulation n'est pas inconditionnellement continue ; et n'est donc pas inversible par structure.

Régime submergé noyé



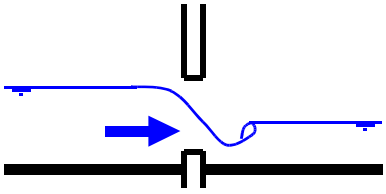
$$Q = C \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot Ouv \cdot \sqrt{Yam - Yav}$$

Régime submergé dénoyé



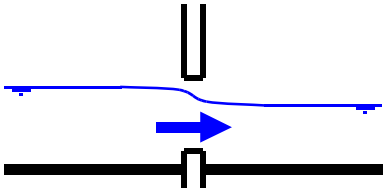
$$Q = C \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot Ouv \cdot \sqrt{Yam - Ouv}$$

Régime non-submergé dénoyé



$$Q = C \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot (Yam)^{\frac{3}{2}}$$

Régime non-submergé noyé



$$Q = C \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot Yav \cdot \sqrt{Yam - Yav}$$

Solution actuelle et limites

L'approche actuelle a consisté à bâtir un modèle physique à échelle réduite afin de mesurer un nuage de points expérimentaux : ce sont les données de calage.

Sur ces données, les frontières entre régimes ont été déterminées (exprimées par une valeur des ratios Yav / Yam et Ouv / Yam). Puis une équation empirique $C\,(Yam, Yav, Ouv)$ a été calée par régression sur les données de calage. Cela permet *in fine* de calculer la valeur de Q à partir des autres paramètres.

En utilisation opérationnelle, une méthode numérique résout le problème inverse et détermine Ouv à partir des données Q, Yam, Yav (mesures de terrain).

Cette solution se confronte à plusieurs limites :

- Sur le terrain, les fonds à l'amont et à l'aval du barrage peuvent évoluer au cours du temps (« respiration » des fonds). Les transitions entre régimes sur le terrain peuvent être décalées par rapport à la formulation issue des données de calage. Cela provoque des discontinuités qui génèrent des instabilités.
- Les mesures menées sur modèle physique donnent pour chaque point un quadruplet de valeurs (ou un quintuplet lorsque le volet déverse) complété par le régime observé. La qualification de ce régime est délicate, alors qu'elle conditionne fortement la mise en équation. En particulier, la transition noyé / dénoyé passe en pratique par une zone de transition mixte que l'on ne sait pas prendre en compte ; c'est principalement là que réside l'écart entre le terrain et le nuage de calage.
- Un fastidieux travail d'élimination des points incohérents et de requalification *a posteriori* des régimes observés sur modèle physique est nécessaire. Ce processus itératif vise à minimiser les résidus entre les points mesurés et les différentes équations candidates successives. Aucune méthode de tri ou de classement automatique n'est actuellement mise en œuvre, et donc l'arrêt de cet effort ne repose pas sur une méthode objective (avec le risque que le résultat dépende de l'opérateur). De plus, les points qui semblent incohérents sont éliminés et tous les points restants ont le même poids.
- La forme de l'équation empirique choisie pour C vise à obtenir une formulation continue (favorable à l'inversion). Ce faisant, elle a tendance à beaucoup dépendre de la zone de transition noyé / dénoyé où les points de calage sont très dispersés, au détriment des zones extrêmes où les régimes (et donc la physique des écoulements) sont beaucoup plus clairement établis. Or les situations extrêmes ont un intérêt opérationnel majeur et nécessitent des extrapolations fiables : en crue, enjeu de sûreté hydraulique pour ne pas risquer de dépasser les digues ; à l'étiage, enjeu économique pour gérer au mieux la ressource en eau (énergie, environnement, agriculture).

Problème proposé

Un fichier de données est mis à disposition ; il correspond à des mesures brutes (avant correction et élimination de points) sur un modèle physique (données anonymisées) pour le cas d'une vanne seule.

La question posée est : quelle méthode retenir pour exploiter ces données dans l'objectif d'une part de calculer Q connaissant la valeur des autres paramètres, et d'autre part de calculer Ouv connaissant la valeur des autres paramètres ? Le calcul de Yam pourrait également avoir un intérêt pour une application future.

Idéalement, la méthode proposée permettra (critères d'excellence ou doux rêves) :

- une extrapolation fiable des résultats renvoyés, pour une utilisation hors du domaine de mesure du modèle physique,
- une estimation de la fiabilité du résultat renvoyé (d'après les résidus sur les points du nuage de calage voisins),
- l'enrichissement du nuage de calage d'origine (modèle physique) par de nouveaux points acquis sur le terrain (et de poids supérieur),
- la détection de déviations significatives (nouveaux points acquis sur le terrain), qui conduirait à refaire un modèle physique avec les nouvelles caractéristiques géométriques (évolution des fonds amont ou aval, par exemple),
- d'objectiver la qualification du nuage de calage,
- de garantir la continuité des transitions entre régimes en utilisation sur des données de terrain (zone de transition).