EVALUATION DU POTENTIEL D'AFFOUILLEMENT DES FOSSES DE DISSIPATION EN AVAL DE BARRAGES – RETOURS SUR LA CONCEPTION DU BARRAGE DE JANNEH ET SUR L'EXPLOITATION DU BARRAGE DE YATE

Scour risk evaluation in dam plunge pools – Sharing the experience of Yaté spillway operation and Janneh spillway design

Thomas PINCHARD, Benoit BLANCHER
EDF-CIH, Savoie Technolac 73373 Le Bourget du Lac Cedex, France
thomas.pinchard@edf.fr ; benoit.blancher@edf.fr

Serge ROUSSIN
ENERCAL87 avenue du Général de Gaulle - BP C1 98848 NOUMEA CEDEX Nouvelle-Calédonie
s.roussin@enercal.nc

Lucie ALAZARD, Pierre-Etienne LOISEL
ARTELIA Eau & Environnement, 6 rue de Lorraine 38130 ECHIROLLES, France
lucie.alazard@arteliagroup.com ; pierre-etienne.loisel@arteliagroup.com

MOTS CLEFS

Evacuateur de crue, saut de ski, affouillement, fosse de dissipation, modélisation physique, jets croisés

KEY WORDS

Flood spillway, flip bucket, scour, plunge pool, scale modeling, intersecting jet spillways

RÉSUMÉ

Le fonctionnement des évacuateurs de crues des barrages est susceptible d'engendrer des érosions en aval des barrages qui peuvent avoir un impact sur leur stabilité. Afin de maîtriser un tel risque, le concepteur doit prendre en compte cette problématique, en optimisant la dissipation d'énergie, mais aussi en estimant les affouillements probables (profondeur et extension) pour les évènements courants et exceptionnels.

Dans ce domaine où il n'existe pas de règle de conception qui fait consensus tant la problématique est complexe, le retour d'expérience sur l'affouillement généré par les évacuateures de crues, constaté ou modélisé, est essentiel. On présente ici les enseignements tirés de l'exploitation d'un modèle réduit à fond mobile (projet du barrage de Janneh - Liban) ainsi que ceux tirés du fonctionnement d'un évacuateur de crues prototype (barrage de Yaté – Nouvelle-Calédonie) et l'évolution de l'érosion associée.

L'analyse de ces deux exemples permet de mettre en évidence la nécessité de réaliser des modélisations hydrauliques 3D, numériques ou - mieux - physiques, pour appréhender ces phénomènes à la conception des ouvrages, et proposer des adaptations le cas échéant pour améliorer la dissipation d'énergie. L'estimation de la profondeur d'affouillement doit aussi parfois considérer la durée de déversement, lorsque la cinétique de creusement est plus lente que les durées de déversements estimées.

ABSTRACT

Operation of spillways might result in scour downstream of dams which is likely to affect their stability. In order to control such risk, spillways shall be engineered considering the scour issue and designers shall optimize the energy dissipation. In addition, estimating the anticipated scour depth and dimensions in the downstream pool is necessary for ensuring the safety of the structures.

Scour process is a complicated matter and there is no international consensus on the estimation methods. In this context, sharing the lessons learnt from previous experiences, in design or operation of spillways, is essential. Here, two examples are presented: feedback from the physical model of the Janneh dam spillway (Lebanon), incorporating loose material to represent scour, and feedback from the operation of the Yate dam spillway (New Caledonia) and measured scour.

These two projects confirm that 3D modelling, numerical or physical whenever possible, is mandatory at design stage to ancipate these complex phenomena and to optimize the energy dissipation. Scour estimation shall also consider the duration of operation when scour cinetic is slower than the expected spilling duration.

1. INTRODUCTION

La conception, la réalisation, l'exploitation, la surveillance et la maintenance des évacuateurs de crues sont des éléments essentiels à la surêté des barrages. En effet, considérant les puissances associées aux déversements des barrages en crue, la maitrise de la dissipation d'énergie et de l'érosion engendrée doit être correctement démontrée et le suivi de l'évolution des fonds à la suite des épisodes de crue doit être effectué régulièrement. Le risque d'érosion régressive vers les ouvrages de retenue ou de déstabilisation des rives est un risque majeur qui doit être appréhendé.

Les phénomènes hydrauliques associés à la restitution des évacuateurs de crues sont complexes, intégrant bien souvent des effets tri-dimensionnels et une intéraction air/eau importante et parfois eau/matériau lorsqu'on souhaite représenter l'érosion. Des travaux ont été réalisés par de nombreux auteurs sur le sujet, notamment dans le domaine des formules empiriques permettant d'estimer les profondeurs de fosses d'érosion formées par des jets issus de saut de ski. Il reste cependant délicat d'appréhender l'évolution temporelle des affouillements ainsi que l'évolution tri-dimensionnelle de la fosse (emprise horizontale et verticale de l'érosion) en fonction de l'éclatement du jet sur le coursier ou la cuiller, et en fonction des formes du toit rocheux situé sous le matériau sédimentaire.

EDF et ARTELIA ont récemment eu l'opportunité de travailler sur 2 projets illustrant ces problématiques. Le premier met en évidence la pertinence de réaliser un modèle réduit afin de mieux apréhender l'évolution tri-dimensionnelle de la fosse en vue de limiter les risques d'affouillement, le second permettant de comparer les estimations d'érosion avec un cas concret d'un barrage soumis à des écoulements intenses fréquents.

2. L'OPTIMISATION DE LA DISSIPATION D'ENERGIE SUR LE BARRAGE DE JANNEH

2.1.Présentation de l'aménagement

L'aménagement de Janneh, actuellement en cours de construction au Liban, inclut un barrage poids arqué en béton compacté au rouleau (BCR) de 157 m de hauteur sur fondation et 100 m de hauteur au dessus du terrain naturel. Disposé en travers du Nahr Ibrahim, le barrage crée une retenue d'une capacité de 38 hm^3, qui permettra à terme l'alimentation en eau potable et en eau d'irrigation des régions alentour ainsi que l'alimentation d'une centrale hydro-électrique d'une puissance de 40,5 MW.

Cet aménagement, géré à l'avenir par l'EBML (Establishment of the Water of Beirut and Mount Lebanon), a été conçu par le groupement de bureau d'études ARTELIA et Khatib & Alami depuis 2006. Du fait de la configuration du site (vallée profonde et étroite, grande épaisseur d'alluvions sablo-graveleuses, contexte sismique contraignant), le choix s'est porté sur un barrage BCR arqué, positionné sur une fouille profonde de 60 m.

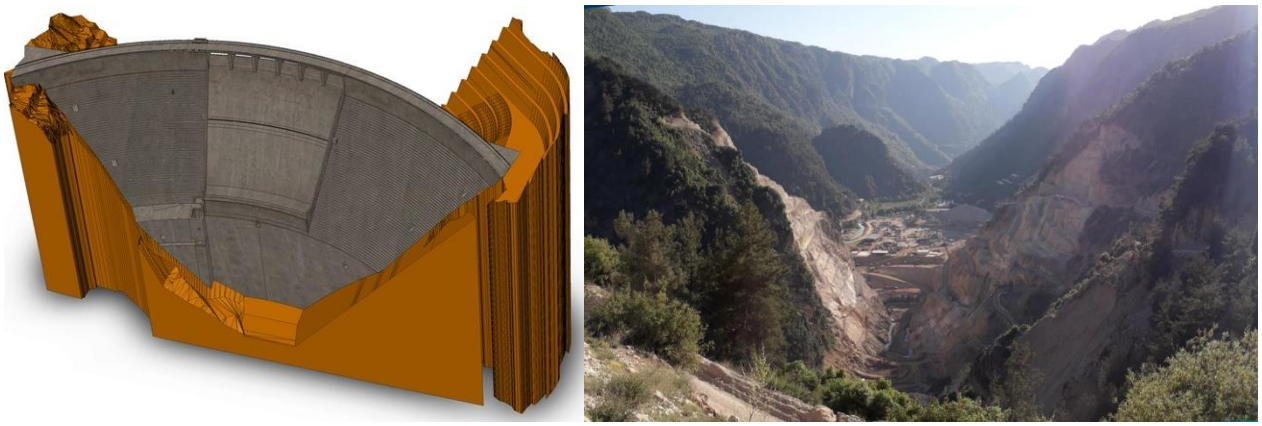

Figure 1 : Vue 3D du barrage et photographie du chantier depuis l'amont (mai 2019)

D'une longueur d'environ 300 m en crête (cote de crête 847 masl) et d'une épaisseur en pied de 66 m, l'ouvrage est équipé d'un évacuateur à surface libre sur sa partie centrale, d'un pertuis vanné de demi-fond de capacité 53 m^3/s et d'une prise d'eau de 32 m^3/s notamment pour le futur aménagement hydroélectrique.

En juin 2019, la longue phase d'excavation préalable à la montée du BCR approche de son terme (90% réalisé, cote 705 masl atteinte) et le barrage commencera à sortir de terre au 2nd semestre 2019.

2.2.Conception initiale de l'évacuateur de crues

Le barrage porte dans sa portion centrale un évacuateur de crues de surface non vanné, de 91 m de largeur brute, divisé en 6 passes par les piles supportant le tablier du pont de la route de crête. Cet évacuateur, dans sa conception initiale, est composé d'un seuil profilé Creager (cote de crête 839 masl) et d'un coursier suivant le fruit du parement aval du barrage (1V/0,8H) sur un dénivelé de 64 m jusqu'à une cuiller inclinée selon un angle de 20° par rapport à l'horizontale (cote 775 masl). La cuiller présentant une largeur de 70 m, le coursier est donc convergent, avec un angle en plan entre les 2 bajoyers latéraux de 22,5°. Environ 30 m sous la cote du seuil (cote 810 masl) est prévu un dispositif d'aération de l'écoulement afin de protéger le radier contre le risque de cavitation dans les zones soumises à de très fortes vitesses.

L'analyse hydrologique a abouti à l'estimation des débits de pointe des crues de dimensionnement (crue décamillénale) et de sûreté (crue maximale probable, « PMF »), avec des valeurs respectives de 1300 m^3/s et 2830 m^3/s. Ces débits maxima correspondent ainsi à des débits spécifiques de 18,6 et de 40,4 $m^3/s/m$ sur la cuiller, et sont donc relativement élevés sans cependant approcher les valeurs maximales citées par l'USACE sur une cuiller de flip bucket (Applegate dam, 79 $m^3/s/m$). [1]

En aval du barrage, l'écoulement déversé en crue est éjecté par la cuiller dans une fosse pré-excavée, dans laquelle est dissipée l'énergie considérable de la chute. Le batardeau aval, construit sur un rideau étanche barrant le sous-sol de la vallée, sera aménagé à terme en contre-seuil (cote de crête 745 masl) permettant de maintenir un niveau d'eau minimum dans cette fosse.

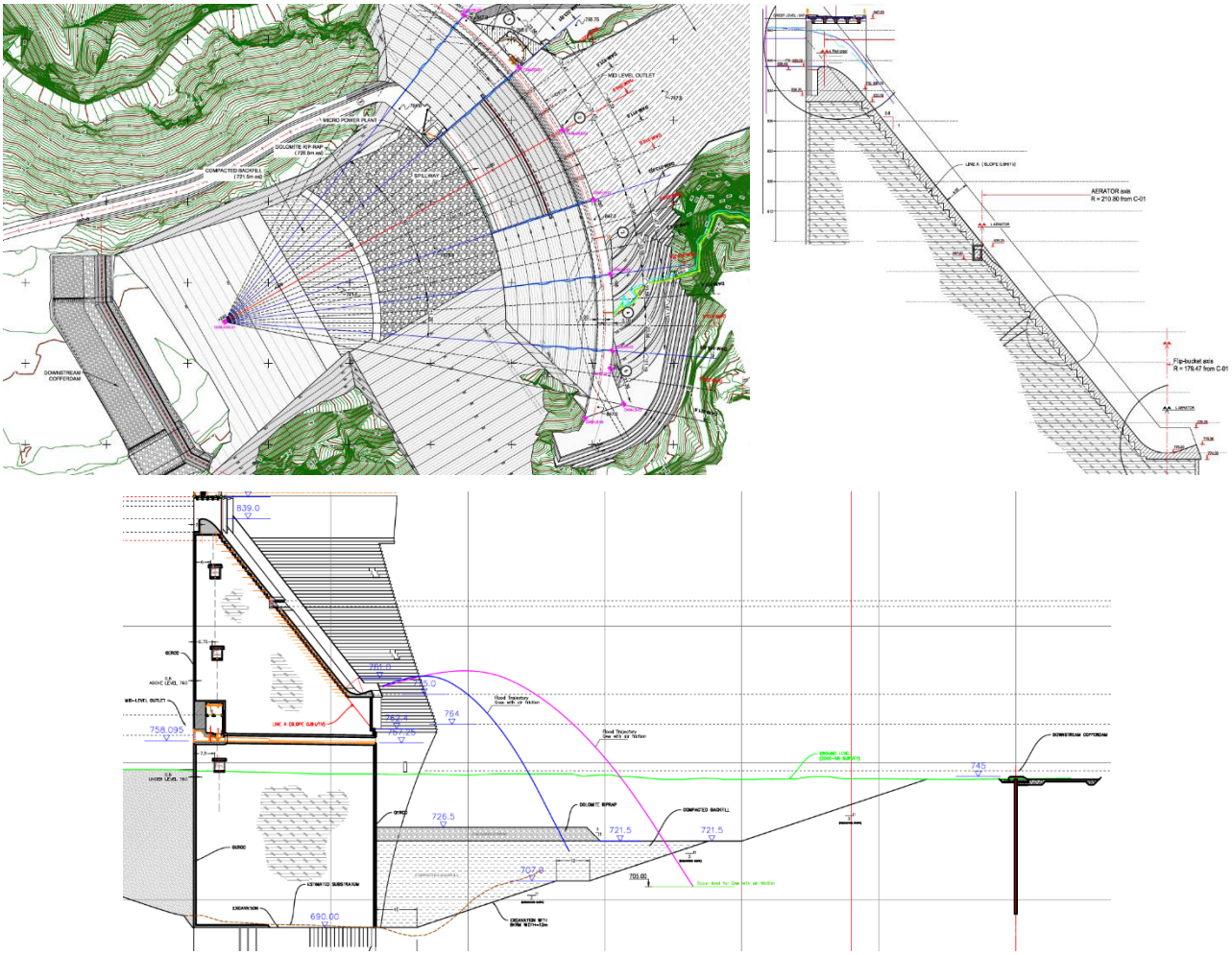

Figure 2 : Plans de l'évacuateur de crues en configuration initiale

2.3.Modélisation physique de la conception initiale

Dans le cadre des études d'exécution de l'ouvrage, l'évacuateur de crues a fait l'objet d'une modélisation hydraulique 3D physique, réalisée au laboratoire d'hydraulique d'ARTELIA Eau & Environnement à Grenoble (France). Le modèle, construit à l'échelle 1/80 et exploité selon la similitude de Froude, représente la partie aval coudée de la retenue, l'évacuateur de crue intégré dans le corps du barrage, ainsi qu'un linéaire de 365 m en aval du pied de barrage, incluant donc la fosse de dissipation et le contre-seuil aval. Lors de la construction initiale du modèle, les excavations n'étaient pas suffisamment avancées sur site pour bien connaitre les formes du toit rocheux. Il a donc été fait dans un premier temps l'hypothèse de formes simplifiées. Les matériaux sédimentaires du lit et le remblai des excavations a été représenté par un matériau granulaire, sans cohésion, de densité identique au matériau réel et de granulométrie réduite selon le facteur d'échelle. Les hypothèses principales prises pour la représentation des matériaux constituant les fonds de la fosse aval sont cependant les suivantes :

- La fraction la plus fine qui pourrait apporter une certaine cohésion n'a pu être représentée, car de trop petites dimensions. Cette hypothèse reste sécuritaire car peut amener à une représentation légèrement exagérée des zones affouillées.
- Le toit rocheux naturel et excavé situé sous le matériau sédimentaire est représenté en matérieu non affouillable (mortier). Cette hypothèse n'est que très peu impactante, car d'une part les excavations descendront jusqu'à atteinte d'un rocher sain et peu fracturé, et d'autre part, l'objectif de l'étude est de ne pas ou très peu atteindre une profondeur d'affouillement telle que le toit rocheux affleure.

Les essais ont été réalisés pour les crues de projet et de sécurité à un débit constant égal au débit de pointe de l'hydrogramme sur une durée de 90 minutes sur modèle, équivalente au temps de base des hydrogrammes de crues définies par l'étude hydrologique du projet, soit 13 heures et 30 minutes en temps réel. Il s'agit encore ici d'une hypothèse sécuritaire prise sur le modèle.

Lors de ces essais, il a été observé que la géométrie convergente du coursier est pénalisante car génère une concentration de la lame d'eau et donc une puissance érosive de jet nettement augmentée ; néanmoins cette configuration permet de limiter les érosions le long des rives bordant la fosse de dissipation. Par ailleurs, le dimensionnement de la cuiller d'éjection (altitude, rayon de courbure et angle de sortie) conduit à une faible inclinaison de la trajectoire au droit de l'impact sur la surface libre de la fosse. Cette forte composante horizontale de la dynamique du jet engendre de ce fait une extension de la zone de dissipation vers l'aval, plus que vers le fond de la fosse. La zone en pied de barrage n'est par ailleurs pas impactée du tout. Ainsi, s'il a bien été constaté un point bas localisé au droit de la zone d'impact, il est également observé le développement d'affouillements secondaires liés aux rouleaux de recirculation apparaissant en aval du point d'impact jusqu'au contre-seuil, ainsi que sur les côtés. Notons également des courants de retour horizontaux le long de chaque rive rocheuse remontant vers le pied aval du barrage, avec des vitesses atteignant localement 5 m/s environ.

La cote minimale atteinte pour la crue de projet est de 702 masl au droit du point d'impact, soit une profondeur d'érosion maximale locale de 19,50 m (soit 45 m sous le niveau d'eau). Cependant, c'est bien l'ampleur des affouillements liés aux courants de retour tri-dimensionnels fortement turbulents qui posent problème, car ils atteignent la cote 705 masl au contact du contre-seuil aval, le déchaussant ainsi sur une profondeur de 37 m (soit 42 m sous le niveau d'eau). Une telle érosion engendre ainsi à coup sûr la rupture de cet ouvrage en crue ce qui ne permet plus de garantir le maintien du niveau d'eau dans la fosse et risque par conséquent d'entrainer une augmentation des érosions en pied de barrage et potentiellement la destabilisation de ce dernier.

Les études de conception analytiques préalables, basées sur le calcul de la profondeur maximale d'érosion et l'éloignement du point d'impact par rapport au pied aval du barrage, avaient trop peu anticipé les phénomènes 3D amenant au déchaussement du contre-seuil. Le tableau suivant permet ainsi de montrer la variabilité des estimations de profondeurs d'affouillement avec les approches analytiques simples et de les comparer au résultat obtenu par la modélisation physique :

Table 1 : Profondeur d'érosion sous le niveau d'eau aval (m)

Configuration initiale	Formule de Veronese	Formule de Veronese adaptée par Pinto	Formule de Martins	Formule de Mason [2]	Modèle physique
PMF – Profondeur maximale atteinte	51.6	32.6	29.0	89.5	45 m
PMF – Profondeur atteinte au contact du contre-seuil	Non facilement anticipable				42 m

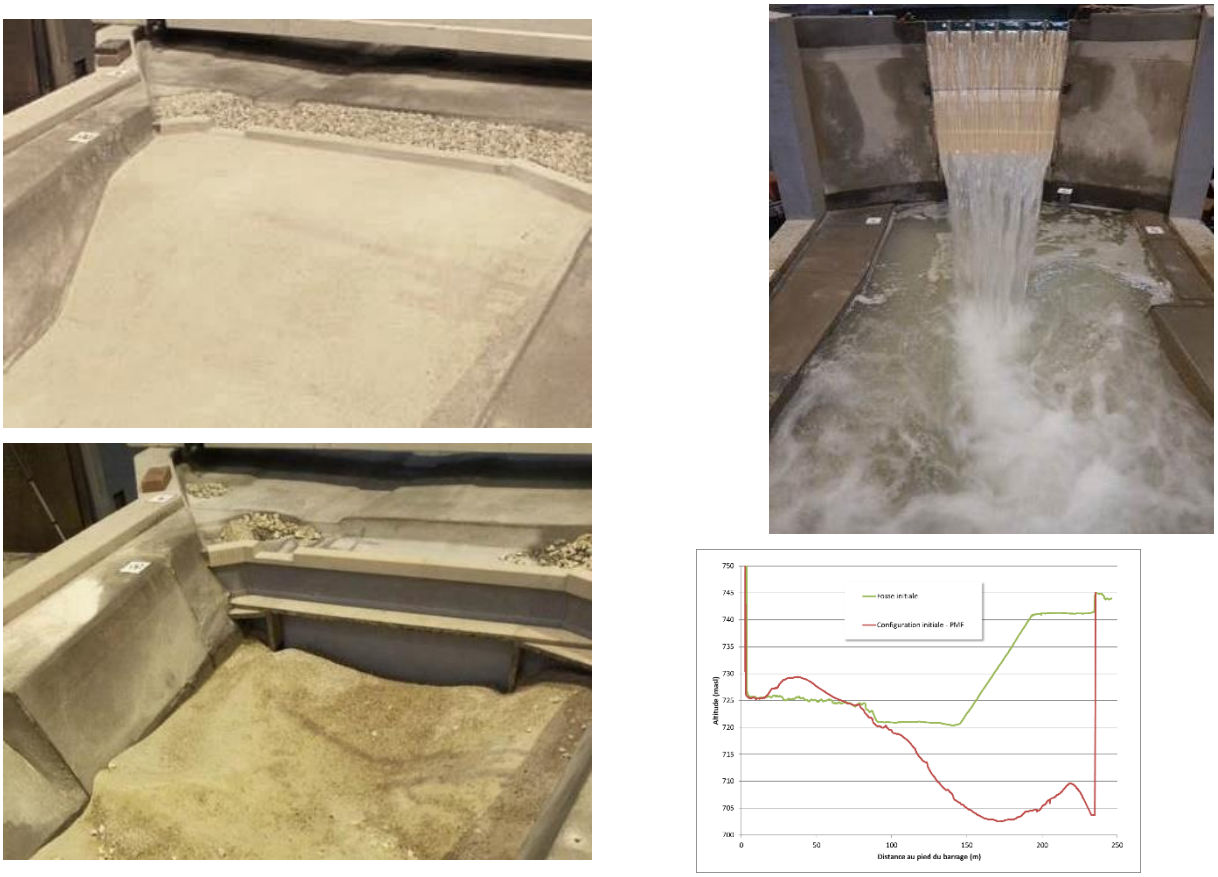

Figure 3 : Photos du modèle physique avant/pendant/après la surverse du débit de PMF

2.4.Optimisation sur modèle

Devant cette constatation, il est apparu nécessaire de prévoir un ajustement de conception de l'évacuateur de crues, afin d'annuler, ou au moins de réduire significativement le risque d'érosion auquel est exposé le contre-seuil aval. Au vu de la configuration du site et de l'avancée du chantier au stade des essais sur modèle physique, la forme de la fosse et la position du contre-seuil aval ne pouvaient pas être revues, et le seul ajustement envisageable était la modification des écoulements sur le coursier et la cuiller de l'évacuateur.

Des ajustements successifs de conception ont alors été menés sur le modèle, dans l'objectif d'éclater la lame d'eau avant l'impact dans la fosse, afin d'une part de réduire le débit spécifique à l'impact, et d'autre part de maximiser la dissipation d'énergie par frottement dans l'air. Cette recherche itérative a été menée en faisant d'abord varier la géométrie de la cuiller (remontée de la cuiller de 20 m, cuiller à échancrures (largeur 3700 mm) alternant angles de sortie à 0° et 30°, cuiller à échancrures 0° et 45°). Malgré un éclatement de la lame d'eau nettement amélioré, l'observation des conditions d'écoulement dans la fosse pour chacune de ces itérations a montré que les améliorations n'étaient pas suffisamment importantes pour espérer une réduction des affouillements au droit du contre-seuil aval.

Figure 4 : Lame d'eau éclatée grâce à la mise en place d'une cuiller à échancrures

La recherche de solution s'est ensuite orientée vers la dissipation d'énergie par impact aérien entre 2 lames d'eau, inspiré du principe de « jets croisés » initialement décrit par Lencastre [3] et ayant fait l'objet de recherche détaillée par Pagliara [4] (voir figure ci-dessous).

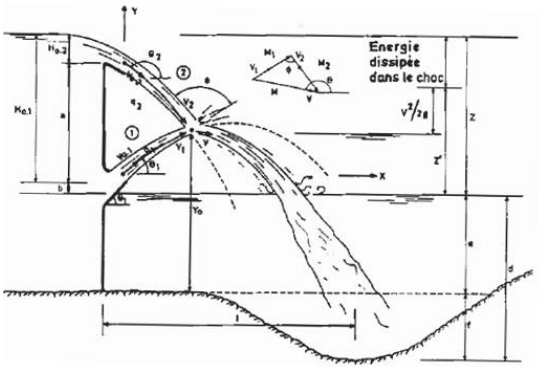

Figure 5 : Principe des jets croisés (Lencastre)

Selon ce principe, la recherche itérative a mené à disposer 4 blocs sur le coursier dans les axes des passes du seuil, à la cote 815 masl, soit immédiatement au dessus des aérateurs. Ces blocs ne sont pas sans rappeler les « splitters » du Colonel Robert, mis en place sur de nombreux barrages en Afrique du Sud, tels que les barrages de Vanderkloof (précédemment P.K. Leroux) et de Gariep (précédemment Hendrick Verwoerd) [5]. Notons que la fonction hydraulique visée ici est à la fois d'éclater la lame d'eau déversée (principe des splitters du Colonel Robert), mais également de chercher à croiser les jets au dessis de la fosse, afin d'optimiser la dissipation.

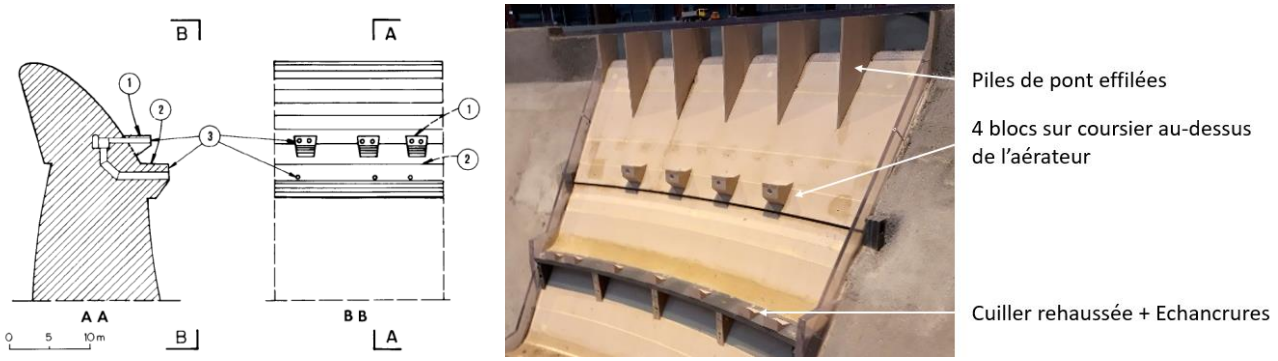

Figure 6 : Evacuateurs de crues des barrages de Vanderkloof et Gariep (Afrique du Sud) et application sur le modèle

D'une largeur de 4,00 m et d'une longueur de 5,80 m, ces blocs présentent une face supérieure profilée selon une cuiller d'angle 15°. Les queues des piles du pont sont profilées en pointe afin de réduire les gerbes d'eau observés en configuration initiale au point de jonction des écoulements passant de part et d'autre. La cuiller basse reste inchangée par rapport à la dernière optimisation menée, à la cote 795 masl, équipée d'échancrures alternant les angles de sortie 0° et 45°.

Cette géométrie novatrice a apporté des résultats tout à fait intéressants, avec un impact aérien entre d'une part les 4 lames d'eau issues des 4 blocs et d'autre part les lames d'eau issues de la cuiller à échancrures. Ce croisement des jets dissipe ainsi une partie de l'énergie et fait chuter l'écoulement dans la fosse de façon plus verticale et moins éloignée du barrage. Le comportement hydraulique s'avère satisfaisant sur une large gamme de débits avec : pour les faibles déversements, une trajectoire issue des blocs suffisamment longue pour ne pas toucher la cuiller basse ; pour le débit de projet, des jets qui se croisent de façon efficace du fait de l'étalement transversal des lames d'eau issues des blocs ; pour le débit de sécurité (PMF), des jets croisés tout aussi efficaces, avec l'apparition de gerbes d'eau au droit de la cuiller basse, issues de la réunion des écoulements passant de part et d'autre des blocs. Ce phénomène visible sur la photographie ci-dessous, pouvant être le siège de fluctuations de pression, la dent située dans la cuiller dans l'axe de chacun des blocs supérieurs est enlevée. Les dents restantes dans la cuiller seront conçues en grandeur nature avec un biseau des parois latérales de façon à réduire le risque de décollement des lignes de courant et donc de cavitation.

Les blocs initialement positionnés dans les axes des passes latérales ont été supprimés afin de ne pas déverser latéralement sur le parement aval non déversant du barrage. Il se développe de ce fait une trajectoire inchangée de part et d'autre des jets croisés centraux (voir photo ci-dessous). Notons également que les faces latérales et aval des 4 blocs situés sur le coursier seront équipées d'évents raccordés à la galerie transversale de l'aérateur, afin d'éviter la formation de poches de dépression, pouvant être la source de cavitation.

Figure 7 : Ecoulements sur le coursier en configuration optimisée pour crue de projet et crue de sécurité

En termes d'affouillements, l'effet bénéfique de cette optimisation de conception est net, avec une très forte réduction des profondeurs d'affouillement dans la zone d'impact, mais également sur toute la zone aval de la fosse, au contact du contre-seuil aval. Cette différence est visible sur la photographie ci-dessous, en comparaison de celle de la figure 9. Dans la configuration retenue, le contre-seuil aval n'est affecté par aucun affouillement pour la crue de projet. Pour la crue de sécurité, l'affouillement est quasi-nul sur la partie centrale et atteint très localement une profondeur de 12 m contre l'appui rocheux rive gauche (soit 18 m sous le niveau d'eau), versus un affouillement généralisé atteignant 37 m en configuration initiale (soit 42 m sous le niveau d'eau). Ainsi, cette nouvelle configuration (cuiller à 0°, avec tronçons de 3100 mm de large à 45° axés sur les 5 piles du seuil et sur les 2 passes d'extrémité) permet de réduire entre 57 % et 100 % les affouillements le long du contre-seuil aval. Notons ici que les résultats obtenus pour la crue de projet montrent une absence complète d'affouillement au contact du contre-seuil, garantissant ainsi son intégrité.

Figure 8 : Résultats d'affouillements en configuration optimisée suite aux crue de projet (à gauche) et crue de sécurité (à droite)

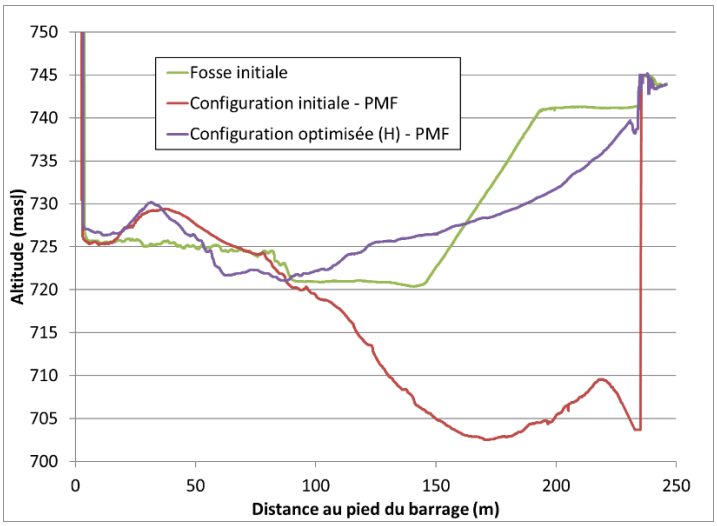

Figure 9 : Profil en long de la fosse de dissipation après transit du débit de PMF – Configuration initiale et configuration optimisée

2.5.Conclusion

Si des formules empiriques plus ou moins simplifiées constituent un premier outil utile pour l'estimation de la profondeur maximale possible des affouillements, le développement tri-dimensionnel des érosions dans la fosse en aval d'un évacuateur en saut de ski est un phénomène qu'il ne faut pas négliger, mais qui ne peut être abordé en détails que par la modélisation hydraulique 3D, et en particulier par le modèle réduit. La modélisation numérique 3D, intéressante pour accéder de manière fine à toutes les variables de l'écoulement, aurait également pu être utilisée ici, mais elle manque encore de retour d'expérience pour les phénomènes hydrauliques mêlant très fortes vitesses, entrainement d'air et fonds mobiles soumis à une forte turbulence.

L'exemple du projet du barrage de Janneh constitue un exemple remarquable de l'intérêt de cette modélisation 3D, car la trajectoire de la lame d'eau déversée certes est suffisamment longue pour ne pas menacer directement le pied du barrage, mais elle vient générer un affouillement innacceptable au contact du contre-seuil aval, dont la fonction du maintien du niveau d'eau aval est particulièrement importante. Son déchaussement lors des crues pourrait en effet être à l'origine d'un risque de destabilisation du barrage. C'est par un travail d'optimisation itératif sur modèle physique que la conception de l'ouvrage a évolué pour aboutir à une configuration de coursier innovante réduisant les profondeurs atteintes sur l'ensemble de la fosse, mais surtout annulant les creusements générés au contact du contre-seuil aval, ce qui garantit sa pérennité ainsi que celle du barrage.

3. L'EVOLUTION DU CREUSEMENT DE LA FOSSE DU BARRAGE DE YATE

3.1.Présentation de l'aménagement

Le barrage de Yaté est exploité par ENERCAL depuis sa mise en eau en 1958. Ce barrage constitue la plus importante source de production hydro-électrique de Nouvelle-Calédonie en créant une retenue de plus de 300 hm^3 qui est turbinée par une usine de 68 MW en bord de mer.

L'ouvrage de fermeture de la vallée est constitué de plusieurs ouvrages de types différents. L'ouvrage principal est un barrage voûte en béton, d'une hauteur d'environ 57 m et 200 m d'ouverture. Cette voûte mince (9 m d'épaisseur en pied et 2.5 m en crête) s'appuie directement sur le rocher de la rive droite tandis qu'elle s'appuie sur un ouvrage poids en béton en rive gauche pour pallier l'absence d'appui rocheux en rive gauche. Cet ouvrage d'environ 45 m sur fondation, constitue ainsi la culée rive gauche de la voûte mais accueille aussi l'évacuateur de crues, constitué de 3 vannes segment de surface, dont le débit est rejeté dans une fosse de dissipation qui s'est creusée à l'aval de l'ouvrage.

Enfin, pour terminer la coupure en rive gauche, le barrage comporte encore deux ouvrages. Le premier est un barrage à contrefort de 28 m de hauteur maximale et 143 m de longueur. Le second est un barrage en enrochements d'environ 17 m de hauteur maximale et 210 m de longueur.

L'évacuation des crues est réalisée au moyen des 3 évacuateurs de surface constitués de seuils Creager obturés par des vannes de 15 m x 14.5 m (l x h), ainsi que par deux vidanges de fond traversant la voûte. La débitance maximale de l'ouvrage est alors d'environ 6 300 m^3/s à RN (cote 160) et 6 900 m^3/s à PHE (cote 161).

Figure 10 : Vue générale du barrage et détail de l'évacuateur de crues

3.2.Historique des crues

Du fait du régime de crues cyclonique, le barrage de Yaté a souvent été le siège de déversements avec des débits régulièrement supérieurs à 1000 m^3/s, ainsi qu'une pointe à plus de 5000 m^3/s. Il en a résulté la formation d'une fosse d'érosion aval, d'ampleur significative puisqu'elle atteint aujourd'hui plus de 40 m de profondeur et presque 200 000 m^3 de matériaux excavés. L'exploitant ayant procédé à des bathymétries en 3 dimensions en 1992, 2001, 2010 et 2014, nous disposons de données particulièrement intéressantes concernant l'évolution d'une fosse au gré des débits déversés. Nous disposons aussi des résultats sur modèle physique, réalisé en 1957 par EDF à une échelle de 1/75, qui comportait un fond mobile. L'objectif de cette modélisation par fonds mobiles était d'étudier qualitativement, l'influence de diverses formes de coursier et de bajoyer sur l'affouillement. Nous avons pu reconstituer que la durée de déversement simulée était de l'ordre de 10 h (prototype), et le diamètre de l'ordre de 1 cm modèle. Le matériau sur modèle, non cohésif, était donc peu adapté pour représenter les fonds rocheux, mais l'objectif principal du modèle était la vérification de la débitance et l'objectif secondaire était une comparaison relative de l'érosion en fonction des différentes géométries testées .L'ouvrage est aussi équipé de vidanges de fond qui peuvent être sollicitées en crues et qui sont à l'origine du creusement d'une fosse secondaire de moindre importance.

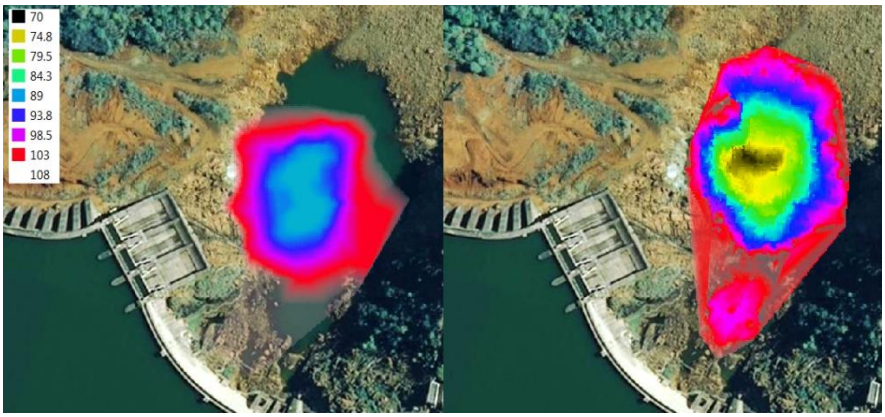

Figure 11: Vue des fosses modèle physique (à gauche) et dernière bathymétrie à droite

L'analyse détaillée des rapports de crues du barrage a permis de reconstituer l'historique des déversements du barrage (évacuateur de surface ou de fond). Les figures ci-dessous reproduisent l'ensemble des évènements (débit de pointe/volume déversé par l'évacuateur de surface) ainsi que le cumul des heures de fonctionnement de l'évacuateur de crues de surface à débit donné. Les données sont traitées par période comprise entre deux bathymétries (vert = avant 1992, rouge=avant 2001, bleu=avant 2010, jaune=avant 2014). La période entre 1992 et 2001 ne présente par grand intérêt car aucun débit significatif n'a été atteint (moins de 1500 m^3/s), et aucune érosion n'a été constatée dans la fosse.

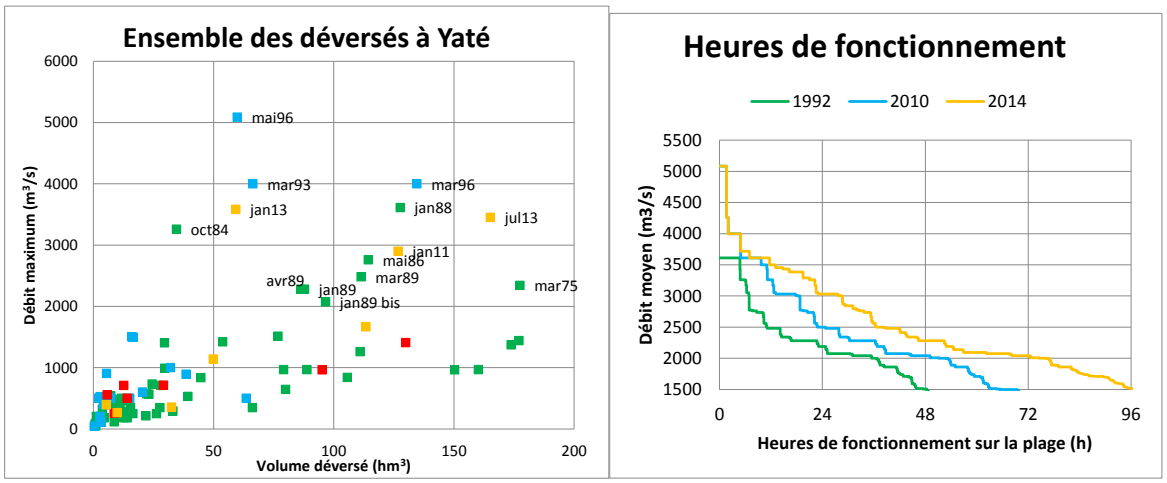

Figure 12 : Déversements au barrage et heures de fonctionnement cumulées à une date donnée

3.3.Comparaison de la forme de la fosse

Le terrain qui compose la zone de réception du jet de l'évacuateur de crue est constitué de péridotites et a déjà fait l'objet de publication pour d'autre raisons [6]. On peut considérer que c'est une masse rocheuse avec une fracturation assez intense mais peu ordonnée (pas de direction privilégiée), ayant tout de même des caractéristiques mécaniques d'assez bonne qualité, avec un indice d'érodabilité de 600 à 6000 suivant les zones (failles ou rocher sain). Les matériaux excavés se sont peu déposés à l'aval et n'ont donc pas eu une influence majeure sur les niveaux aval au barrage.

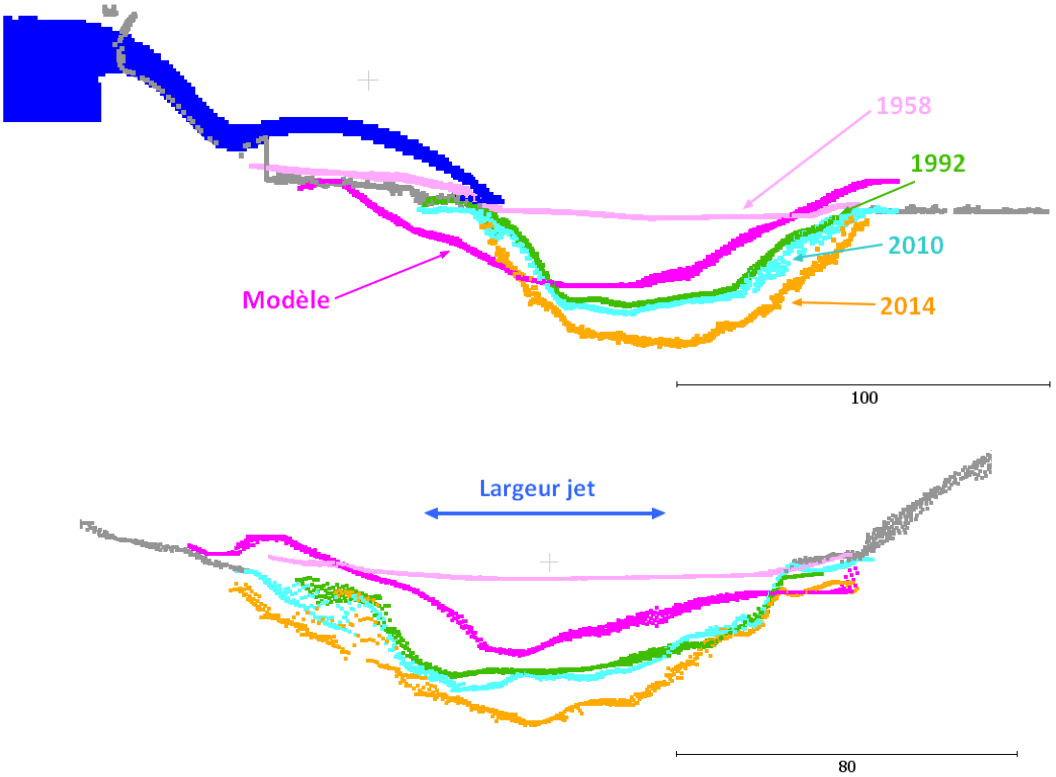

Figure 13 : Comparatif sur une coupe dans l'axe de la passe centrale et coupe transversale au plus profond

Les coupes présentées permettent de tirer les conclusions suivantes. La forme de la fosse telle que déterminée sur le modèle physique ne correspond pas à la réalité. D'après le modèle, la fosse aurait du être plus ou moins centrée sur le point d'impact du jet, tandis que sur le prototype elle est située intégralement en aval du point d'impact du jet, la lame inférieure du jet tangentant le talus amont de la fosse. D'après le modèle, la fosse aurait du être plus étendue et moins profonde. La pente amont de la fosse est de l'ordre 1.5 à 2 V/1H. On met ici en évidence qu'un matériau granulaire sur modèle réduit ne peut représenter fidèlement la stabilité des talus de la fosse car les similitudes des angles de frottement et cohésion ne sont pas respectées.

Etant donné que l'angle du jet avec le plan d'eau lors de l'impact est d'environ 30° (proche de l'horizontale), il semble ne pas s'opérer de recirculation vers l'amont, et seul un rouleau à l'aval est entretenu. Le modèle numérique réalisé récemment (avec la dernière bathymétrie) confirme cette absence de recirculation, ce qui peut expliquer les écarts entre le modèle et la réalité. Par ailleurs, l'absence de cohésion pour le fond mobile du modèle réduit explique aussi les écarts car il représente mal le fond rocheux du barrage de Yaté.

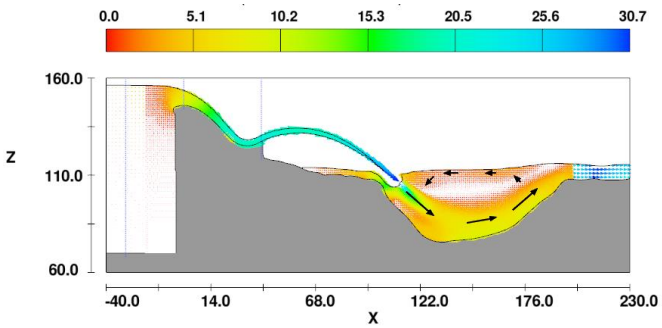

Figure 14 : Coupe dans l'axe du modèle numérique 3D (vitesses en m/s). Une seule recirculation en aval de l'impact du jet

L'évolution temporelle de la forme de fosse montre que la forme reste plus ou moins similaire, avec un creusement généralisé qui suit l'évolution du fond de la fosse. On note toutefois que la fosse ne progresse pas vers l'amont, donc sans risque d'érosion régressive pour la stabilité des ouvrages.

3.4.Comparaison biblio-réel et influence du temps

De nombreuses formules empiriques existent dans la littérature pour prédire la profondeur de la fosse. La revue de 2003 par Bollaert [7] met en évidence le large éventail de formules disponibles et leur dépendance aux paramètres en entrée. Concernant le cas précis de Yaté, on peut aussi se référer aux formules comparées dans la publication de Oukid en 2017 [8]. En revanche, ces formules ne tiennent pas compte de la durée de déversement.

Le débit maximal historique (5000 m^3/s) a été déversé avant la bathymétrie de 2010. Entre 2010 et 2014, aucun débit supérieur à 3700 m^3/s n'a été déversé, pourtant le creusement de la fosse s'est pousuivi sur cette période (8 m de plus). On peut l'expliquer par le fait qu'entre 2010 et 2014, l'évacuateur a fonctionné environ 10 heures entre 3000 et 3500 m^3/s, ce qui revient à doubler le temps de fonctionnement sur cette plage de débit. A titre de comparaison, l'évacuateur a atteint les 5000 m^3/s seulement pendant 1h30, et 4000 m^3/s pendant 5 heures. Cette constatation permet de supposer qu'une ou deux heures ne permet pas d'atteindre la profondeur ultime d'affouillement.

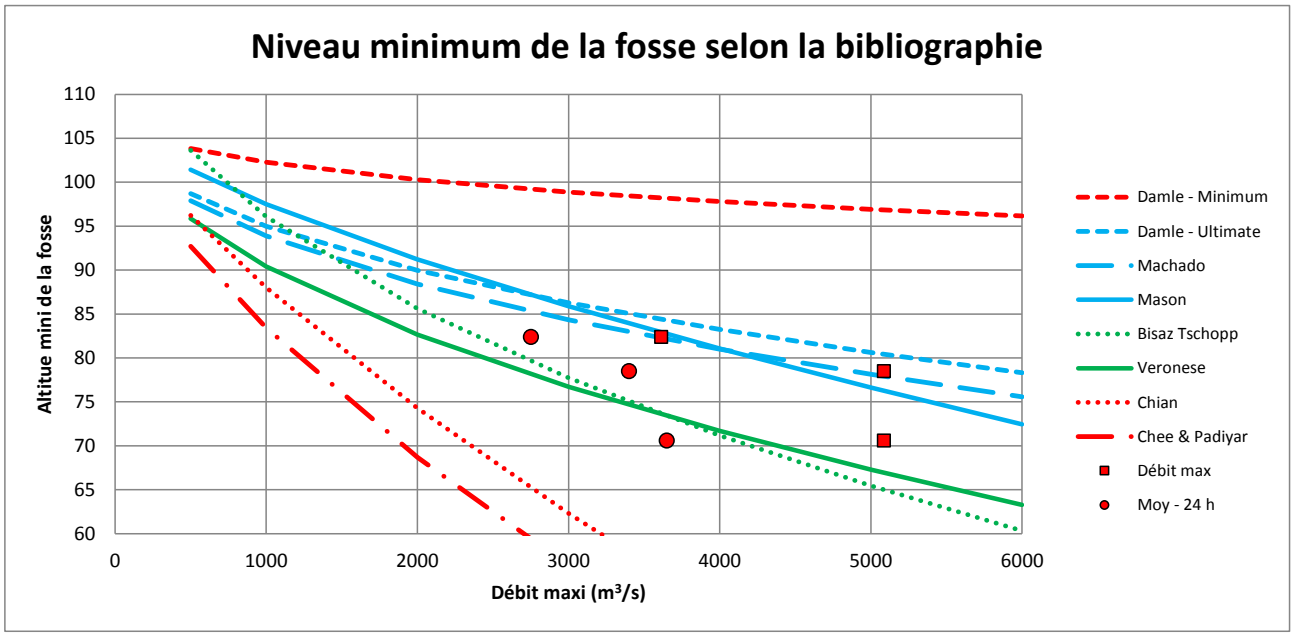

Figure 15 : Evolution de la fosse fonction de différents débits caractéristiques

La confrontation des relevés en fonction simplement du débit maximal instantané montre une évolution incohérente. En revanche, si l'on considére le débit moyen pendant les 24 h au plus fort débit, on peut retrouver une tendances conforme à la bibliographie. On arrive ainsi à tenir compte non plus de la puissance maximale instantanée, mais on arrive à faire intervenir le paramètre temps, et donc être aussi représentative de l'énergie dissipée.

Il subsiste cependant un doute sur la bonne estimation du niveau de creusement de la fosse après l'épisode le plus fort (en 1996), car cet épisode a été très intense mais les déversements ont été brutalement stoppés après la pointe de crue. Il a fallu attendre 2011 pour que des débits supérieurs à 1500 m^3/s soient déversés. Il est probable que le massif rocheux ait été érodé et endommagé lors de cet événement mais que les débits ultérieurs n'aient pas été soutenus assez longtemps pour évacuer les matériaux, faussant alors les bathymétries de 2001 et 2010. On pourrait donc sous-estimer la profondeur de la fosse suite à l'évènement de 1996.

Pour les formules qui font appel à la granulométrie de la fondation, la valeur est difficile à estimer pour une fondation rocheuse, et l'on a retenu ici une valeur de 2 m qui semblait donner la meilleure correspondance et qui ne semble pas absurde étant donné le caractère rocheux. De manière générale, la formule qui semble la plus adaptée à ce cas précis serait celle de Veronese ou de Mason, en considérant un débit caractéristique comme la valeur moyenne pendant les 24 heures avec le fonctionnement le plus intense de l'évacuateur de crues.

On peut citer le travail sur modèle réduit de Heng en 2012 [8], mettant en évidence la cinétique du creusement de fosse sur un modèle réduit avec fond mobile cohésif. D'après ce travail sur modèle réduit, la constante de temps associée au creusement d'une fosse serait de l'ordre de la dizaine d'heures ce qui semble compatible avec les conclusions tirées ici, néanmoins il est difficile d'en tirer des généralités tant la cinétique est dépendante des conditions hydrauliques ainsi que du terrain.

3.5.Conclusion

Le barrage de Yaté dispose d'un évacuateur de crues de dimensions conséquentes, mettant en jeu des puissances importantes, et qui est fréquemment en fonctionnement, ce qui est assez rare pour un barrage de type capacitif en Europe. Le suivi du creusement de cette fosse d'érosion au moyen de bathymétries, ainsi que la comparaison avec le modèle physique réalisé lors du projet, permet de tirer divers enseignements. Le modèle n'a pas permis de représenter fidèlement la géométrie et la position de la fosse, en prévoyant une fosse plus large et moins profonde, mais aussi plus près du barrage. Cela ne remet pas en cause les apports du modèle réduit qui avait notamment permis d'optimiser les formes de l'évacuateur pour assurer la dissipation d'énergie. Le modèle physique n'avait d'ailleurs pas pour ambition de représenter fidèlement l'érosion et aucun travail particulier n'avait été effectué pour se rapprocher au mieux des conditions réelles en travaillant en similitude pour ces phénomènes là.L'angle d'impact du jet avec le plan d'eau aval semble jouer un rôle particulièrement fort dans la non apparition de courants de recirculations qui auraient probablement entraîné l'extension de la fosse vers l'amont.

Le second enseignement, concerne l'évolution temporelle de la fosse. D'après cet exemple précis, il semble qu'il faille considérer non pas le débit maximum déversé, mais probablement un débit caractéristique sur une période de l'ordre de quelques heures à 10 ou 20 heures afin de pouvoir relier les dimensions de la fosse au débit déversé de l'évacuateur. De cette manière, on arrive à considérer à la fois puissance et énergie et non pas seulement puissance (débit maximum) ou énergie (volume déversés).

Cette considération devrait être prise en compte dans les diagnostics de surêté des ouvrages, afin de ne pas conclure trop hâtivement à la stabilisation d'une fosse qui aurait supporté des débits importants mais sur de courtes durées. A l'inverse, dans le cadre de la conception d'aménagements neufs, susceptibles de supporter des crues de forte intensité mais de courte durée, les estimations des dimensions des fosses pourraient être sur-estimées par les méthodes traditionnelles.

4. SYNTHESE GLOBALE

Les phénomènes d'affouillement en aval des évacuateurs de crues à saut de ski sont générés par des écoulements rapides, turbulents et tridimensionnels et dépendent de nombreux paramètres, en particulier les conditions hydrauliques (débit, hauteur de chute, mais aussi configuration du jet ou des jets : concentration, trajectoire, inclinaison, …), topographiques et géologiques. De par cette complexité, l'étendue en plan et la profondeur des érosions sont souvent difficiles à appréhender, au-delà des formules analytiques semi-empiriques habituelles.

Les 2 retours d'expérience présentés ici illustrent l'intérêt que représentent les modélisations hydrauliques 3D, numérique ou physique, notamment pour l'optimisation de la dissipation d'énergie de l'écoulement avant l'impact dans la fosse, mais également pour l'évaluation de l'évolution des fonds sur le long terme, bien que la modélisation fait nécessairement appel à des hypothèses pouvant parfois altérer les résultats (notamment la représentation des caractéristiques mécaniques d'un matériau rocheux).

Enfin, l'étude de l'historique des crues au barrage de Yaté rappelle l'importance à la fois de la tenue d'un registre d'exploitation complet (permettant de tracer les durées et intensités des déversements) et du suivi régulier de l'évolution bathymétrique au pied aval de l'évacuateur, afin de permettre une analyse a posteriori des mécanismes d'érosion.

5. REFERENCES

[1] : Hydraulic Design Spillway EM1110-2-1603 USACE

[2] : Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets, Mason, P.J., and K. Arumugam, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No. 2, 1985

[3] : Etat des connaissances sur le dimensionnement des évacuateurs de crue de barrages, La Houille Blanche n°1, 1985

[4] : Pagliara et al., Scour process due to symmetric dam spillways crossing jets, IAHR, 2011

[5] : Bulletin 58 ICOLD, Evacuateurs de crues de barrages, 1987

[6] : Les déformations différées de la fondation à l'origine des déplacements irréversibles du barrage de Yaté, T.Pinchard, E.Bourdarot, G.Castanier, R.Jarlan, Colloque CFBR Fondation des barrages, 2015,

[7] : Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review, E.Bollaert & A.Schleiss, JHR, 2003

[8] : Plunge Pool Physical models : Challenges and cases study, Y.Oukid, G.Barsse, J.C Girard & F.Ferranti, HYDRO, 2017.

[9] : Analysis of plunge pool scour hole formation below a chute spillway with flip bucket using a physical model, S.Heng, T.Tingsanchali & T.Suetsugi, ASEAN Engineering journal part C vol 1, 2012