Conception des évacuateurs vis-à-vis des problèmes de dissipation d'énergie, d'érosion et de cavitation

P. Meilland, P. Jehanno

Ingénieurs au Département Barrages,
Aménagements hydroélectriques et fluviaux
Sogreah - Grenoble (France)

1. Introduction

Les ouvrages évacuateurs peuvent avoir des fonctions d'évacuation de débit liquide, de débit solide, de corps flottants, etc... Ils peuvent être également utilisés pour contrôler la qualité des eaux par exemple en réglant la salinité ou la turbidité d'un réservoir ou de son effluent selon des règles précises.

La conception des ouvrages hydrauliques d'évacuation (notamment de crues) est tributaire de l'environnement, des conditions topographiques, géologiques et du type de barrage choisi. Les évacuateurs seront soit placés dans un barrage en béton, soit inclus dans une section bétonnée dans un barrage en terre, soit aménagés latéralement en dehors de l'emprise du barrage dans des canaux coulant à surface libre, soit enfin dans des tunnels alimentés par des prises profondes ou des tulipes.

2. Environnement hydraulique des évacuateurs

La définition des ouvrages d'évacuation doit prendre en compte :

- Le régime de la rivière et la gestion des eaux (débit, cote d'exploitation et de restitution, temps de fonctionnement, consignes de manœuvre des vannes depuis les faibles débits jusqu'aux crues normales, exceptionnelles et crue de dimensionnement des ouvrages).
- Le transit éventuel du transport de fond et des corps flottants (avec ou sans chasse).
- Les effets de la dissipation d'énergie.
- Les possibilités de cavitation, d'abrasion, de sous-pression et les effets des écoulements mixtes air-eau.
- Les phases de travaux.
- L'entretien des ouvrages et leur extension future.

a. *La conception d'un évacuateur* qui peut être amené à fonctionner de six à huit mois chaque année et d'une façon permanente avant l'achèvement des travaux n'est pas faite avec la même approche que celle de l'évacuateur de crue d'un réservoir de stockage pluriannuel (que l'on n'est pas absolument certain de remplir un jour). Dans le deuxième cas, la crue possible amortie sera de courte durée. L'ouvrage ne fonctionne que quelques heures à des intervalles de temps excédant l'année.

Dans le premier cas, les crues exceptionnelles sont de longue durée. Les périodes d'entretien à débit nul de l'ouvrage de courte durée pouvant avoir lieu chaque année, la fiabilité est indispensable et peut conduire à diversifier l'ouvrage en sections indépendantes pour en assurer l'entretien.

b. *Evacuateurs de surface et évacuateurs de fond*

Les évacuateurs de surface sont à priori préférés aux évacuateurs de fond. Leur capacité de débit croît rapidement avec des surélévations modérées du plan d'eau en amont. Non vannés, ils sont d'une exploitation simple. Les pertuis de fond présentent en général plus de problèmes et exigent notamment que le couteau des vannes soit dénoyé aux ouvertures partielles. Des pertuis de demi-fond, qui ne présentent pas cet inconvénient, peuvent parfois se substituer aux évacuateurs de fond et de surface, spécialement lorsqu'on souhaite repousser vers l'aval des problèmes liés à la dissipation d'énergie, ou dans le cas de très grandes retenues. La répartition des débits entre les ouvrages tient compte :

- des apports solides,
- du contrôle du remplissage de la retenue et de la possibilité de la vidanger pour conforter les ouvrages.

Lorsque le réservoir est destiné à régulariser les apports pluriannuels, le rôle de l'évacuateur de fond est limité : contrôle du remplissage, vidange, dégagement s'il y a lieu de prise d'eau ensiltée et, d'une manière problématique, transit du courant de densité (exemple : barrage sur l'Oued Mellegue en Tunisie) et maintien éventuel d'une capacité minimale de stockage des crues lorsque la retenue sera remplie par les dépôts.

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1992015

Exemples :

Evacuateur de	Surface	Fond
Zayandeh Rud	1 500 m^3/s	350 m^3/s
Kouris	3 000 m^3/s	150 m^3/s
Turkwel	1 500 m^3/s	500 m^3/s

Pour un réservoir ne stockant qu'une faible partie des apports annuels, la capacité du réservoir alimenté parfois par des eaux chargées ne peut être maintenue à une valeur économique acceptable que si chaque année la retenue est mise en chasse pendant les crues, la queue de crue étant seule stockée. L'évacuateur est dimensionné pour évacuer la crue annuelle sous une faible chute : le passage du transport de sable se fait avec des vitesses limitées (pour limiter l'usure des radiers). En début de montée des eaux, la vidange de la retenue peut être rapide, et les temps pendant lesquels des sables peuvent être entraînés vers l'aval par des écoulements à grande vitesse sont limités : l'évacuateur de fond constitue alors l'ouvrage principal (exemple : Khashm-el-Girba, sables fins).

Des conditions particulières intéressant des réservoirs que l'on ne peut vidanger totalement chaque année, cas intermédiaires des exemples précédents, peuvent conduire à prévoir une vidange de fond située au niveau des dérivations provisoires, et une vidange de fond à niveau intermédiaire dont la construction pourrait être retardée. La première vidange de fond serait utilisée pour ménager la capacité de stockage en apport solide tant que les sables abrasifs n'atteignent pas l'ouvrage. La vidange de fond à niveau intermédiaire, situé vers le niveau minimal d'exploitation prévu, prendrait le relais de la première vidange lorsque le sable arriverait au voisinage des ouvrages.

Les pertuis de fond sont parfois préférés pour leur commodité pendant l'exécution des travaux. A Jupia et à Moxoto, la presque totalité du débit de crue peut transiter par des évacuateurs de fond. A Salto Grande (et dans d'autres nombreux projets), l'évacuateur final retenu est un évacuateur de surface. Les seuils sont alors construits en 2 parties : une deuxième partie des seuils définitifs n'est bétonnée et équipée de vannes que lorsque, le barrage étant fini, la première partie des seuils est à même d'assurer les passages des crues.

3. Dissipation d'énergie

La dissipation d'énergie permet de passer d'un écoulement en général rapide à un écoulement lent sans inconvénient majeur pour le lit en aval. Dans la zone de dissipation d'énergie, l'écoulement à grande vitesse est transformé en un écoulement en moyenne lent constitué par de grands tourbillons et caractérisé par des fluctuations intenses de vitesse, de niveau et de pression. Ces fluctuations sont génératrices d'érosion susceptibles de déchausser ou de détruire des ouvrages et peuvent soumettre les structures à des efforts variables importants.

L'énergie de l'écoulement peut être dissipée soit dans un bassin revêtu contenant un ressaut soit dans le lit de la rivière éventuellement aménagé préalablement. Le cas des grands évacuateurs composés de multiples passes équipées de vannes mérite un examen particulier.

3.1. Dissipation d'énergie dans le lit non aménagé de la rivière

3.1.1. Frottement et ressaut sur le lit naturel

Lorsque les circonstances le permettent — rocher de qualité suffisante, utilisation rare et pour des durées limitées ou charge et débits spécifiques limités — on restitue le débit sous forme d'un écoulement parallèle au lit. L'énergie est alors dissipée par frottement et formation d'un ressaut sur le rocher. On peut citer les cas de Song Loulou (Cameroun) et de Paulo Afonso (Brésil). Il peut être opportun de disposer de commodités d'entretien pas toujours habituelles (isolement de l'évacuateur en éléments quasi indépendants).

3.1.2. Fosse d'érosion

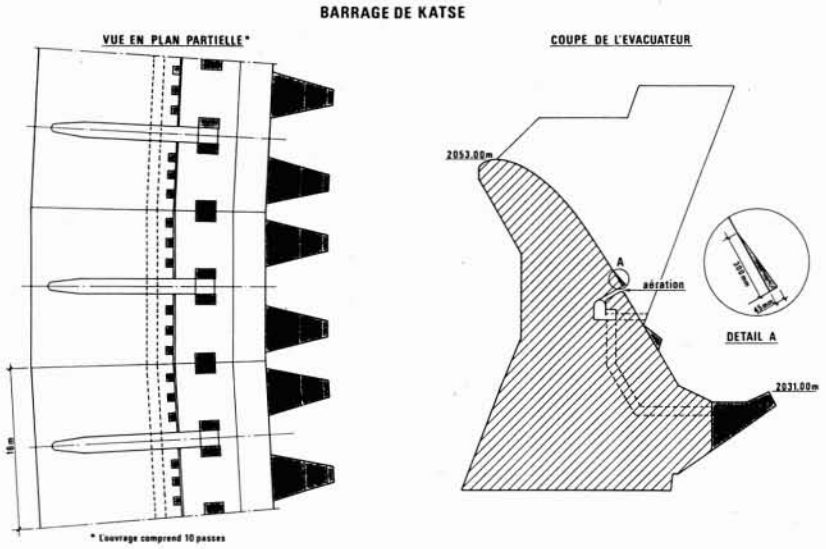
Dans les barrages poids ou pour bon nombre d'évacuateurs latéraux, le coursier de l'évacuateur se termine par une cuiller de forme plus ou moins sophistiquée dont le but principal habituel est d'éloigner l'impact des débits déversés des fondations des ouvrages.

Dans de nombreux barrages voûte, l'eau déversée pardessus un seuil tombe quasi verticalement au pied de l'ouvrage. Il n'est pas simple d'en éloigner l'aire d'impact.

Lorsqu'aucun aménagement préliminaire n'est envisagé — tel que pré-excavation d'une fosse ou relèvement artificiel du plan d'eau aval — l'énergie est dissipée d'abord par frottement sur le fond du lit et arrachement du lit au droit de l'impact puis plus tard par expansion de la lame déversée dans la fosse d'érosion qui se crée petit à petit. Le processus peut conduire à la sous-cavation des ouvrages ou à la destruction des berges par courant de retour ou batillage.

On cherche à diminuer l'action érosive en étalant, dispersant, fractionnant et en incorporant de l'air dans les lames quittant l'ouvrage. Les déflecteurs et autres systèmes propres à maîtriser les trajectoires des jets doivent prendre en compte les contraintes imposées par les écoulements à grande vitesse et à fort gradient de pression. On cherche également à limiter l'extension des aires potentielles de dommages en réalisant des pré-excavations dans la zone d'impact ou en installant un contre-barrage créant un volume de dissipation par surélévation du niveau aval. Les fluctuations de pression sont extrêmement limitées si la pré-excavation est modérément généreuse.

L'ouvrage de Kariba évacue les crues sous forme de jets compacts. Une fosse d'érosion d'une profondeur voisine de la hauteur de chute s'est développée sans que la sécurité de l'ouvrage n'ait été menacée.



1.

Les évacuateurs de surface des barrages construits sur Orange River, voûtes assez épaisses en crête et hautes de 80 mètres environ, sont équipés des dispositifs de fractionnement dus au CI Roberts. Des blocs, « splitters », installés sur le parement aval du seuil partagent les écoulements en fournissant une circulation aux lames d'eau. Lorsque l'eau arrive sur le déflecteur horizontal placé à quelques mètres en dessous des blocs de fractionnement, la circulation créée facilite le fractionnement et l'étalement des lames d'eau. La hauteur limitée de la chute sur les blocs de fractionnement et un dispositif assez sommaire d'aération des blocs assure un fonctionnement sans cavitation des ouvrages.

Sur le barrage de Katse, haut de 160 mètres, la solution précédente a été adaptée. La voûte épaisse comporte au droit de l'évacuateur un coursier de 30 mètres de hauteur environ, comprenant un dispositif d'aération de lame par-dessous, suivi de déflecteurs aérés atomisant partiellement le débit restitué. Initialement, l'impact relativement bien centré sur le lit se situait à 130 mètres en aval de la voûte. Alternativement, une solution étalant mieux l'eau déversée, plus près de la voûte et limitant la profondeur d'érosion sous un niveau aval contrôlé par un contre-barrage a été également développée *(fig. 1)*.

Pour les barrages de Turkwel et de Katse, on a pris le parti de pincer les jets des vidanges de fond dans un plan vertical. Ainsi, les trajectoires des jets peuvent être contrôlées et maintenues loin des berges. Le pincement permet l'allongement des impacts ce qui permet de limiter les effets de la dissipation d'énergie — affouillement et courant de retour. La définition de la géométrie propre à prévenir la cavitation potentielle est assez simple.

En aval des évacuateurs de Tucurui et de Nangbeto, une solution basée sur une pré-excavation a été retenue. Dans le premier cas, l'objectif est de contrôler la progression des érosions vers l'amont, vers la fondation du barrage. Dans le deuxième cas, la pré-excavation a fourni du matériau de remblai et évite l'accumulation possible de dépôts à la sortie de l'usine.

L'évacuateur du barrage de Kouris allie pré-excavation importante dans un rocher de qualité limitée et étalement en largeur et longueur des lames d'eau quittant l'évacuateur.

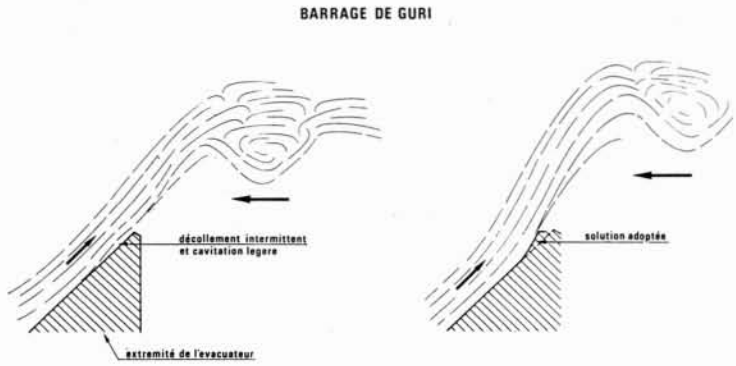
D'autres exemples d'évacuateurs restituant les débits sur le lit non revêtu de la rivière sont :

Karoun, Zayandeh Roud, Grand Maison, Verney et Tarbela (tunnel 4) pour des ouvrages réalisés, Grand Inga et Souapiti pour des projets non encore développés.

En général, la dispersion des jets n'est facile que lorsque les vitesses sont grandes et les lames d'eau faibles (si la chute sur le déflecteur est inférieure à quatre fois la charge critique, il est assez difficile de disperser efficacement l'eau). Si les formes de la cuiller sont assez simples, il n'y a pas de raison de refuser un fonctionnement avec noyage par l'aval, les poches éventuelles de cavitation se refermant dans l'eau, loin du béton.

Dans le cas de l'évacuateur principal du barrage de Tarbela, le développement des érosions, sans doute étudié un peu sommairement à la conception du projet, a finalement conduit à la réalisation très progressive d'un revêtement en béton compacté, soigneusement drainé loin en aval par une galerie largement dimensionnée. Quelques dommages dus à la cavitation ont été observés sur des cuillers : Karoun, vitesse et hauteur d'eau trop importantes ; Guri, décollement intermittent de la lame d'eau contre l'extrémité aval — plane et raide — sous l'effet des fluctuations de pression dues au batillage aval *(fig. 2)*.

Les aménagements de Agoyan et de Magat sont aussi des exemples de dissipation d'énergie réalisée sur le rocher. Ils sont particulièrement intéressants car ils ont permis d'examiner avec attention les problèmes d'abrasion créés par des produits de chasse de taille importante.



2.

L'érosion en aval peut être assez bien maîtrisée. Néanmoins, assez souvent il est nécessaire de mettre en place des protections, en général en enrochements. Des dispositions particulières, dégagement des protections en aval du déflecteur de sortie dont la pente est plutôt douce et extensions tronquées des murs latéraux contribuent à atténuer l'action érosive des courants. Le batillage résiduel peut être important et justifie la mise en place de protections de berges ou leur remodelage suivant des pentes douces.

L'auto-curage des bassins n'est pas toujours aisément assuré. Les retours de matériaux depuis l'aval, parfois difficiles à éviter même si des consignes de manœuvre parfaites sont appliquées, ou la circulation du transport solide amené depuis l'amont conduisant à l'abrasion des bétons peuvent conduire à l'exécution de chasses mobilisant parfois des débits équivalents à des débits de crue. La partition du bassin en un certain nombre d'éléments indépendants est parfois jugée nécessaire.

Le bassin de dissipation de l'aménagement de Salto-Grande est terminé par un mur vertical qui a empêché l'exclusion par les courants des corps durs abrasifs introduits accidentellement pendant les travaux.

A Tarbela, le fonctionnement alterné et non symétrique des bassins de dissipation des tunnels d'irrigation n°s 3 et 4 s'est avéré capable de ramener sur les radiers des bassins des blocs énormes — de béton assez souvent.

Les sous-pressions sont également une cause fréquente d'incidents.

D'abord, une partie de la pression d'amont ou la pression d'aval peuvent être introduites sous le radier alors que, en tête du bassin au-delà du point où l'effet des courbures plaquent le radier sur le terrain en place, la hauteur piézométrique est limitée et la pression développée peut être inférieure aux pressions s'appliquant sous le radier.

On souhaite en général faire des économies d'excavation. Ceci peut conduire à prendre des risques dans la solution retenue. Les études sur modèle réduit physique doivent se faire en considérant des qualités différentes dans la représentation du rocher, matériau non cohésif, matériau cohésif utilisant des mélanges avec argile beaucoup plus fiables que le ciment parfois employé avec des dosages très faibles ou matériau non affouillable. La mesure des fluctuations de pression, exécutée correctement sur fond dur et imperméable est également importante lorsque les excavations sont partielles.

3.2. Fosses de dissipation d'énergie revêtues

Les fosses de dissipation d'énergie revêtues présentent sensiblement les mêmes inconvénients que les bassins à ressaut : fluctuations de pression et problèmes de drainage et de tenue des dalles, retour de matériau arraché du lit et transportés sur les revêtements en béton, difficulté possible pour chasser les matériaux parfois amenés de l'amont hors du bassin, etc... Un des avantages relatif est que les mécanismes d'écoulement conduisant à la cavitation sont en général évités. Il peut être assez difficile d'obtenir une solution satisfaisante pour tous les débits.

Les exemples suivants peuvent être entre autre cités : aménagements de Orange River, de Vouglans.

Le bassin de l'évacuateur de Tarbela a été revêtu mais seulement après le développement d'un certain nombre d'incidents.

3.3. Bassin de dissipation à ressaut ou à rouleau

Les bassins à ressaut sont des solutions éprouvées qui ont donné satisfaction dans de nombreux cas. Cependant on insistera sur les incidents qui ont été observés.

Une partie de l'énergie cinétique de l'écoulement peut être injectée sous les dalles par défaut des joints waterstops ou par des orifices de drainage insuffisamment bien conçus. Parfois, les fluctuations de niveau dans la partie aval du bassin peuvent être transmises vers sa partie amont.

Malpasso, Tarbela et Cedillo sont des exemples de tels incidents.

La cavitation peut également créer des dommages, soit tout simplement parce que la chute est trop importante pour que le béton résiste à l'action des vitesses résultantes élevées (cas de Tarbela) ou simplement parce que des décrochements ou des blocs de dissipation ayant pour but de diminuer la taille des bassins de dissipation ou de mieux contrôler le phénomène de sous-pression ont été implantés de façon malheureuse (Ilha Solteira où des traces persistantes de cavitation apparaissent pour les forts débits en amont de blocs toujours parfaitement dénoyés et Salto-Grande où des « chute blocks » ont cavité mais où des « baffle-piers » placés dans des zones où l'écoulement est déjà partiellement ralenti se sont parfaitement comportés).

On peut lutter contre les effets de sous-pression par le poids, le drainage et éventuellements les ancrages — post-tensionnés si la sollicitation fréquente fait craindre l'apparition de fatigue —. On peut aussi améliorer la répartition des pressions sur le radier en implantant des blocs de chute judicieusement dessinés et implantés ou des blocs du type « baffle-piers » placés au-delà du point de formation du ressaut. Ces blocs peuvent servir à ménager des sorties de drainage. Assez souvent, pour les chutes faibles, on assure le drainage des dalles en entaillant au droit des puits drainants installés dans les joints transversaux — normalement jamais soumis à des écoulements transversaux intenses — le bord amont de la dalle aval. Ainsi, on ne capte pas l'énergie cinétique de l'écoulement. Parfois, un décalage est ménagé entre les dalles.

A Jupia, chute moyenne, les sorties des drains sont équipées de « chapeaux chinois » coupés vers l'aval et coiffant une plaque d'acier protégeant le radier contre des points de cavitation locale.

A Soubré, le projet a envisagé des blocs à courbure douce installés en amont de rainures d'aération.

Les tentatives d'aération des « chute-blocks » de Salto-Grande ont montré la difficulté d'assurer une aération suffisante lorsque des embruns importants sont entraînés avec l'air de ventilation.

On peut aussi pour les chutes moyennes placer la sortie des drains le long des bajoyers là où l'entraînement d'air par frottement empêche le développement de cavitation créant des dommages.

Dans certains cas (Tarbela tunnels n°s 3 et 4), l'eau des drains est collectée dans un puits et pompée. Dans le même projet, l'entrée du bassin de dissipation, zone dans laquelle la formation du ressaut entraîne de grandes variations de pression, est maintenue par des tirants post-tensionnés. Ailleurs (Tarbela, évacuateur principal) c'est une longue galerie de drainage qui impose des pressions assez proches de la pression atmosphérique sous le revêtement soumis par-dessus à la hauteur d'eau, en moyenne importante du bassin.

Dans le projet de Salto-Grande, des sorties de drain ont été aménagées dans les queues de piles, à la verticale du point où la chute rejoint le radier, et à une faible hauteur au-dessus du radier. Les sorties de drains avaient été équipées de soupapes (du type boule de néoprène). Les effets de cavitation ou tout simplement les fortes variations de pression ont provoqué l'arrachement des soupapes. Néanmoins, malgré les fluctuations de pression importantes en amplitude et de fréquence limitée et probablement parce que le débouché des drains ne captait pas l'énergie cinétique aucun déplacement de dalle n'a été observé.

3.4. Ouvrages mixtes

Il s'agit d'ouvrages pour lesquels la zone bétonnée de dissipation d'énergie est simplement amorcée. Au début de la vie de l'aménagement, le ressaut n'est pas maintenu sur le béton de l'ouvrage qui fonctionne en cuiller. Plus tard, le développement des érosions en aval, par la génération d'un rouleau de remblaiement, contribue à former le ressaut sur le béton et donc à limiter la progression des érosions. Ce type d'aménagement peut conduire à l'abrasion du parement aval des ouvrages par circulation transversale de blocs arrachés du rocher aval. Les moyens de limiter le phénomène consistent à appliquer des consignes strictes et à aménager une pré-excavation.

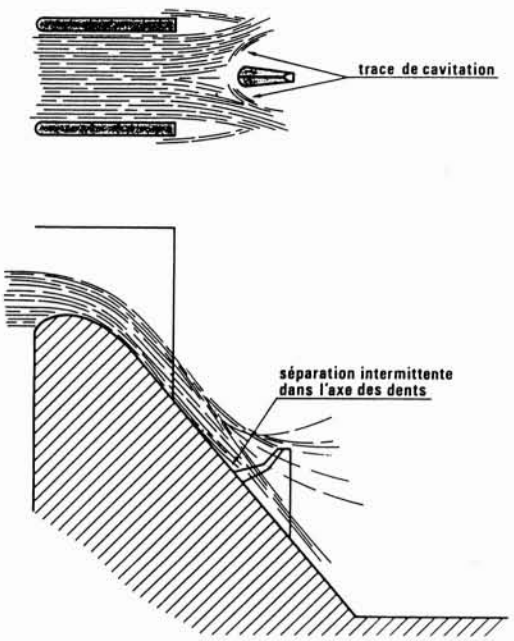
Jupia, Kashm-el-Girba et Moxoto sont des exemples de solutions mixtes. A Kashm-el-Girba, indépendamment du procédé de dissipation, une abrasion du béton et des blindages par des sables transportés par des écoulements rapides a pu être contrôlée par l'emploi de matériaux spéciaux.

3.5. Problèmes particuliers des ouvrages à passes multiples

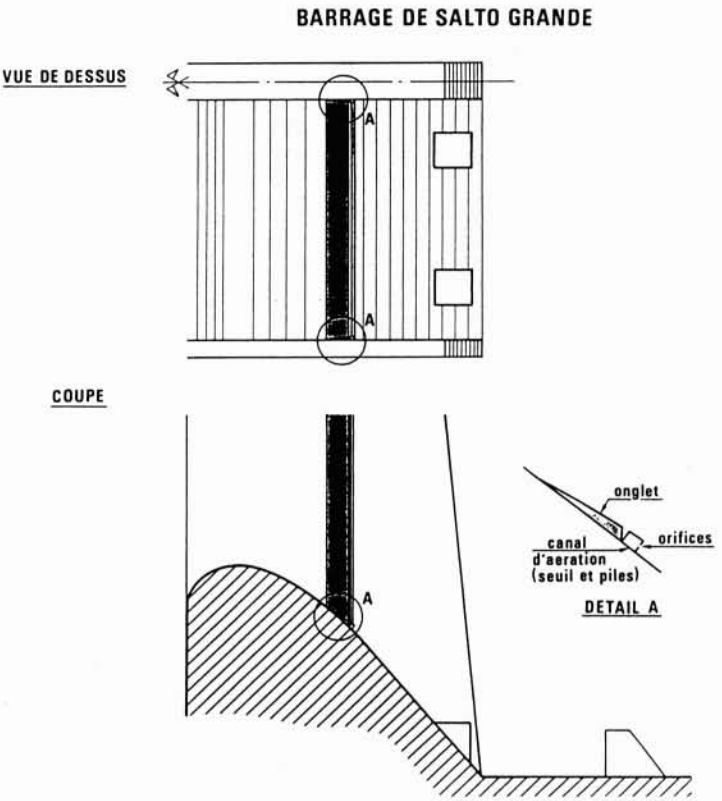
Une distribution non égale des débits en aval d'un évacuateur crée des courants de retour et des cisaillements susceptibles d'engendrer des instabilités d'écoulement, des érosions marquées ou la destruction des protections artificielles mises en place. Le remède consiste à prévoir des consignes d'ouverture égales des vannes. Evidemment, comme il est assez souvent probable qu'une vanne sera en entretien lors du passage d'une crue, le cas d'une vanne fermée isolée est un cas normal. Pour certains barrages, construits sur des rivières à sable, l'entretien n'est possible que lorsque le débit de la rivière est quasiment nul. Pour de telles rivières, réaliser des protections susceptibles de résister à toute consigne d'exploitation aurait conduit à écarter les projets par suite des coûts prohibitifs. La décomposition de l'évacuateur en deux ensembles distincts peut également accroître les coûts d'une manière pas toujours bien perçue par les maîtres d'ouvrage.

Autres considérations

Le calage des ouvrages de dissipation d'énergie prend toujours en compte l'effondrement possible de la loi hauteur débit-aval sous l'effet d'une érosion régressive par exemple. On sait maintenant construire des seuils, en enrochements par exemple, capables de maintenir des niveaux assurant le fonctionnement correct d'un bassin déchaussé.



3.



4.

4. Ecoulements à grande vitesse

On a évoqué les écoulements à grande vitesse notamment dans les zones où les écoulements changent de direction et ont de fortes courbures.

Les écoulements rectilignes sont capables de développer après un temps d'incubation relativement limité des érosions de cavitation sur des radiers bétonnés ayant un fini excellent (bien sûr, on observe des développements de cavitation sur des défauts de fini, sacs de béton éclatés, fers à béton laissés par erreur sur les radiers de chute modérée même si les courbures sont faibles). Les bétons spéciaux, béton fibreux par exemple apportent quelques améliorations. La tendance actuelle est plutôt d'incorporer de l'air dans l'écoulement au voisinage du radier. On doit éviter que l'air utilisé ne soit chargé d'embruns qui par altération du poids spécifique réduisent dramatiquement le débit d'air entraîné. De plus, les gradients de pression « adverses » dans la zone d'impact suivant la rampe d'aération sont à éliminer si on veut éviter le dégazage immédiat de la partie inférieure de l'écoulement.

En ce qui concerne plus particulièrement les zones à fortes courbures, on peut faire diverses remarques :

— le long des radiers à forte pente, la pression à la paroi est faible. Un bloc de déflection insuffisamment profilé peut développer en son amont des décollements intermittents susceptibles de générer des traces de cavitation (Ilha Solteira, *fig. 3*) ;

— l'entraînement d'air le long de seuils dits normaux de hauteur limitée doit se faire avec des déflecteurs doux de manière à éviter la formation d'un décollement remettant en pression la rainure d'aération. Toutes précautions doivent être prises pour éviter de piéger de l'eau sous forme d'embruns dans l'air utilisé pour la ventilation. De simples déflecteurs en forme d'onglets doivent être équipés de tubes pour éviter l'aspiration d'embruns par exemple générés par les frottements de l'eau contre les bajoyers (voir *fig. 4* le dispositif d'aération testé à Salto Grande) ;

— l'apport d'air jusqu'aux parois de blocs partiellement en charge, placés par exemple au pied d'une chute précédent un bassin, est difficile à cause des courbures qui développent des vortex écartant du béton les micro-bulles d'air. Des essais nature effectués sur des durées plus longues qu'à Salto Grande seraient nécessaires ;

— l'implantation de piles arrêtées à l'intersection d'une chute et d'un radier peut développer des érosions de cavitation susceptibles de découvrir les fers ; des arrondis ou des angles peu marquées sont nécessaires dès que la chute et l'énergie à dissiper sont importantes.

5. Ecoulements en galerie

Les écoulements en galerie peuvent poser les problèmes suivants :

— passage d'un écoulement à surface libre à un écoulement en charge partiel ou total ou vice et versa ;
— écoulement à grande vitesse, cavitation et aération ;
— élimination de l'air sans à coups notamment à la sortie des galeries en charge ;
— passage dans des pertuis vannés ou non vannés.

Ils sont rencontrés dans des dérivations provisoires, des évacuateurs de fond et des évacuateurs en puits. Les ouvrages évacuateurs sont parfois des dérivations provisoires transformées. On accepte souvent qu'une dérivation provisoire se mette en charge, la pression exercée restant souvent limitée. Pour des raisons d'économie, on installe plutôt des contrôles dans le plan d'étanchéité des ouvrages ou en amont pour les évacuateurs. L'écoulement en aval du contrôle est un écoulement rapide à surface libre, en général jusqu'à la sortie de la galerie.

5.1. Dérivation provisoire

Dans le cas de Turkwel, la qualité du rocher a conduit à ne pas revêtir la galerie de dérivation provisoire à laquelle on a donné une pente importante. Un pincement très léger équipé d'un reniflard permet qu'un écoulement à surface libre s'établisse pour les débits modérés. Pour les débits exceptionnels, la galerie se mettrait en charge à partir de l'aval. Ainsi, le pincement amont est en charge avec des pressions modérées pendant un temps très court.

5.2. Evacuateurs en puits

La solution la plus courante consiste à aménager en tête de la galerie rectiligne (une courbure en plan impose des études sur modèle physique complexes et conduit à surdimensionner inutilement la galerie) un pincement aéré dont l'importance est essentiellement liée à la pente de la galerie. Dès que le contrôle placé à l'entrée de la galerie est en charge et jusqu'à ce que le puits soit noyé, une partie importante de l'énergie est dissipée dans le puits (comme à Siliana par exemple).

Dans certains cas, comme à Vieux-Pré, la majeure partie de la dissipation d'énergie se fait dans une extension vers le bas du puits.

5.3. Ecoulements rapides dans les galeries

Lorsque la charge spécifique reste limitée, on se contente d'aérer le sommet de la galerie comme dans le cas des dérivations provisoires. Lorsque la vitesse est très élevée, on est amené notamment dans le cas des pertuis vannés à réaliser une aération sur toute la périphérie du jet et à la répéter lorsque l'effet des frottements risque d'être insuffisant pour ralentir efficacement l'eau.

La vidange de fond de Grand-Maison est équipée d'une première aération en aval immédiat de la vanne segment dont la section reste assez proche de la section de la galerie. L'alimentation en air par dessous, a été améliorée pour les charges modérées par la mise en place de déflecteurs latéraux évitant le blocage de la partie centrale de l'écoulement — et donc le noyage de la rainure d'aération et le dégazage prématuré. La galerie circulaire est blindée sur 80 mètres. Ensuite, un nouveau dispositif d'aération par dessous assure la transition avec une galerie en fer à cheval bétonnée.

5.4. Débouchés des écoulements en charge

Il existe des cas où une galerie, aérée au droit d'un pincement, est remise en charge en aval du pincement.

Si l'écoulement est rapide, supérieur à 8 m/s environ, la pente de la galerie faible ou négative vers la sortie et si le toit de la galerie n'est presque pas affecté par le niveau aval, on n'observe aucune modulation de l'écoulement et on obtient des conditions hydrauliques en général bonnes (l'évacuateur de fond de Bloomington, dans lequel on a envisagé d'insérer une conduite forcée a été ainsi conçu. Aucun phénomène de dégazage avec « blowback » violent n'a été observé).

Lorsque la pente est forte on peut observer la formation de blocages de larges bulles d'air qui, à partir d'une certaine taille ont tendance à remonter le courant. On peut observer des phénomènes un peu semblables dans les puits où les écoulements ne sont pas bien décollés des parois et séparés en lames suffisamment indépendantes (exemple de Graminha).

Dans le cas d'écoulements en charge, entraînant péniblement des bulles d'air (effet d'une vitesse moyenne faible ou d'une pente un peu forte), et arrivant dans un bassin par un débouché fortement en charge, les bulles d'air ont tendance à ralentir puis à s'allonger vers la surface libre en générant des coups de bélier. Un dispositif de dégazage progressif, tel que collecteur d'air à pente douce équipé éventuellement de ralentisseurs, fractionnent des bulles par des grilles installées dans des puits larges ou dispositifs à soupapes, permet souvent d'améliorer la situation.