



HAL
open science

Sûreté et efficacité des barrages écrêteurs de crue

L. Deroo, P. Royet, C. Poulard

► **To cite this version:**

L. Deroo, P. Royet, C. Poulard. Sûreté et efficacité des barrages écrêteurs de crue. Colloque CFBR “ Sûreté des barrages et enjeux ”, Nov 2016, Chambéry, France. pp.203-221, 10.24346/fbr_colloque2016_c01 . hal-01467467

HAL Id: hal-01467467

<https://hal.science/hal-01467467v1>

Submitted on 14 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SÛRETÉ ET EFFICACITÉ DES BARRAGES ÉCRÊTEURS DE CRUE

Safety and efficiency of flood mitigation dams

Luc, Deroo

ISL

deroo@isl.fr

Paul, Royet ; Christine, Poulard

Irstea

paul.royet@irstea.fr ; christine.poulard@irstea.fr

MOTS CLÉS

pertuis ouvert, première mise en eau, transit sédimentaire, vannages, systèmes de barrages

RÉSUMÉ

*Les barrages écrêteurs de crue forment une catégorie singulière de barrages, qui mérite une attention et des développements techniques spécifiques. Les risques (probabilité * conséquences) engendrés par ces barrages sont différents de ceux des autres barrages. Elle mérite des développements techniques spécifiques, pour deux raisons. D'une part, il y a lieu de tenir compte des difficultés de surveillance et de proposer des moyens adaptés. D'autre part, la conception standard des pertuis ouverts doit concilier les enjeux écologiques (faire obstacle le moins possible aux circulations en conditions normales : crues courantes, sédiments, animaux) et les enjeux économiques (réduire substantiellement les dommages, donc être efficace pour les crues moyennes), ce challenge étant parfois difficile à remplir.*

Cette communication dresse l'inventaire des barrages écrêteurs du parc français, tire quelques retours d'expérience de crues récentes, puis formule des pistes de réflexion concernant la conception des ouvrages.

ABSTRACT

Because of their specificities, flood mitigation dams should be designed with a particular attention and deserve specific technical developments. Particular attention because they bear a different risk (probability x consequences) than the other dams. Specific developments, to address the safety issues and to optimize their efficiency. Flood mitigation dams specific safety issues relate to the surveillance procedures for these usually empty dams and also to extreme floods handling. The efficiency issue refers to the design of bottom outlets. The bottom outlets must meet both ecological constraints (limit impacts on animal circulation and sediment transport) and economic objectives (maximal reduction of Expected Annual Damages), so implying to find a compromise. This communication synthesizes the inventory of french flood mitigation dams, comments some recent feed-back analyses and proposes food for thought about this kind of dams design

1. SPÉCIFICITÉS DES BARRAGES ÉCRÊTEURS DE CRUE ET PRINCIPES DIRECTEURS

La plupart des barrages, en tous cas ceux dont le passage des crues s'accompagne d'une élévation du niveau de la retenue, jouent un rôle d'écrêtement de ces crues. Mais il s'agit plutôt d'un bénéfice secondaire que d'une fonction affichée. Les barrages auxquels nous nous intéressons dans cet article sont ceux pour lesquels la fonction d'écrêtement des crues est la fonction unique ou la fonction principale, telle qu'elle ressort de leur document administratif (régime de l'autorisation dans la quasi-totalité des cas).

1.1 Assurer la fonction d'écrêtement

Lorsqu'il a l'unique fonction d'écrêtement des crues, et pour réserver le maximum de capacité à cet usage, le barrage écrêteur de crues est normalement équipé d'un pertuis de fond ouvert qui maintient la retenue vide.

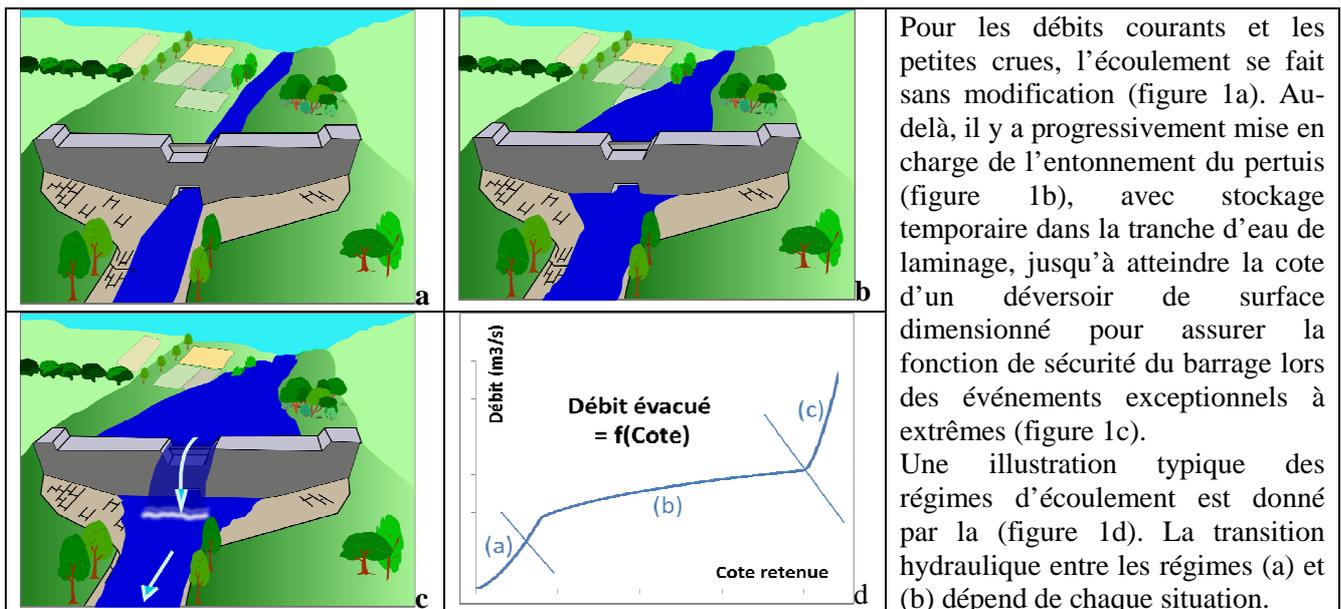


Figure 1: Schéma de fonctionnement d'un barrage à pertuis ouvert

Les barrages écrêteurs de crues ont parfois une fonction de stockage d'un volume destiné, par exemple, au soutien d'étiage. Le pertuis n'est alors pas placé en fond de retenue, mais à la cote de retenue semi-permanente (Figure 2).

La cote de l'évacuateur de surface est dénommée « cote de protection » et elle est associée à une crue (ou à une famille de crues) qui, vu la présence de l'ouvrage, ne sera pas dommageable pour les enjeux en aval. La probabilité annuelle de dépassement de cette cote est habituellement de 10^{-1} à 10^{-2} selon les enjeux à protéger, soit une période de retour de 10 à 100 ans [CFBR, 2013]. Le choix de la valeur de cette probabilité relève du maître d'ouvrage et répond à des considérations économiques et d'aménagement du territoire. A cette cote, la vérification de la stabilité structurelle de l'ouvrage est effectuée de la même façon et avec les mêmes coefficients de sécurité que ceux qui sont requis en situation normale d'exploitation.

1.2 Assurer la sûreté du barrage en crues

L'évacuateur de surface doit être dimensionné vis-à-vis de la situation exceptionnelle de crue qui correspond à un niveau de remplissage laissant encore une revanche pour se protéger notamment de l'effet des vagues et des irrégularités de la ligne d'eau. Le niveau de remplissage tient compte du laminage de la crue. Pour cette situation de crue, l'ouvrage doit répondre à tous les standards de sûreté, que ce soit sur le plan structurel (résistance au cisaillement ou au glissement, résistance en fondation, résistance à l'érosion interne, résistance à l'affouillement) ou sur le plan hydraulique (marge par rapport au débordement des coursiers, ouvrages de dissipation correctement dimensionnés). On dispose donc encore de marges avant d'atteindre des états-limites de rupture. La probabilité annuelle de dépassement de cette situation de projet dépend de la classe et du type du barrage [CFBR, 2013].

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

L'évacuateur doit aussi être dimensionné vis-à-vis de la situation extrême de crue correspondant à l'atteinte de la cote de danger du barrage, en tenant compte bien sûr du laminage de la crue. Cet état peut résulter soit d'une crue extrême avec un fonctionnement nominal de l'évacuateur de crues, soit d'une crue plus faible combinée avec un dysfonctionnement de l'évacuateur de crues. La probabilité annuelle de dépassement de cette situation de projet dépend uniquement de la classe du barrage [CFBR, 2013].

1.3 Une grande diversité d'ouvrages

Sur le même principe, limiter le débit d'écoulement, les réalisations montrent une très grande diversité :

- par la taille du barrage, qui peut être haut de moins d'un mètre à 100m ou plus (Kantoush) ;
- par sa localisation : dans un thalweg sec, sur un cours d'eau permanent, en dérivation, sur des axes d'écoulement d'eau en milieu urbain ;
- par le matériau employé pour le corps de barrage : barrage en béton (avec pertuis court), barrage plus massif en remblai (donc pertuis plus long) ;
- par la forme du pertuis : le pertuis ouvert est l'équipement le plus courant en fond de retenue, mais on peut aussi rencontrer quelques variantes sur lesquelles nous reviendrons plus tard :
 - barrage équipé de plusieurs pertuis étagés (figure 3) ;
 - barrage équipé d'un pertuis vanné ;
 - barrage équipé d'une ouverture centrale sous forme d'une meurtrière ouverte vers le haut (Figure 4).



Figure 2 : Barrage de Drtijsca (Slovénie) : plan d'eau permanent contrôlé par une prise 'tulipe'



Figure 3 : Barrage de Mislakowice 2 (Pologne) équipé de deux pertuis étagés (crédit Irstea)

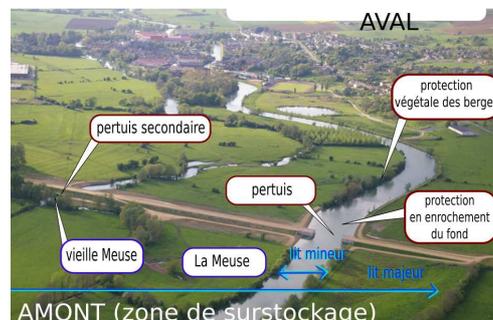


Figure 4 : Barrage de Mouzon sur la Meuse : barrage « meurtrière » (crédit EPAMA)

En outre, il est tentant de donner au pertuis une forme géométrique et une largeur déterminées pour un bon fonctionnement hydrologique et pour une construction aisée, mais on peut aussi chercher à réduire les effets négatifs sur les écosystèmes en s'astreignant par exemple à respecter la largeur naturelle du cours d'eau, à avoir une pente compatible avec les déplacements des animaux aquatiques, à créer éventuellement un chenal d'étiage. Ainsi, certains choix techniques auront des conséquences directes sur le fonctionnement hydrologique, mais aussi sur les aspects environnementaux [Poulard et al., 2010].

2. LE PARC DES BARRAGES FRANÇAIS ET LE RETOUR D'EXPÉRIENCE

2.1 Le parc des barrages écrêteurs de crue

L'exploitation de la base de données SIOUH, gérée par les services du MEEM et qui recense tous les barrages français classés au titre de la réglementation de décembre 2007, permet d'avoir une vue d'ensemble du parc des barrages écrêteurs de crue. 639 barrages recensés dans cette base de données ont comme usage unique l'écrêtement des crues. 67 autres barrages l'ont comme usage principal, l'usage secondaire étant le plus souvent le soutien d'étiage. Le volume mobilisable pour l'écrêtement des crues est très variable, allant de quelques milliers de m³ pour les plus petits jusqu'à plusieurs centaines de millions de m³ pour le total des quatre barrages exploités par Seine Grands Lacs (sachant que ces derniers servent aussi au soutien d'étiage).

La très grande majorité de ces barrages relève¹ de la classe D. La répartition selon les classes est donnée sous deux entrées : (i) la classe théorique basée uniquement sur les critères géométriques hauteur H du

¹ Ou plutôt relevait de la classe D, car le décret de mai 2015 supprime cette classe.

barrage et volume V de la retenue² et (ii) la classe administrative ressortant de l'arrêté préfectoral (AP) d'autorisation ou d'un AP complémentaire (Figure 5). Il apparaît que de nombreux barrages ont été surclassés de C en B ou de D en C. C'est bien sûr la présence d'enjeux en aval proche du barrage qui a conduit le préfet à prendre cette décision. Et l'on peut imaginer que les barrages actuellement classés en D et qui font plus de 50 000 m³ de capacité vont, in fine, intégrer la classe C au vu de la présence d'habitations en proximité aval³.

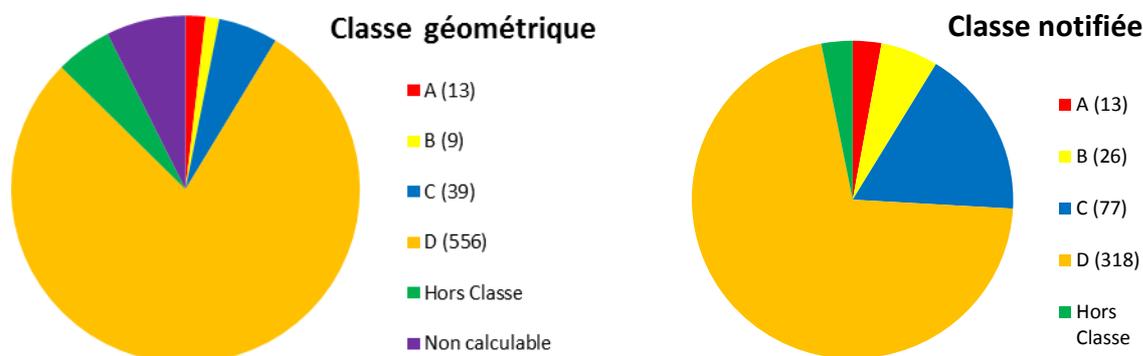


Figure 5 : Répartition des barrages écrêteurs de crues par classes (données SIOUH, classement selon décret 2007).

Parmi les 706 barrages recensés, le type de barrage est renseigné pour 703 d'entre eux. Il en ressort que 95% sont des barrages en remblai, 3% des barrages poids, les 2% restants couvrant les autres types de barrages (voute, contreforts en barrages mobiles).

2.2 Retour d'expérience

2.2.1 La crue de septembre 2002 sur le Vidourle

En septembre 2002, un événement hydrologique exceptionnel a frappé la bordure des Cévennes avec localement des cumuls⁴ en 24 h dont la période de retour dépasse 1 000 ans. L'évènement a affecté particulièrement les trois barrages écrêteurs de crues qui équipent le haut bassin du Vidourle et de deux de ses affluents, dans le département du Gard. Ces barrages ont alors connu leurs plus hauts niveaux depuis leur mise en service avec déversement sur leur évacuateur de surface et même, pour le barrage de la Rouvière, sur le couronnement. Les données disponibles ont permis de reconstituer les hydrogrammes de crue à l'entrée et à la sortie des retenues [Fouchier, 2004]. La figure 6 présente les résultats de la simulation de la crue au barrage de La Rouvière. La crue entrante présente deux pointes successives évaluées à environ 1 400 m³/s. La première pointe de crue survient dans la nuit du 8 au 9 septembre. Elle provoque une montée très rapide de la retenue et une mise en service de l'évacuateur de surface, avec une première pointe de débit sortant évalué à plus de 500 m³/s. Ensuite, le débit entrant chute, ce qui entraîne une légère baisse de la retenue, mais sans provoquer d'interruption du déversement sur le seuil. Ce premier corps de crue apporte déjà 23 Mm³.

La deuxième pointe de crue arrive en fin de matinée sur une retenue déjà pleine. Elle provoque la surverse sur la crête du barrage pendant plus de 4 heures ; le débit évacué maximum est alors évalué à 840 m³/s. Ce deuxième corps de crue apporte plus de 20 Mm³. À titre de comparaison, la capacité de stockage de la retenue est de 7,7 Mm³ sous l'évacuateur de surface et de 5,5 Mm³ supplémentaires entre cet évacuateur et la crête du barrage. Ramenée à la superficie du bassin versant de La Rouvière, la lame totale ruisselée est de 447 mm en 24 heures.

² Le volume d'un barrage écrêteur de crues est le volume du réservoir correspondant à la cote du déversoir de surface.

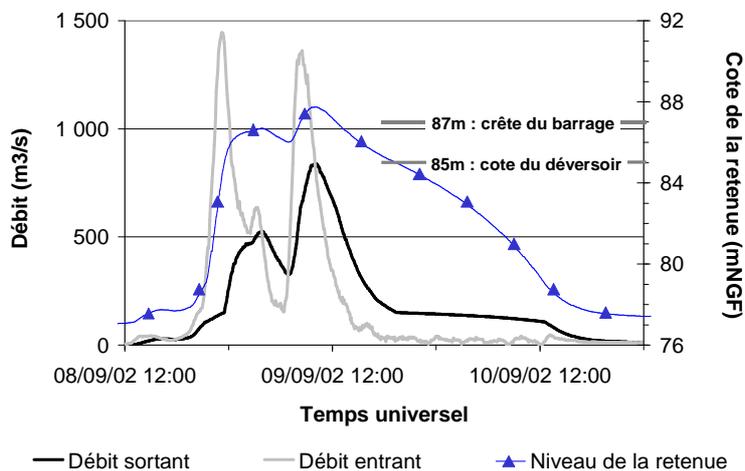
³ Le décret de mai 2015 introduit le critère suivant pour la classe C : ouvrage qui répond aux conditions cumulatives :

i) $H > 2\text{m}$;

ii) $V > 0,05\text{Mm}^3$;

iii) A l'intérieur de l'espace situé à l'aval du barrage, jusqu'à une distance par rapport à celui-ci de 400 mètres, il existe une ou plusieurs habitations dont le rez-de-chaussée est situé sous le point bas du barrage.

⁴ Plus de 680 mm en 24 heures enregistrés localement au pluviomètre d'Anduze et au pluviographe de Cardet, 400 à 550 mm en pluie de bassin pour les trois barrages du Vidourle.



L'impact des retenues sur les débits de pointe est variable. Si la première pointe de crue a été partout bien écrêtée, le coefficient d'écrêtement de la deuxième pointe atteint 63% pour Ceyrac, 38% pour La Rouvière et à peine 30% pour Conqueyrac. A Sommières, principale ville plus en aval sur le Vidourle, le débit de pointe de crue a été estimé à 2 550 m³/s ; il aurait été de 20% supérieur en l'absence des barrages. Cela s'est traduit par une réduction de 0,5 m de la hauteur d'eau.

Figure 6 : Hydrogrammes au barrage de la Rouvière le 8 et le 9 septembre 2002.

L'événement de 2002 a amené à reprendre les études hydrologiques d'origine. Si les débits de pointe n'ont été que peu modifiés, ce sont surtout les volumes de crue qui ont été considérablement revus à la hausse. Sur le barrage de la Rouvière, ces analyses conduisent à attribuer une période de retour de 500 à 1000 ans à l'événement de 2002.

2.2.2 La rupture des bassins de la Savoureuse en décembre 1999

Justifié par les crues de la Savoureuse et les inondations catastrophiques de Belfort et des zones industrielles situées en aval (dont les usines Peugeot) en 1990, un dispositif de prévention des crues a été mis en place en 2000-2001 sous la forme, entre autres mesures, de neuf bassins de rétention implantés en dérivation de la Savoureuse et de son affluent la Rosemontoise. D'une capacité totale de stockage de 2 Mm³, ces bassins avaient pour objectif d'écrêter les crues pour la gamme de périodes de retour de 10 à 100 ans.

Alors que la construction était tout juste terminée, les crues de fin décembre 2001 ont entraîné la rupture en cascade d'une série de trois bassins, sans faire, par miracle, de victime. L'analyse post-événement [Huet, 2002] a remis en cause les études hydrologiques initiales et a montré que la période de retour de la crue était nettement moins que centennale. En outre, l'expertise a montré de nombreux défauts de conception et de réalisation, en particulier la non prise en compte du fonctionnement du système au-delà de la « crue de projet ». Après plus de 10 ans d'études et de travaux, c'est un projet profondément revu qui est désormais à nouveau en fonctionnement.

2.2.3 Le barrage de Saint Génès de Malgloires et les crues depuis sa mise en service

Situé en amont du village de Saint Génès de Malgloires, le barrage contrôle un bassin versant de 5,75 km² (soit 60% de la surface du bassin versant au droit du village). Il a été construit en 2010 dans le but d'éviter les débordements dans le village pour les crues de faible durée de retour (20 ans) et de diviser par deux le débit de pointe d'une crue centennale. Ces éléments ont conditionné le dimensionnement de l'ouvrage qui est un barrage en remblai de 14 m de hauteur et de 0,32 Mm³ de capacité à la cote du déversoir de surface. S'agissant d'un barrage de classe B, la crue extrême (probabilité 3.10⁻⁵) n'entraîne pas de surverse sur la crête du remblai.

Lors des événements de l'automne 2014, le barrage de Saint Génès de Malgoirès a connu trois crues qui ont mis pour la première fois en fonctionnement l'évacuateur de crues. Les lames d'eau sur le déversoir se sont limitées à 20 cm. L'évacuateur de crue n'a fonctionné que quelques heures pour chaque événement. La durée de vidange a été de l'ordre de 3 jours.

Figure 7 : Le barrage de Saint Génès en train de déverser en octobre 2014



Du point de vue hydrologique, les volumes de crue sont restés plus modestes que ceux des hydrogrammes de projet. Ainsi, les débits de pointe ont été voisins d'une crue centennale alors que les volumes sont restés à hauteur de ceux d'une crue décennale. L'essentiel du volume de crue a été stocké et aucun débordement n'a été constaté en aval du barrage. Le barrage a fonctionné conformément à son dimensionnement et n'a connu aucun désordre significatif. Il est donc possible de conclure que l'ouvrage a permis d'éviter l'inondation du village de Saint Génès pour ces trois événements [Fouchier, 2016].

2.2.4 Crue du typhon 18, Japon 2013

Le typhon n°18 qui s'est produit en 2013 au Japon a apporté des cumuls en 24h entre 200 et 500 mm sur les bassins des rivières Uji, Katsura et Kamo, qui traversent Kyoto, et Kizu qui conflue à l'aval immédiat. Les bassins versants sont équipés de 7 barrages, qui contrôlent ensemble environ 30% du bassin versant, et qui sont pour partie affectés à l'écrêtement des crues. L'épisode de crue a commencé en soirée le 15 septembre ; le pic de crue est intervenu, aux barrages, pendant la nuit ; et à Kyoto le lendemain matin.



Figure 8 : Situation de la Katsura River à Kyoto

Les vannes des barrages ont été manœuvrées selon une procédure de gestion dynamique. Sur les barrages du bassin Kizu, le début de la crue a été librement évacué, et les vannes progressivement fermées entre 6h et 8h du matin. Sur la rivière Katsura, la crue a été retenue le plus longtemps possible, et les vannes finalement ouvertes vers 12h le 16 septembre, alors que la cote de retenue avait déjà dépassé le « niveau d'alerte ».

A Kyoto, toute la rive droite, protégée par une digue, a échappé à l'inondation. Les enjeux sont considérables : centre historique, Shikansen, etc... Le montant des dommages évités a été chiffré à 10 milliards de dollars [Kanmuri, 2013].

2.2.5 Leçons de ces quelques retours d'expérience

Ce retour d'expérience permet de mettre en évidence quelques traits de ces ouvrages « écrêteurs de crue » :

Une diversité dans le dimensionnement et l'implantation des ouvrages (barrage unique ou système de barrages – à proximité ou éloigné des enjeux)

La diversité des dimensions est exprimée par le volume dédié à l'écrêtement des crues : de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de m³ pour les barrages de classe D, 0,3 Mm³ pour le barrage de Saint-Génès, 2 Mm³ à l'amont de Belfort, quelques dizaines de Mm³ pour la capacité cumulée des barrages du bassin de Vidourle, et jusqu'à quelques centaines de Mm³ pour les barrages de Seine Grands Lacs. Ce qui fait 5 ordres de grandeur d'écart entre les plus petits et les plus gros.

La diversité des situations concerne aussi l'implantation du (des) barrage(s) sur le bassin versant. La situation la plus simple est celle d'un barrage unique situé à proximité immédiate des enjeux, sans affluent intermédiaire (Saint-Génès). Une situation plus complexe est celle d'une série de bassins en dérivation

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

(Savoireuse). Une autre situation complexe est celle d'ouvrages situés à distance des enjeux, avec des affluents intermédiaires qui peuvent générer des situations de concomitance des crues (Seine, Japon).

Une efficacité variable, selon les situations mais aussi selon les crues, et avec des effets de seuil

L'efficacité n'est pas une caractéristique intrinsèque de l'aménagement. Elle dépend certes de facteurs physiques (volume des réservoirs comparé au volume prévisible des crues, conception du (des) pertuis ou des organes de dérivation), mais elle peut varier grandement d'un événement à l'autre, en fonction de la typologie et du déroulement des crues, notamment dans le cas de systèmes de barrages. L'efficacité observée sur ces retours d'expérience est variable. Cette efficacité peut s'apprécier de plusieurs façons :

- l'efficacité de l'écrêtement des crues au barrage ou à chaque barrage, très bonne par exemple pour les crues de 2014 à Saint-Géniès,
- l'éventuelle perte d'efficacité le long du cours d'eau à l'aval, par effet de l'horloge des crues des bassins intermédiaires ; ainsi dans le cas du Vidourle en 2002, où l'efficacité des barrages se trouve atténuée au droit de Sommières (20%) du fait de l'apport des tributaires aval,
- l'efficacité résultante au droit des enjeux, qui s'apprécie par les dommages évités. Cette efficacité résultante dépend étroitement des conditions d'écoulement au droit des enjeux (exemple du Japon).

Le cas du Japon montre combien les barrages écrêteurs peuvent être efficaces : coût des dommages évités nettement supérieur au coût d'investissement. Mais ce cas montre aussi l'importance, dans le calcul des dommages évités, des effets de seuil. Il y avait, à Kyoto, un effet de tout ou rien selon que la crue pouvait ou non être contenue à l'intérieur des digues.

Une gestion active (vannes manoeuvrées en crue) ou passive des réservoirs

La plupart des barrages écrêteurs sont non vannés. Cependant, certains le sont, avec manoeuvre des vannes pendant la crue pour optimiser l'écrêtement. C'est plutôt le cas des grands barrages avec un exploitant organisé pour gérer des astreintes (Japon, Seine Grands Lacs).

Un risque élevé en cas d'accident car la vulnérabilité à l'aval est nécessairement forte

L'accident du système de la Savoireuse et la surverse sur le barrage de la Rouvière montrent que ce type de barrages peut (ou aurait pu) rompre. L'évacuateur de crue du barrage de la Rouvière a été dimensionné, à l'époque du projet, en considérant une crue dont la révision de l'hydrologie a montré la nette sous-évaluation du volume. C'est ce paramètre qui est essentiel (plus que le débit de pointe) dans le dimensionnement de l'évacuateur de sécurité. Lors de l'accident, les bassins de la Savoireuse étaient achevés, mais n'avaient pas été précédemment mis en eau. Une mise en eau contrôlée, comme c'est l'usage pour les autres catégories de barrages, aurait permis de déceler au moins une partie des défauts de conception et de réalisation. Mais elle n'aurait pas identifié les erreurs de conception hydrologique, et peut-être pas évité la rupture.

3. SÛRETÉ DES BARRAGES ÉCRÊTEURS

3.1 Un risque de rupture plus fort que pour les autres barrages ?

Aucune statistique ne permet d'évaluer si le risque de rupture des barrages écrêteurs est plus important ou au contraire moins important que celui des autres barrages. . En France, il y a l'accident de la Savoireuse. Cela fait une rupture pour environ 100 barrages dans la gamme de classes A à C (il n'est pas certain que les ruptures dans la classe D soient connues). Le ratio de 1% est très élevé, mais pas statistiquement représentatif.

Les spécificités des barrages écrêteurs peuvent augmenter ou diminuer la probabilité de rupture par rapport à la probabilité de rupture d'un barrage analogue, mais à retenue permanente (tableau 1).

Spécificités	Commentaires
Situation habituelle de retenue vide	Pendant l'essentiel de sa durée de vie, le barrage est vide, et les remplissages sont de durée brève ; cela limite les sollicitations liées aux gradients hydrauliques (érosion interne, piézométrie). Par ailleurs, la probabilité de concomitance entre retenue pleine et séisme suffisamment fort pour menacer le barrage est très faible, et peut généralement être négligée.

	A contrario, le parement amont, exposé aux aléas climatiques, peut vieillir plus vite que s'il bénéficie de la protection d'une retenue d'eau. De plus, la brièveté des sollicitations hydrauliques limite les possibilités d'auscultation et de surveillance du comportement.
Fonction d'écrêtement des fortes crues	Pour le calcul de l'évacuation des crues, il est légitime de considérer la capacité de stockage offerte par la retenue, généralement vide ou basse au début de la crue. Cependant, une crue multiple ou une crue de volume plus élevé que prévu peuvent pré-remplir la retenue avant l'arrivée des plus forts débits, et mettre en défaut l'hypothèse de dimensionnement. Pour écrêter les fortes crues, il faut limiter la capacité d'évacuation de ces crues – et corrélativement augmenter le volume de la tranche de laminage. Par rapport à un évacuateur de plus grande capacité (et une moindre tranche de laminage), une telle conception augmente la probabilité de surverse sur la crête en cas d'occurrence d'une crue plus forte que la crue de dimensionnement de l'évacuateur. Les calculs montrent que la sensibilité est forte (Deroo, 2010).
Première mise en eau	Une première mise en eau contrôlée d'un barrage est une épreuve importante pour juger de sa sécurité. Lorsque le barrage écrêteur n'est pas équipé de vannes, cette première mise en eau contrôlée n'est pas possible. A noter cependant : une première mise en eau incontrôlée peut également se produire pour les autres barrages, en cas de crue forte pendant le chantier ou lors du premier remplissage.
En crue : montée rapide du plan d'eau	La montée rapide du plan d'eau peut avoir des effets défavorables dans certaines circonstances, notamment pour certains barrages en argile sensibles à la fracturation hydraulique ou à la dessiccation.

Tableau 1 : Spécificités des barrages écrêteurs ayant un impact sur la probabilité de rupture d'un barrage écrêteur

Le tableau 1 fait ressortir que les facteurs clés à impact sur la probabilité de rupture d'un barrage écrêteur sont essentiellement l'écrêtement des crues extrêmes et la difficulté de surveillance de ce type d'ouvrage (première mise en eau, auscultation et surveillance ultérieures).

Le deuxième volet du risque est la vulnérabilité. A caractéristiques de barrage équivalentes, la vulnérabilité à l'aval des barrages écrêteurs est en moyenne plus forte puisque le barrage écrêteur a pour vocation de protéger des zones habitées et des enjeux économiques, qu'une éventuelle rupture menace directement. Cette plus grande vulnérabilité (en moyenne) peut ainsi conduire à un plus grand risque (en moyenne).

Il est possible de réduire le risque, en diminuant l'impact des spécificités techniques des barrages écrêteurs qui augmentent la probabilité de rupture (cf. infra), et en bénéficiant alors de l'impact des spécificités techniques qui au contraire diminuent cette probabilité. Il est également possible de diminuer les conséquences (au moins humaines) en cas de rupture, vu que – spécificité des barrages écrêteurs - la zone protégée devrait théoriquement bénéficier d'un système d'alerte en cas de dépassement du niveau de protection assuré par le barrage. Ce système peut également être utilisé pour l'évacuation en cas d'atteinte de la cote de danger.

3.2 Sécurité en crue

Dans le monde, la submersion en crue reste de loin la première cause d'accident et de pertes en vies humaines par les barrages, tous types confondus. La submersion est souvent intervenue en raison de débits de crue plus forts que prévu au dimensionnement. En France, la prise en compte, relativement récente, de la crue extrême a apporté un surcroît important de sécurité [CFBR, 2013]. Sur le parc existant, elle opère un tri entre les conceptions robustes en conditions de crues extrêmes et les autres. Une conception est robuste en conditions extrêmes si elle peut supporter sans trop de dommages une crue supérieure à la crue de dimensionnement. Ces considérations prennent une importance particulière pour les barrages écrêteurs de crues, en particulier dans les zones où l'hydrologie reste délicate à cerner.

Cela conduit à privilégier (i) des évacuateurs de surface à faible lame déversante, donc forte augmentation de capacité entre cote de RN et cote de crête et (ii) une conception de barrage et de sa crête

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

résistants à une éventuelle surverse limitée. Il existe tout un panel de solutions techniques, déjà éprouvées ou en cours de développement, permettant d'optimiser la robustesse de l'aménagement :

- Des évacuateurs de forte capacité sous faible tranche d'eau, type seuil libre de grand développement, seuil labyrinthe ou PKweir ;
- Des évacuateurs pouvant libérer des capacités supplémentaires d'évacuation si nécessaires : vannes, systèmes fusibles. Solutions pour lesquelles les inconvénients des fusibles et des vannes doivent être également intégrés à la réflexion ;
- Des conceptions de barrages qui tolèrent un déversement limité par-dessus la crête : barrages rigides avec résistance à l'érosion garantie au pied du barrage, barrages en remblai avec parement aval résistant à l'érosion. Solutions pour la plupart encore en cours de développement.

Les consignes de crue ont au moins autant d'importance que pour les barrages à retenue permanente ; c'est vrai pour les barrages à organes mobiles, mais aussi pour les barrages qui en sont dépourvus. Pour les très fortes crues, qui dépassent les capacités d'écrêtement du barrage et qui conduisent à un risque accru d'inondation à l'aval, le fonctionnement des évacuateurs du barrage écrêteur conduit presque systématiquement à un gradient d'augmentation des débits relâchés plus fort que le gradient naturel. En effet, entre le moment où l'évacuateur de sécurité se met en service (« situation rare », débit restitué très écrêté) et le moment où la cote maximale de retenue est atteinte (plus d'écrêtement), le débit sortant reste inférieur au débit entrant ($Q_s < Q_e$), mais le rattrape rapidement (gradient de $Q_s >$ gradient de Q_e). Les figures 10 (droite) et 12 illustrent ce phénomène. Les consignes peuvent compenser ce risque, en donnant des indications d'alerte suffisamment précoces.

3.3 Les conditions de la première mise en eau

La première mise en eau contrôlée détecte les défauts de conception et de construction. C'est une épreuve importante pour juger de la sûreté des barrages. Il s'agit d'un point faible des barrages écrêteurs, qui ne disposent en général pas de cette épreuve. Cela entraîne deux questions :

- Peut-on envisager des premières mise en eau contrôlées sur les barrages écrêteurs ?
- Peut-on remplacer la première mise en eau contrôlée par une autre barrière de sécurité équivalente ?

Il y a deux objections à la mise en œuvre d'une mise en eau contrôlée. La première est économique : une mise en eau contrôlée nécessite un dispositif de vannage, qui ne sert qu'une fois dans la vie de l'ouvrage, pour cette épreuve de mise en eau. La deuxième tient au régime des cours d'eau : pour certains barrages écrêteurs, le régime du cours d'eau est erratique, sans aucun débit la plupart du temps ; difficile alors de programmer l'épreuve de mise en eau.

Ces objections ne pèsent pas de la même manière pour tous les barrages. Pour un barrage de classe D, sur un cours d'eau généralement sec, l'installation d'un vannage est généralement inappropriée. Pour un barrage de classe A, l'installation d'un vannage et une épreuve de mise en eau au moins partielle sont en général justifiées. Entre ces deux situations, cela dépend des circonstances.

Ces défauts sont le plus souvent localisés dans la fondation, à l'interface entre le barrage et la fondation et le long des ouvrages traversants. Ces défauts se manifestent par des écoulements localisés, des montées en pression interstitielle, parfois des tassements. Peut-on remplacer la première mise en eau par d'autres moyens ?

Dans le cas des barrages en remblai, les phénomènes dangereux associés sont ceux de l'érosion interne. Même si l'érosion interne demeure à certains égards un domaine mal maîtrisé, des progrès importants ont été accomplis dans l'identification et la caractérisation des situations à risques ; une bonne conception et une bonne construction diminuent grandement le risque d'accidents. La bonne conception nécessite des reconnaissances et une expertise géologique appropriées, ainsi qu'un projet spécifiquement conçu vis-à-vis du risque d'érosion interne, avec en particulier une filtration systématique de tous les chemins possibles d'érosion. La bonne construction impose une surveillance en continu des opérations sensibles : réception des fouilles, traitement des fouilles notamment si elles sont rocheuses, mise en œuvre des remblais au contact des fouilles et des ouvrages hydrauliques. L'expérience montre que les accidents d'érosion interne se sont produits lorsque ces dispositions de conception ou de construction n'étaient pas réunies. Ainsi, pour les barrages qui ne présentent pas de difficulté géologique particulière, un contrôle détaillé de la conception et

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

une surveillance exhaustive de la construction peuvent, selon les auteurs, remplacer de manière suffisamment fiable l'épreuve de première mise en eau.

Dans le cas des barrages en béton, les phénomènes dangereux sont associés aux écoulements en fondation, pouvant causer de l'érosion ou des montées en pression interstitielle. Là aussi, une bonne conception et une bonne construction (réception et traitement des fouilles) diminuent grandement le risque d'accidents. Le retour d'expérience des accidents sur les barrages-poids confirme leur grande marge de sécurité tant que le contexte géologique est maîtrisé. Ainsi, plus encore que pour les barrages en remblais, une surveillance exhaustive en conception et construction peut remplacer de manière suffisamment fiable l'épreuve de première mise en eau, tant que la géologie ne présente pas de difficulté particulière.

3.4 Surveillance et auscultation

La surveillance et l'auscultation sont difficiles à mettre en œuvre, car les mises en eau sont rares et difficiles à anticiper. Cependant le dispositif d'auscultation d'un barrage écrêteur de crues ne diffère pas fondamentalement de celui d'un barrage classique. C'est surtout la périodicité des mesures d'auscultation qui doit être adaptée, avec des mesures moins fréquentes à retenue vide et beaucoup plus resserrées en crues, malgré les difficultés de mobilisation de moyens humains dans ces situations de crise et sans oublier les considérations de sécurité d'accès des personnels. Pour les barrages les plus importants, la téléauscultation prend tout son intérêt, à condition de disposer d'appareils correctement protégés contre la foudre et l'immersion. Dans la quasi-totalité des cas, une télémessure de la cote du plan d'eau est vivement recommandée, ne serait-ce que pour être averti en avance de l'atteinte de la cote de protection. Enfin, les outils de prévision des crues permettent d'anticiper la mise en œuvre des consignes de crue.

4. EFFICACITÉ DES BARRAGES ÉCRÊTEURS

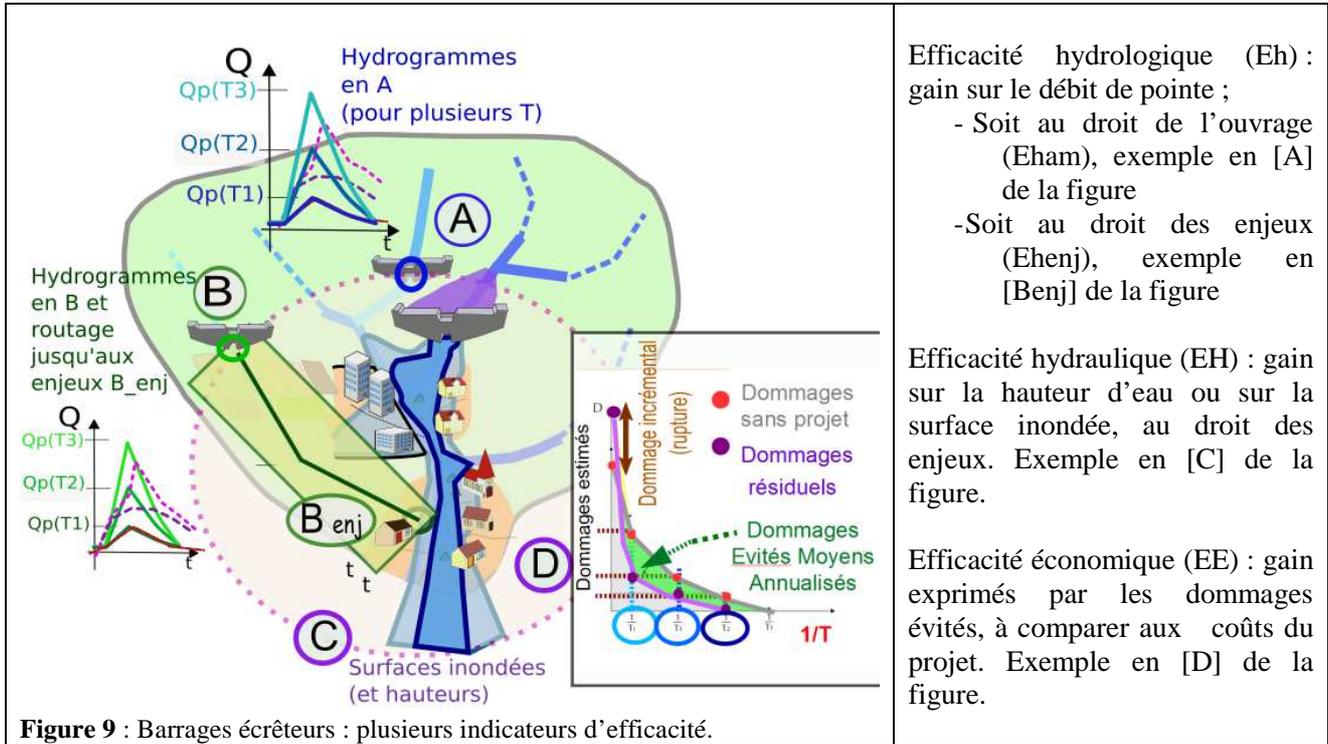
La sûreté des barrages passe par un dimensionnement adéquat de l'évacuateur de crue, mais leur efficacité pour résoudre les crues dommageables dépend de celui du pertuis de fond. A volume d'ouvrage fixé, il faudra trouver un compromis entre écrêtement des petites crues -qui suppose un pertuis dimensionné pour intervenir dès les débits dommageables à l'aval- et écrêtement des crues rares ou plus fortes qui suppose au contraire de solliciter le volume de stockage avec parcimonie,

Nous allons parcourir ici quelques principes et étapes du dimensionnement. La première étape est d'exprimer explicitement les objectifs et indicateurs d'efficacité ; tout le dimensionnement, et la pertinence de ce dimensionnement, en découlent. Nous insisterons sur les bonnes échelles de travail, à savoir quel échantillon de scénario de crues, et quelle extension spatiale de l'évaluation des effets.

4.1 Indicateurs d'efficacité

La recommandation de base est de représenter l'aléa par plusieurs crues de projet, de périodes de retour différentes, pour raisonner sur le fonctionnement de l'ouvrage à l'échelle du régime hydrologique, et pouvoir comparer des solutions objectivement.

La figure ci-dessous illustre plusieurs échelles spatiales et plusieurs indicateurs d'efficacité d'un barrage écrêteur, dans le cas simple où l'objectif unique est la protection d'une zone à enjeu.



Effacité hydrologique (E_h) : gain sur le débit de pointe ;

- Soit au droit de l'ouvrage (E_{ham}), exemple en [A] de la figure
- Soit au droit des enjeux (E_{henj}), exemple en [Benj] de la figure

Effacité hydraulique (E_H) : gain sur la hauteur d'eau ou sur la surface inondée, au droit des enjeux. Exemple en [C] de la figure.

Effacité économique (E_E) : gain exprimés par les dommages évités, à comparer aux coûts du projet. Exemple en [D] de la figure.

L'indicateur le plus simple est l'efficacité hydrologique E_h , au droit d'un ouvrage, L'évolution des hydrogrammes permet de décrire le fonctionnement de l'ouvrage, pour une gamme d'hydrogrammes qui doit comprendre les premières crues modifiées, les crues pour lesquelles l'ouvrage fonctionnera au mieux, mais aussi au moins une crue provoquant une surverse. Cependant, il peut exister entre l'ouvrage et les enjeux des apports latéraux, des affluents aval et des modifications de la géométrie du cours d'eau déformant les hydrogrammes. Il faut donc router ces hydrogrammes dans le tronçon de rivière, jusqu'aux enjeux (domaine B), pour vraiment décrire les modifications locales de l'aléa induites par l'ouvrage. Les résultats de ce calcul hydraulique peuvent donner l'efficacité hydrologique aux enjeux (E_{henj} , sous forme d'hydrogrammes au droit des enjeux) et/ou l'efficacité hydraulique (E_H), avec éventuellement une cartographie de l'inondation résultante. Cela nécessite une modélisation hydraulique sur le domaine comprenant au moins les ouvrages et les enjeux. De plus, pour obtenir des résultats précis en termes de hauteur d'eau, voire de vitesse, au droit des enjeux, la modélisation doit rendre compte correctement d'écoulements souvent complexes : écoulements en plaine d'inondation, en zone urbaine (écoulements contraints par les rues, présence de carrefours, interactions avec les réseaux d'assainissement).

Ces indicateurs sont intéressants, mais insuffisant pour comparer des solutions techniques ayant des effets différents selon les crues, et/ou pour les différents enjeux. Le graphe D présente le principe de calcul de l'efficacité économique (E_E). Elle repose sur la quantification de la réduction des dommages, à l'échelle du domaine d'étude, et à l'échelle du régime hydrologique. En effet, les Dommages Moyens Annualisés sont calculés à partir de plusieurs évaluations de dommages dont on suppose que la fréquence est assimilable à la fréquence de l'hydrogramme de crue ayant servi à les calculer (voir par exemple Bailly, 2010 ; CGDD, 2014). Ces dommages sont estimés en utilisant des courbes d'endommagement établies ou validées sur le bassin versant, qui lient les dommages aux variables hydrauliques (hauteur, durée de submersion). Il faut travailler avec suffisamment de périodes de retour pour bien caractériser la courbe des dommages en fonction de la fréquence, et calculer les dommages évités sur tous les enjeux impactés. L'analyse coût-bénéfice compare ensuite le bénéfice, à savoir les Dommages Evités Moyens Annualisés (obtenus par différence entre les Dommages Moyens Annualisés avec et sans ouvrage), avec le coût du projet (investissement et entretien).

L'efficacité hydrologique amont (E_{ham}) est facile à calculer mais réductrice, tandis que l'efficacité économique (E_E) permet une mesure objective et quantifiée de la réduction du risque (Dommages Evités Moyens Annualisés), à comparer aux coûts du projet, mais au prix d'une modélisation complexe et sur un domaine étendu. Des publications ciblées sur ce sujet offrent des éléments de réflexion très intéressants sur les courbes d'endommagement et les précautions à prendre, sur le nombre de périodes de retour à considérer pour évaluer correctement les DMA -on pourra être surpris de l'impact des « petites crues » dans les

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

dommages totaux, individuellement faibles mais récurrentes- (Ward, 2011), en prenant soin de ne pas rater les effets de seuil (cas typique : enjeux protégés par une digue).

Lorsqu'ils sont calculés, les DEMA ne sont qu'un élément de décision. La mesure de l'efficacité de la protection doit considérer d'autres facteurs, notamment les risques pour la vie humaine. Ainsi, même si on intègre dans le calcul économique le dommage incrémental lié à une rupture d'ouvrage, l'annualisation pondèrera ce dommage par la fréquence de rupture : il n'est pas certain que le DEMA en soit toujours fortement majoré, par contre une probabilité, même faible, de pertes humaines liées à une rupture soudaine sera un élément fort, à prendre en compte lors de la prise de décision. On notera aussi que supprimer les petites crues en priorité est souvent efficace pour réduire les DMA, mais en gommant les petites crues on mine la culture du risque ; de plus, la réduction des aléas extrêmes, plus complexe, est peut-être moins intéressante en termes de DMA mais elle permet d'atténuer des situations de crise aiguë, alors que les petites crues, même dommageables, restent facilement gérables (Merz, 2009).

Enfin, d'autres objectifs et contraintes interviennent dans la définition des projets. Notamment (mais la liste n'est pas exhaustive) :

- Les effets hydrauliques sur le reste du tronçon, en dehors de la zone des enjeux principaux (un projet local peut contribuer à atténuer les crues plus en aval, mais l'idéal est de coordonner l'ensemble des projets),
- L'acceptabilité sociale, avec notamment l'équilibre entre communes (qui bénéficie du projet, qui supporte les contraintes) et avec une approche transparente des risques avec et sans projet,
- Le domaine impacté par les modifications sédimentaires, environnementales...

L'indicateur final est donc économique, et de plus en plus intégré à une analyse multicritères. Cependant, une étude des indicateurs intermédiaires (hydrologique, hydraulique) est toujours nécessaire, car ils conditionnent l'efficacité économique. Les sections qui suivent portent sur l'efficacité hydrologique, et les moyens de l'optimiser.

4.2 Efficacité hydrologique d'un barrage proche des enjeux

Nous illustrons ici quelques principes de dimensionnement sur l'exemple le plus simple: un barrage écrêteur unique, situé à proximité immédiate des enjeux (Ehenj = Eham), et soulignons les conséquences des choix de dimensionnement sur la fréquence des surverses.

Les crues sont simplement caractérisées ici par une série de deux hydrogrammes triangulaires, construits pour 6 périodes de retour de 2 à 1 000 ans :

- Une série de crues plutôt courtes (temps de montée 3h, volume centennal 3 Mm^3) ;
- Une série de crues plutôt longues (temps de montée 9h, volume centennal 9 Mm^3).

Le barrage, de hauteur 20 m sous la cote de protection, est équipé d'un pertuis de fond, et d'un évacuateur de surface. Sa retenue contient 2 Mm^3 sous la cote de protection (cote du déversoir au sens du guide [CFBR, 2013]).

Nous testons deux largeurs de pertuis :

- un pertuis suffisamment large pour être transparent hydrauliquement pour la crue de 2 ans (ce qui peut être un critère demandé pour limiter les perturbations des équilibres sédimentaires, cf. §5) ;
- un pertuis plus étroit, pour augmenter l'efficacité hydrologique.

Les graphes ci-dessous présentent les hydrogrammes calculés avec et sans ouvrage, pour un pertuis large. L'efficacité est très faible pour les crues moyennes ($T=10$ ans), modeste pour les crues rares ($T=100$ ans) et bonne pour la crue millénaire courte. Le pertuis large est une bonne solution d'écrêtement des crues très rares, car le débit de sortie plus important ralentit le remplissage de la retenue, donc retarde le moment de la surverse, après laquelle l'efficacité décroît. Mais il est peu efficace pour les crues moyennes à rares.

Des crues de même débit de pointe, mais plus longues, et donc plus volumiques, mettent à mal l'efficacité de l'ouvrage : la capacité de la retenue est trop petite pour les volumes de ces crues.

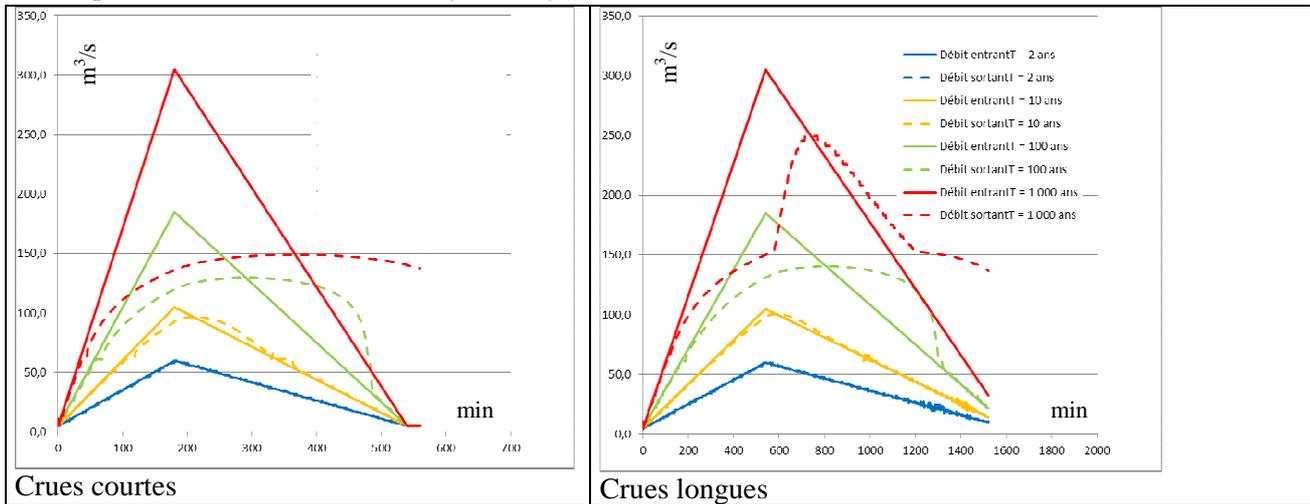


Figure 10 : Simulation d'écroulement des crues pour le barrage à pertuis large ; crues courtes et crues longues

Il y a deux pistes pour améliorer l'efficacité pour les crues courantes :

- un pertuis plus étroit, qui se met plus rapidement en charge,
- un pertuis large vanné, que l'on fermerait partiellement au-delà de la crue de 2 ans.

L'efficacité hydrologique, mesurée par le gain sur le débit de pointe, est illustrée ci-dessous pour ces différentes configurations : figure de gauche avec les deux options de pertuis (large, étroit) ; figure de droite avec le pertuis vanné.

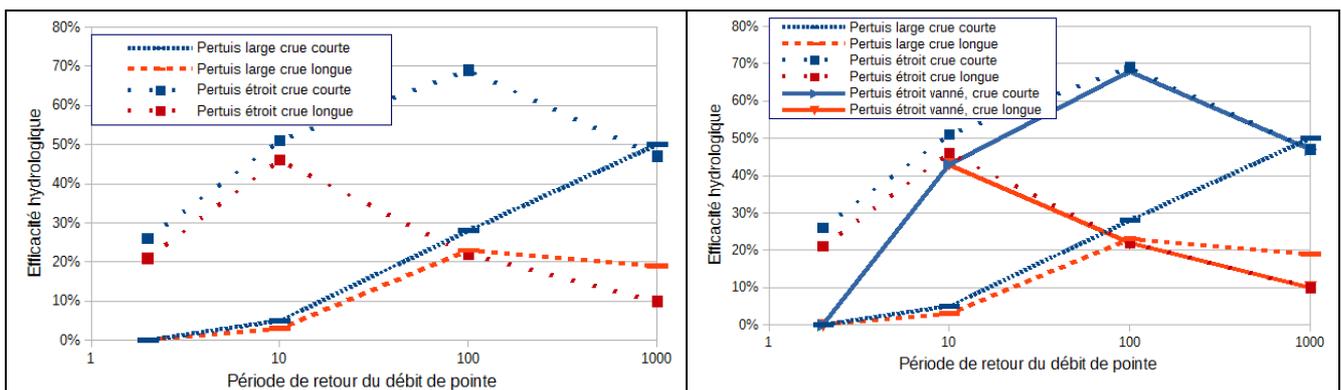


Figure 11 : Efficacité hydrologique de l'écroulement selon le choix du pertuis

Ces calculs appellent les conclusions suivantes : (1) le facteur essentiel de l'efficacité hydrologique est le volume de stockage disponible, à comparer au volume des crues ; (2) les pertuis larges non vannés, parfois nécessaires pour la continuité sédimentaire, dégradent fortement l'efficacité pour les crues courantes à rares ; a contrario ils diminuent la probabilité d'occurrence de surverses (3) à volume de retenue fixé, un système vanné conduit à une efficacité hydrologique théorique bien meilleure qu'un système non vanné.

A travers cet exemple simple, on a donc évoqué les contraintes environnementales et sédimentaires (transparence hydraulique pour les débits courants et les petites crues), l'objectif de maximisation des DEMA (qui détermine la gamme de crue à atténuer en priorité), et la recherche de sûreté des ouvrages (pour laquelle on préfère limiter la probabilité de surverse, voire la hauteur des ouvrages). Avec un fonctionnement passif, il est très compliqué de concilier l'ensemble : des systèmes de vannages peuvent améliorer les résultats. Ces systèmes ont d'autres avantages et inconvénients (cf. §4.5).

4.3 Efficacité hydrologique (*Ehenj*) d'un barrage loin des enjeux : synchronisation d'arrivée de pics de crue

Lorsque les ouvrages se trouvent à distance des enjeux, il faut en plus tenir compte des temps d'arrivée respectifs des différentes contributions. Cette horloge des crues peut être décrite en moyenne mais comporte une forte composante aléatoire. Pour illustrer cette difficulté, on repart de l'ouvrage étudié précédemment, mais cette fois on considère que les enjeux sont situés à l'aval d'une confluence entre le tronçon qui porte

l'ouvrage et un autre cours d'eau. Les deux sous-bassins sont de même superficie, mais on va considérer plusieurs hypothèses de décalage temporel entre l'arrivée de chacun des 2 pics de débit.

L'hydrogramme ci-dessous correspond au cas de la crue longue, en considérant un déphasage de 3h entre les crues des deux sous-bassins, le barrage étant placé sur le bassin « en avance » (schéma de gauche) ou « en retard » (schéma de droite).

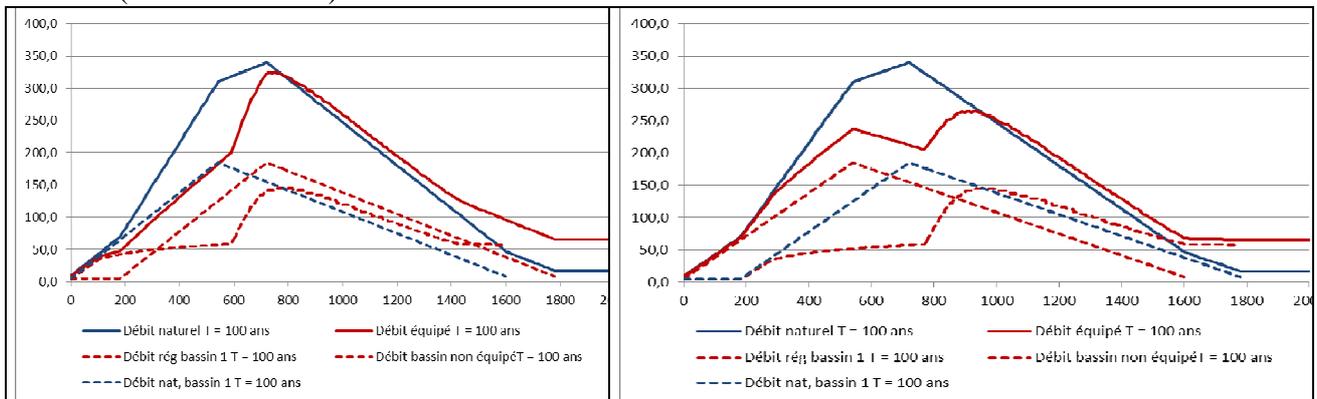


Figure 12 : Illustration des effets de la concomitance dans le cas d'un barrage écrêteur « loin des enjeux »

Un barrage qui retarderait l'arrivée d'un pic naturellement « en avance » sur d'autres contributions peut avoir un effet (Ehenj) limité voire négatif, même s'il réduit le débit de pointe (Eham).

On va donc chercher à équiper les affluents « plutôt en retard », mais cela ne garantit pas des synchronisations malencontreuses pour des épisodes de pluie qui, touchant d'abord le sous bassin habituellement « en retard », génèreraient des séquençements d'arrivée des pics dérogeant à l'horloge des crues attendue.

4.4 Fonctionnement d'un système de plusieurs ouvrages.

Dans les cas où il est pertinent d'envisager l'implantation de plusieurs ouvrages (enjeux dispersés sur le bassin), il faut estimer leur effet combiné (cas « C » de la figure 9). L'exemple précédent, avec une retenue que l'on peut placer sur un affluent ou un autre, montre déjà l'importance de prendre en compte les cinétiques des affluents. Mais une autre difficulté apparaît : une crue de période de retour Taval au droit des enjeux peut être produite par une infinité de combinaisons des crues de périodes de retour T1 et T2 en amont.

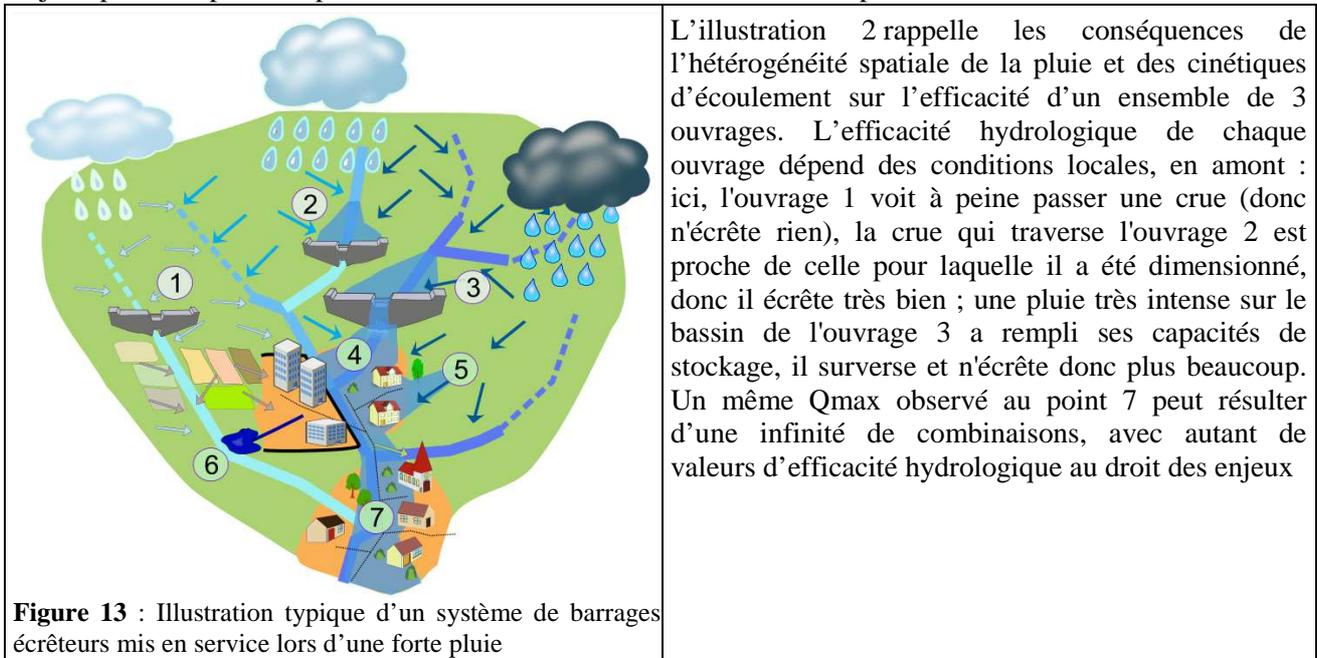


Figure 13 : Illustration typique d'un système de barrages écrêteurs mis en service lors d'une forte pluie

L'illustration 2 rappelle les conséquences de l'hétérogénéité spatiale de la pluie et des cinétiques d'écoulement sur l'efficacité d'un ensemble de 3 ouvrages. L'efficacité hydrologique de chaque ouvrage dépend des conditions locales, en amont : ici, l'ouvrage 1 voit à peine passer une crue (donc n'écrête rien), la crue qui traverse l'ouvrage 2 est proche de celle pour laquelle il a été dimensionné, donc il écrête très bien ; une pluie très intense sur le bassin de l'ouvrage 3 a rempli ses capacités de stockage, il surverse et n'écrête donc plus beaucoup. Un même Q_{max} observé au point 7 peut résulter d'une infinité de combinaisons, avec autant de valeurs d'efficacité hydrologique au droit des enjeux

Des travaux de recherche sont en cours sur le développement de méthodes adaptées au diagnostic d'ouvrages à l'échelle du bassin versant et du régime de crues (approche « DAGOBER », Poulard et al., soumis à SET). Les champs de pluie spatialisés fournissent des scénarios d'apport à l'échelle du bassin versant, et la simulation continue conserve la variabilité des crues, en débit de pointe, en durée et en volume. Cela

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

permettra de mieux caractériser l'aléa et les dommages moyens annualisés, et de comparer l'effet sur ces variables des scénarios d'aménagement, en prenant enfin en compte toute la variabilité des pluies.

4.5 L'organe physique de l'efficacité : le pertuis

L'efficacité hydrologique d'un barrage écrêteur dépend essentiellement du pertuis, mais également de l'évacuateur lorsque l'on cherche à agir sur les dommages liés aux crues de très faible probabilité. Les dimensions du pertuis ne dépendent pas uniquement des considérations d'efficacité hydrologique, mais aussi de considérations environnementales. Il est possible de concilier les deux enjeux (environnement, efficacité) en acceptant de recourir à une solution de pertuis vanné.

Les vannes ont des inconvénients, et les Maîtres d'Ouvrages sont souvent réticents à l'idée de les utiliser. Trois inconvénients sont cités :

- le risque de non disponibilité en crue : la vanne ne se ferme pas comme prévu,
- le risque d'ouverture intempestive pendant la crue, conduisant à une augmentation excessive des débits aval,
- le risque d'impossibilité de réouverture en fin de crue,
- et enfin le risque de manœuvre inappropriée, mettant en cause la responsabilité de l'exploitant.

Cependant, ces inconvénients peuvent être maîtrisés. En effet, :

- la non disponibilité en crue ne génère pas de risque nouveau par rapport à la situation « sans barrage » ; simplement, l'efficacité de l'écrêtement n'est pas aussi bonne qu'elle le serait avec une vanne opérationnelle,
- l'ouverture intempestive peut se produire sur une vanne automatique par un défaut dans la chaîne de contrôle-commande ; elle peut être fortement minimisée avec des systèmes rustiques en redondance, qui limitent les possibilités d'ouverture (par exemple : impossible de rouvrir tant que la cote est haute,)
- en cas d'impossibilité de réouverture en fin de crue, on perd en partie la capacité de chasse des sédiments et on augmente le temps nécessaire pour restaurer la pleine capacité de laminage. Ces deux inconvénients restent modérés,
- le risque d'erreur humaine peut être prévenu par des consignes claires (y/c le fait de ne pas laisser un opérateur seul en situation de crue), par la formation des opérateurs et par des exercices périodiques. Les erreurs humaines sur les vannes d'un pertuis de barrage écrêteur sont par ailleurs moins dangereuses que les erreurs sur les manipulations des vannes d'un évacuateur de surface. En particulier, elles ne mettent pas en danger le barrage.

Les systèmes de vannages peuvent être conçus avec différents niveaux de complexité de gestion. Plus la gestion est complexe, meilleure est l'efficacité théorique, mais plus grands sont les risques d'incidents d'exploitation. Par ordre croissant de complexité :

- aucune vanne,
- le batardeau saisonnier : mis en œuvre à demeure, à retenue vide, en période de fort risque crue,
- la vanne que l'on peut fermer avant ou pendant la crue, mais qui ne peut pas être réouverte avant la fin de la crue. Cette vanne ne gère que deux positions : « pertuis large » et « pertuis étroit », avec un dispositif de fermeture automatique lorsque la cote dépasse un seuil fixé,
- la vanne de réglage automatisée, asservie à la cote de retenue, par exemple par flotteur,
- la vanne de réglage automatisée, asservie à divers paramètres (cote, débits amont, débits aval),
- la vanne gérée par télé-conduite afin de prendre en compte les apports des tributaires.

Il faut adapter le niveau de complexité aux enjeux aval et à la capacité de l'exploitant à gérer des situations plus ou moins complexes. La cinétique des crues est à cet égard un point important à appréhender dès la conception de l'ouvrage. Les systèmes de vannage ont un avantage complémentaire : ils permettent une mise en eau contrôlée.

5. INCIDENCES ENVIRONNEMENTALES ET SOCIALES

Les barrages écrêteurs sont donc conçus pour réduire les conséquences des inondations, que ce soit un objectif unique, principal ou secondaire. Cette communication traite essentiellement des critères

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

hydrologiques et économiques, mais la construction d'un ouvrage aura d'autres conséquences induites, et la réflexion doit à présent être menée dans un cadre multiobjectif (GEMAPI) et multiacteurs.

Passer d'une Analyse « Coût-Bénéfice » à une Analyse « Multicritère » est une étape supplémentaire qui peut se révéler très complexe : il faut intégrer des critères de nature différente, et définir des règles de priorisation alors que chaque acteur a ses propres priorités. Nous traiterons ici, brièvement, des conséquences concrètes à attendre pour le dimensionnement hydrologique des ouvrages

5.1 Pertuis : « transparence hydraulique » mais impacts environnementaux

Les caractéristiques du pertuis déterminent son fonctionnement hydraulique, mais ont aussi des conséquences sur les équilibres sédimentaires et les écosystèmes. La « suppression » des petites crues et la modération des crues plus importantes peut avoir des conséquences bénéfiques sur les écosystèmes (moins d'épisodes violents, susceptibles de mettre à l'épreuve les écosystèmes et d'abîmer les berges) et/ou dommageables (moins de reconnections des annexes hydrauliques).

L'artificialisation du lit mineur reste nécessaire à l'amont et au droit du pertuis, et les changements de géométrie (largeur, pente longitudinale...) peuvent induire des modifications des vitesses locales même hors crue. On se rapportera aux conseils habituels pour assurer la franchissabilité par les poissons, notamment en évitant les seuils.

Selon les contextes, il peut exister d'autres conséquences négatives des barrages moins intuitives, à identifier par des études locales : obstacle à la circulation d'animaux terrestres, perturbations des écoulements souterrains par les fondations, modifications des « débits solides » suite à celles des « débits liquides », avec des modifications de la géomorphologie y compris très à l'aval du barrage et sur le long terme... Les mises en eau des cuvettes peuvent être dommageables aux écosystèmes terrestres et/ou aux activités humaines à cause de la submersion des terrains ou du dépôt de sédiments (photo).



Figure 14 : Barrage à pertuis ouvert de Myslakowice (PL) : à gauche : vue du parement amont ; à droite, photo prise du même point en regardant vers l'amont : sédiments grossiers résiduels dans la cuvette. La comparaison entre le pertuis et les dimensions du lit montre que l'on se trouve en situation de « pertuis étroit ».

5.2 Conserver la mémoire des crues

« Effacer » les petites et moyennes crues du paysage les efface aussi de la mémoire collective, faisant disparaître les « bons réflexes » de prévention (dispositions constructives, précautions d'usage des rez-de-chaussée inondables...) et de comportement en situation d'alerte et de survenue de crue.

Même si l'effet est moins marqué que pour les digues de protection, qui suppriment complètement toute crue en deçà du seuil de surverse, ce paramètre est à considérer. En particulier, il est important d'assurer une certaine progressivité entre les crues sans surverse et les crues avec surverse (exemple de la crue millénaire longue de la figure 10 : le gradient de montée de la crue pourra surprendre à l'aval).

Des solutions existent. Les barrages échancrés, munis d'ouvertures en meurtrière, offrent une alternative avec une augmentation progressive du débit de sortie ; par contre, il est plus difficile de « viser » une plage d'efficacité hydrologique « optimale » comme avec un pertuis. Des solutions intermédiaires peuvent donc être imaginées, avec des pertuis superposés (« en flûte de Pan ») ou des déversoirs étagés

5.3. Acceptabilité

A priori, un projet d'ouvrages écrêteurs répond à un besoin des habitants du bassin versant. Pourtant, l'expérience montre qu'il peut exister une réelle opposition, surtout sur les communes au droit et en amont immédiat des ouvrages, ne bénéficiant pas du laminage mais supportant les conséquences négatives du chantier et de la sur-inondation en amont

L'exposé des raisons du projet, la présentation du fonctionnement des ouvrages et leur justification du point de vue financier sont des éléments demandés par les financeurs (programme PAPI notamment), mais qui intéressent aussi les riverains. Le maître d'ouvrage doit trouver un équilibre entre tous les objectifs exprimés : le besoin de réduction du risque, les écosystèmes, la qualité de vie, l'équité entre les riverains de l'amont et de l'aval, la crainte des conséquences d'une rupture. Plus les revendications sont exprimées et recueillies tôt, mieux elles pourront être intégrées.

6. SYNTHÈSE ET PISTES POUR LE FUTUR

Les barrages écrêteurs de crue posent des questions spécifiques de sûreté, à deux titres : sûreté de l'ouvrage lui-même et sécurité de la protection qu'il fournit à l'aval. La présente communication traite des barrages dont la fonction unique (ou quasi-unique) est l'écrêtement des crues ; barrages à retenue habituellement sèche ou maintenue très basse.

Habituellement, les barrages écrêteurs sont techniquement conçus et construits comme des barrages à retenue permanente. Ils sont souvent équipés de deux organes de gestion des crues : un pertuis de fond généralement non vanné et un évacuateur de surface unique. Leur efficacité est généralement mesurée par leur capacité à écrêter (diminuer les débits de pointe) pour telle ou telle crue de référence.

Les particularités de ce type d'ouvrage, exposées dans cette communication, nous amènent à suggérer quelques évolutions de leur conception. Compte-tenu de la grande variété des barrages écrêteurs, nous ne pensons pas que ces suggestions sont applicables uniformément à tous les cas. Elles s'adressent plutôt aux ouvrages de classe A à C.

Sûreté du barrage

Pour l'évaluation de la sûreté d'un barrage écrêteur en crue extrême, l'effet du laminage doit être considéré avec précaution. On limite beaucoup le risque de se faire surprendre par des crues plus fortes que prévu en recourant à des solutions d'évacuateurs « robustes » - robuste signifiant ici « peu sensible aux incertitudes hydrologiques ». Un évacuateur robuste est un évacuateur de forte capacité sous faible lame déversante. Ce type d'évacuateur a, pour les barrages écrêteurs, un effet potentiellement néfaste : lorsqu'il se met en service, le gradient aval d'augmentation des débits peut être très fort. Pour pallier ce problème, un seuil déversant à deux niveaux permet de concilier robustesse et progressivité des gradients de débits relâchés.

Outre la sûreté en crue, le principal inconvénient des barrages écrêteurs est l'absence de première mise en eau contrôlée. La pratique consistant à mettre en œuvre une vanne batardeau pour pouvoir réaliser cette opération nous paraît devoir être encouragée. Lorsque cela n'est pas envisagé (ou envisageable), la conception et la construction doivent s'attacher à éviter les défauts dangereux ; notamment défauts de traitement des fondations et défauts à l'interface entre les remblais et les ouvrages traversants. L'accidentologie des barrages en remblais et des barrages en béton tend à montrer que, sauf difficulté géologique particulière, un contrôle exhaustif de la conception et une surveillance spécifique des travaux peuvent fournir un niveau confiance aussi bon qu'une épreuve de première mise en eau. Cela nécessite de mettre en œuvre des moyens de contrôle et de surveillance qui vont au-delà des spécifications habituelles des marchés d'ingénierie et de travaux au sens de la loi MOP.

Sécurité de la protection à l'aval

La communication montre que l'efficacité de l'écrêtement ne se résume pas à la diminution du débit de pointe à l'aval immédiat du barrage.

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

Pour évaluer l'opportunité d'un barrage écrêteur et pour en concevoir les organes hydrauliques, il est nécessaire d'utiliser des raisonnements qui couvrent les différents indicateurs d'efficacité (hydrologique au barrage, hydrologique au droit des enjeux, hydraulique au droit des enjeux, économique) et d'analyser l'ensemble des impacts à l'échelle du bassin versant, jusqu'à une confluence au-delà de laquelle les impacts de l'aménagement pourront être considérés comme négligeables. L'approche sera graduée en fonction de l'importance de l'aménagement et des enjeux concernés.

Dans tous les cas, un gain en efficacité, souvent substantiel, est attendu lorsque l'on accepte d'équiper les pertuis avec des vannes. Cela permet, même avec un système rustique sans intervention humaine, d'avoir à la fois un pertuis large qui permet le transit sédimentaire et une bonne efficacité dès les crues moyennes et rares. Cela peut permettre également, au prix de dispositifs plus sophistiqués, une gestion dynamique des crues, utile pour gérer au mieux l'horloge des crues. Ce dernier cas, a priori mieux adapté aux bassins versants à réaction lente, exige un haut niveau de technicité et d'organisation de l'exploitant.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le BETCGB pour l'exploitation des données de la base SIOUH, qui a permis de présenter les chiffres du § 2.1.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Huet, P., Martin, X., Meunier, M., Pierron, P. (2002). Inspection suite aux désordres et à la rupture des bassins de rétention de la "Savoureuse", Mission conjointe d'inspection de l'inspection générale de l'environnement, des conseils généraux du génie rural, des eaux et des forêts et des ponts et chaussées.
- [2] Fouchier, C., Lavabre, J., Royet, P., Félix, H. (2004). Inondations de septembre 2002 dans le Sud de la France : analyse hydrologique et hydraulique au niveau des barrages écrêteurs du Vidourle, *Ingénieries EAT*, n°37: 23-35.
- [3] Ghavasieh, A. R., Poulard, C. & Paquier, A. (2006). Effect of roughened strips on flood propagation: Assessment on representative virtual cases and validation. *Journal of Hydrology* **318**(1-4): 121-137.
- [4] Meaney, C., Bakeman, M., Reed-Eckert, M. & Wostl, E. (2007) Effectiveness of ledges in culverts for small mammal passage. Colorado department of transportation research branch, Report No. CDOT-2007-9, Final Report, 46 p.
- [5] Sumi, T. (2008). Designing and Operating of Flood Retention Dry Dams in Japan and USA, *Proc. Of ICHE Conference on Hydro-Science and Engineering*, Nagoya, Japan, 10p.
- [6] Merz, B., et al. (2009). "Significance of "high probability/low damage" versus "low probability/high damage" flood events." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **9**(3): 1033-1046.
- [7] Poulard, C., Royet, P., Ratowski, J. & Lenar Matyas, A. (2009). Retours d'expériences de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours. *Ingénieries EAT*, N° Spécial La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues: 33-54.
- [8] Schmitt, L., et al. (2009). "Le « Polder » d'Erstein: objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental (Rhin, France)." *Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires No Spécial*: 67-84.
- [9] Bailly, J. S., et al. (2010). Analyse de sensibilité spatiale de l'outil ACB. *Plan Rhône - Séminaire ACB*. http://www.planrhone.fr/data/Files/Inondations/3_Donnees_et_methodes/methode/1_Analyse_cout_benefice/n2_presentation_CEMAGREF.pdf
- [10] Deroo L. (2010). Crues, évacuateurs et probabilités de défaillance, *La Houille Blanche*, n° 2, Mai 2010

Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016

- [11] Poulard, C., Lafont, M. Lenar Matyas, A. & Lapusezk, M. (2010). Flood mitigation designs with respect to river ecosystem functions. A problem oriented conceptual approach. *Ecological Engineering* **36**(1): 69-77.
- [12] Kantoush, S., Sumi, T. & Meshkati, M. (2011). Eco-friendly Hydraulic Design of In-stream Flood Mitigation Dams , *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 54 B, 2011735-745.
- [13] Ward, P. J., et al. (2011). "How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods?" *Natural Hazards and Earth System Science* **11**(12): 3181-3195.
- [14] CFBR (2013). *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages*, juin 2013, 166p.
- [15] Kanmuri M., Morita H., Takezawa H., Aoyama T., Miura H. (2013). Flood control for typhoon 18 at the yodo river system in 2013 - avoidance of catastrophe through coordinated operation of 7 dams, Q96R22, Congrès ICOLD Stavanger.
- [16] Oshikawa, H. & Komatsu, T. (2013) Flood Control Capability of Dry Dams Constructed in Series. *Proceedings of 2013 IAHR World Congress*, 9p.
- [17] Poulard, C., Breil, P & Lafont, M. (2013). Gérer les crues et les inondations. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques ; pourquoi ? comment ? B. Chocat. Paris, ASTEE: 68-83.
- [18] CGDD (2014). Analyse multicritères des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique: 86. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref_-_Guide_AMC_inondations.pdf
- [19] Massarutto, A. and A. De Carli (2014). "Two birds with one stone: Improving ecological quality and flood protection through river restoration in Northern Italy." *Economics and Policy of Energy and the Environment*(1): 93-121.
- [20] Richard-Ferroudji, A. (2014). Rare birds for fuzzy jobs: A new type of water professional at the watershed scale in France. *Journal of Hydrology* 519, Part C(0): 2468-2474.
- [21] Fouchier, C, Mériaux, P., Pla, G, Nuel, J-L., Retailleau, E., Royet, P. (2016). Lessons from 2014 autumn flash floods in Nîmes (France): behavior of several mitigation dams and hydrological analysis, FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management, Lyon