

Les déversoirs fusibles le sont-ils vraiment ?

Are fuse weirs so fusible ?

Paul ROYET, Patrice MERIAUX

Cemagref - Unité de recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie »

BP 31, 13612 Aix en Provence Cedex 1

Tél. 04 42 66 99 42

Fax 04 42 66 88 65

E.mail : paul.royet@cemagref.fr patrice.meriaux@cemagref.fr

Résumé

Les déversoirs (appelés parfois déchargeoirs) sont des éléments de sécurité indispensables pour éviter la rupture par surverse des digues en cas de crue dépassant l'événement de référence. Une solution tentante pour améliorer l'efficacité hydraulique d'un déversoir tout en limitant sa longueur est d'aménager un merlon érodable en crête du seuil déversant. La question est alors : le fusible va-t-il partir comme prévu ?

Cette communication propose des réflexions sur ce type d'aménagement, sur la base d'une étude de cas relative à un aménagement ancien et sur la base d'observations fines faites lors de la crue de décembre 2003 sur un aménagement récent.

Des solutions alternatives sont décrites.

Abstract

Discharge weirs are essential safety elements to avoid breaches by overtopping of the dykes, in case of a flood exceeding the reference event. Building an earth fill fuse over the weir is a tempting solution to increase the hydraulic efficiency of a spillway while limiting its length. Then the question is: will the fuse behave as expected?

This paper proposes a discussion about this kind of fuse equipment, based on the assessment of an old works and on the observation of a more recent one during the December 2003 flood.

Alternative solutions are described.

Mots-clés : digues fluviales, déversoirs fusibles, merlons érodables

Keywords: dykes for flood protection, fuse weirs, erodable fill

Introduction

Les digues fluviales sont en général dimensionnées pour protéger les plaines inondables (ou vals) contre des crues courantes à rares, jusqu'à une occurrence de l'ordre de 10^{-2} . Le cas des crues exceptionnelles doit cependant impérativement être envisagé : on admet alors une inondation de la plaine, mais on cherche à se prémunir de ruptures inopinées et brutales de la digue, par surverse.

La meilleure solution pour ce faire est d'aménager un ou plusieurs déversoirs qui vont causer l'inondation lente de la plaine dès que le niveau de la rivière dépassera la cote du seuil, tout en abaissant la ligne d'eau de la rivière en aval. Ces déversoirs sont implantés en des points au droit desquels les enjeux dans la plaine sont faibles.

L'objectif d'abaissement significatif de la ligne d'eau de la rivière en aval du déversoir exige de dériver un débit important, ce qui s'obtient à la fois par la grande longueur du déversoir, mais aussi par la charge hydraulique sur le seuil (considérée, en première approche, comme la différence des cotes respectives du seuil du déversoir z_1 et de la crête de digue z_3 - figure 1). L'allongement du déversoir et le rehaussement de la digue se heurtent rapidement à des contraintes économiques, tandis que l'abaissement du seuil conduit à un niveau moindre de protection contre l'inondation du val.

Le moyen de résoudre ces contradictions est d'installer, sur le seuil du déversoir, une rehausse, fusible en cas de dépassement d'un certain niveau de crue. Ainsi, la plaine est protégée des inondations jusqu'à l'atteinte du niveau supérieur de la rehausse z_2 (figure 1) ; le déversoir se met en service de façon plus tardive, donc plus près de la pointe de la crue ; dès que la rehausse s'efface, le déversoir présente une grande capacité de dérivation du débit de la rivière et donc d'abaissement de la ligne d'eau en aval.

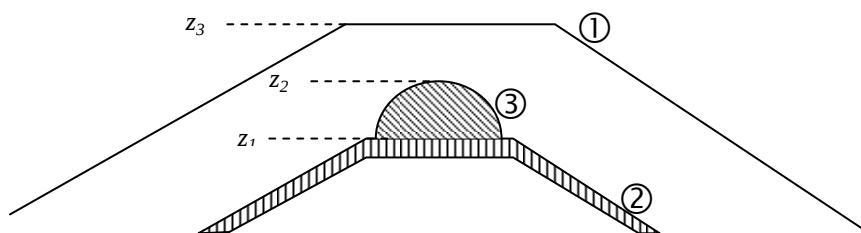


Figure 1 : coupe de principe d'un déversoir équipé d'un fusible
① Coupe de la digue en section courante
② Coupe du déversoir fixe
③ Dispositif fusible

Ce type de dispositif n'est pas nouveau. En effet, dès le 19^{ème} siècle, l'Ingénieur Comoy en a installé sur les « déchargeoirs » des digues de Loire, sous forme de merlons de terre sableuse, qui sont encore en place.

La question principale qui se pose cependant est celle de la réelle « fusibilité » de ces dispositifs. En effet, tout comportement différent de celui imaginé par leurs concepteurs conduit à un fonctionnement hydraulique qui peut rapidement évoluer vers des scénarios indésirables.

Nous tentons d'apporter des éléments de réponse à cette question, en se basant d'une part sur une étude diagnostic menée sur un des déversoirs de la Loire et, d'autre part, sur l'observation récente en crue du comportement d'un déversoir fusible dans la vallée du Rhône. Enfin, nous passons rapidement en revue quelques dispositifs alternatifs de conception récente qui visent une meilleure sécurité à l'effacement.

1. Le cas d'un déchargeoir ancien : Ouzouer-sur-Loire

1.1 Description de l'ouvrage

Le déchargeoir d'Ouzouer-sur-Loire (Loiret), a été construit à la fin du XIX^e siècle (vers 1883), en rive droite du fleuve. De 600 m de longueur, son profil type est composé de deux parties (cf. profil en travers d'archives de l'ouvrage – figure 2) :

- un perré qui recouvre le corps de la digue et se prolonge par un large radier sur le terrain naturel côté val ;
- un merlon fusible en remblai (dénommé aussi « banquette »), de 1 m de hauteur, qui vient en surélévation sur le côté amont du seuil ; côté fleuve, ce merlon est protégé par un perré identique à celui qui protège le talus amont de la digue en partie courante ; ce perré est lui-même recouvert d'une dizaine de centimètres de terre probablement issue des sédiments transportés pendant les crues.

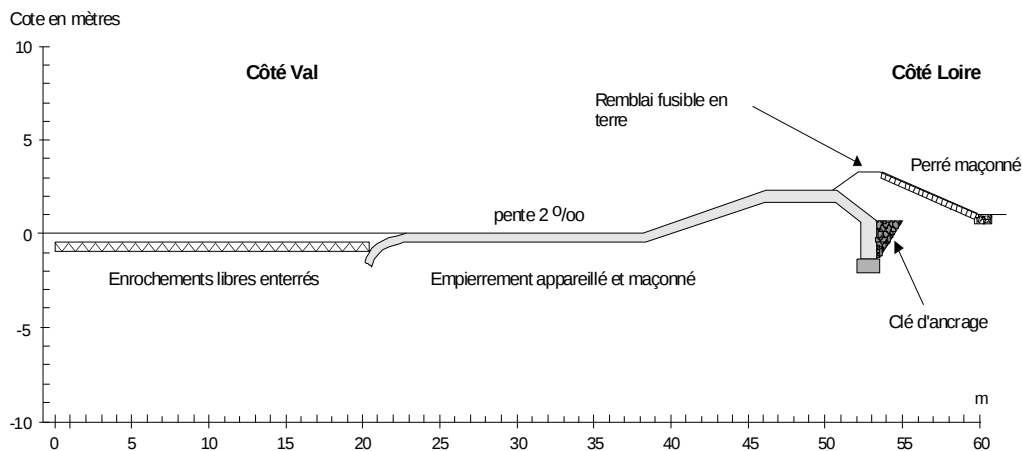


Figure 2 : coupe schématique du déchargeoir d'Ouzouer-sur-Loire

1.2 Investigations réalisées et résultats

Les investigations réalisées en 1998 par le Cemagref [1] avaient pour objectif de confirmer la géométrie de l'ouvrage et surtout d'évaluer sa résistance à la surverse. Elles ont comporté :

- des essais pénétrométriques au pénétromètre dynamique léger de type PANDA, exploités à faible pas d'enfoncement ; six profils ont été investigués, comportant chacun un essai en crête du merlon fusible et un essai sur le talus de ce merlon côté val ;
- des prélèvements de sols remaniés et intacts ;
- des mesures en laboratoire de la densité in situ, de la densité relative et de la granulométrie.

Les principaux résultats des essais pénétrométriques ont été les suivants :

- en crête de remblai fusible :

Les différents essais effectués montrent une zone plus consolidée sur la partie supérieure : on note une résistance à la pénétration dynamique de 5 à 10 MPa sur les 50 premiers centimètres ; ensuite, cette résistance fluctue entre 3 et 5 MPa. Les refus ont tous été constatés entre 2 et 2,5 mètres, confirmant la géométrie attendue du seuil fixe.

- sur le talus côté val :

Les différents essais montrent deux parties consolidées : une première sur les 20 premiers centimètres et une deuxième à 50 centimètres de profondeur avec une résistance pénétrométrique d'environ 7 Mpa ; le reste du profil a une résistance d'environ 4 MPa. Les refus ont été enregistrés aux environs de 1 m, conformément à la géométrie attendue du seuil fixe.

Les essais en laboratoire ont montré que le matériau du merlon était homogène, classé en limon sableux (environ 30 % de passant à 80 μ m). La densité sèche en place se situe à un peu moins de 90 % de celle à l'optimum Proctor normal (OPN).

Enfin, la couche externe du merlon est parcourue d'un dense tissu racinaire lié à la couverture herbacée régulière.

En résumé, les reconnaissances permettent de qualifier le remblai fusible comme relativement compact en surface ("croûte" plus résistante sur les premiers décimètres). Même dans la profondeur du merlon, la résistance à la pénétration dynamique reste significative (3 à 5 MPa) alors qu'il est courant d'observer, dans des remblais anciens de sol fin non compacté, des valeurs bien plus faibles (ex : souvent moins de 1 MPa dans les corps de digues limono-sableuses de fleuves côtiers méditerranéens, comme le Vidourle ou l'Aude).

1.3 Eléments bibliographiques

Quelques références bibliographiques traitent de la résistance à la surverse des remblais : [2], [3], [4].

Powledge & al. [2] décrivent des essais réalisés en laboratoire (essais sur modèles réduits à la centrifugeuse, mais surtout essais en vraie grandeur sur remblai de 1,8 m de hauteur). Ces essais ont permis de comparer différents modes de protection du talus (enherbement, matelas Reno, géosynthétiques, sol-ciment, etc...) et différents matériaux de remblai (sable argileux et argile sableuse). Les essais sur talus enherbé n'ont pas été totalement concluants, car la végétation n'était pas suffisamment bien développée et homogène au moment des essais. Cependant, ce type de protection s'est bien comporté pour des faibles hauteurs de surverse et les désordres se sont développés à partir de singularités du talus.

Par ailleurs, sont passés en revue plusieurs cas de surverse suffisamment bien documentés. Les auteurs indiquent, au vu de cas historiques, que des remblais en matériaux cohésifs protégés par un engazonnement bien entretenu peuvent supporter des surverses jusqu'à 60 cm, avec des vitesses atteignant 2 m/s sur le talus, voire des valeurs supérieures.

L'article conclut cependant que l'ensemble des données recueillies sur les protections végétales ne permet pas de prédire précisément la résistance d'un remblai donné, et préconise de procéder à des essais en vraie grandeur pour disposer de réponses quantitatives.

Partant du retour d'expérience sur les petits barrages anglais, anciens pour la plupart, Hugues [3] analyse les conditions pour une efficacité maximale de la protection de remblais par engazonnement, vis-à-vis du phénomène de surverse :

- un profil longitudinal de crête parfaitement horizontal et sans points singuliers susceptibles de concentrer les écoulements ;
- une hauteur faible de remblai, ne permettant pas au flot d'atteindre de grandes vitesses en partie basse ;
- une surface résistante en pied de pente, là où va avoir tendance à s'initier le phénomène d'érosion régressive (zone de turbulence) si le val n'est pas inondé ;
- une végétation constituée d'herbe dense et souple, d'égale hauteur, et très bien enracinée.

Enfin, les auteurs soulignent que la résistance à l'érosion est, a contrario, rapidement diminuée dès que la surverse est accompagnée d'écoulements internes au remblai dans des fissures, vides, conduits de racines pourries, etc...

Duijvenbode [4] indique tout d'abord les critères de dimensionnement des digues en Hollande, vis-à-vis de la surverse :

- une digue engazonnée est considérée résister à une surverse de 1 l/s/m, soit une charge de 0,7 cm ;
- une digue avec une couche de 60 cm d'argile en surface, avec un engazonnement de bonne qualité et une pente de talus inférieure à 1/2,5 est considérée résister à une surverse de 10 l/s/m, soit une charge de 3,5 cm.

Est ensuite décrite une campagne d'essais en vraie grandeur conduits sur cinq tronçons de 10 m d'une digue en sable recouverte d'une couche de terre végétale engazonnée. La surverse a été réalisée au débit de 2 l/s/m au moyen d'un tuyau percé de trous. Lors de tous les essais, une fissure longitudinale est

rapidement apparue (moins de 10 min) au droit de la ligne d'arrosage. Une part du débit a pénétré dans la digue à travers cette fissure, entraînant une saturation progressive du corps aval de la digue.

Au bout d'une demi-heure, la crête de digue, près de la fissure, commence à s'affaisser. Des déformations en pied de digue sont nettement visibles au bout d'une à deux heures. Parallèlement, les écoulements de surface ont causé des rigoles d'érosion partant de la fissure longitudinale de crête. Le principal mécanisme en cause reste cependant l'écoulement interne au corps de digue, plus que l'érosion due à la surverse.

1.4 Conclusion sur le caractère fusible du merlon d'Ouzouer

A l'évidence, le merlon fusible du déversoir d'Ouzouer remplit toutes les conditions pour présenter une résistance optimale à la surverse d'après Hugues [3] :

- le profil de crête apparaît tout à fait horizontal et les seuls points singuliers sont constitués par deux ouvrages maçonnés qui sectionnent la longueur du seuil ;
- la hauteur du merlon est de seulement 1 m et les vitesses de l'eau resteront peu élevées en pied ; de plus, l'énergie de l'eau côté aval sera amortie en grande partie sur le seuil fixe en maçonnerie ;
- le matériau de remblai contient 30 % de fines, a une compacité de 90 % de l'OPN et présente une cohésion naturelle renforcée encore par le réseau de racines qui constitue une armature de surface ;
- la végétation est parfaitement bien entretenue et maintenue à un stade herbacé régulier.

Enfin, la présence du perré côté amont du merlon limitera les écoulements internes au remblai, ce qui diminue le risque lié à la conjonction des phénomènes de surverse et d'infiltration, bien mise en évidence par Duijvenbode [4].

Il y a donc tout lieu de penser que le merlon ne s'effacera pas dès le début de la surverse et qu'il pourrait résister, au moins pour un temps, à une lame d'eau plus que décimétrique. Le programme d'essais en vraie grandeur, qui avait été proposé pour mieux répondre à la double question de la durée et de la hauteur de la surverse, reste d'actualité.

2. Le cas d'un aménagement récent : déversoir de Comps

2.1 Description des ouvrages

Le « déversoir de Comps » (département du Gard) est implanté sur une digue rive droite du Rhône incluse dans l'aménagement de l'usine hydroélectrique de Beaucaire.

Cette digue en remblai, remontant la rive droite du Gardon à partir de sa confluence avec le Rhône, a été construite par la CNR dans les années 1970 pour

défendre la plaine agricole des Baisses. Sa crête est calée à la cote 16 NGF.

A son extrémité amont, la digue CNR vient se raccorder à la digue de ceinture qui protège le village de Comps des crues du Gardon et du remous du Rhône (figure 3). La « digue de Comps » est de type mur-poids en maçonnerie. Elle a été édifiée en 1925 et comporte trois tronçons : un tronçon principal qui longe le Gardon sur environ 600 m, avec une cote de crête décroissant de 14,3 à 14,1 NGF de l'amont vers l'aval, et deux tronçons de retour, perpendiculaires au premier, assurant la fermeture au coteau de la protection, respectivement à l'amont et à l'aval.

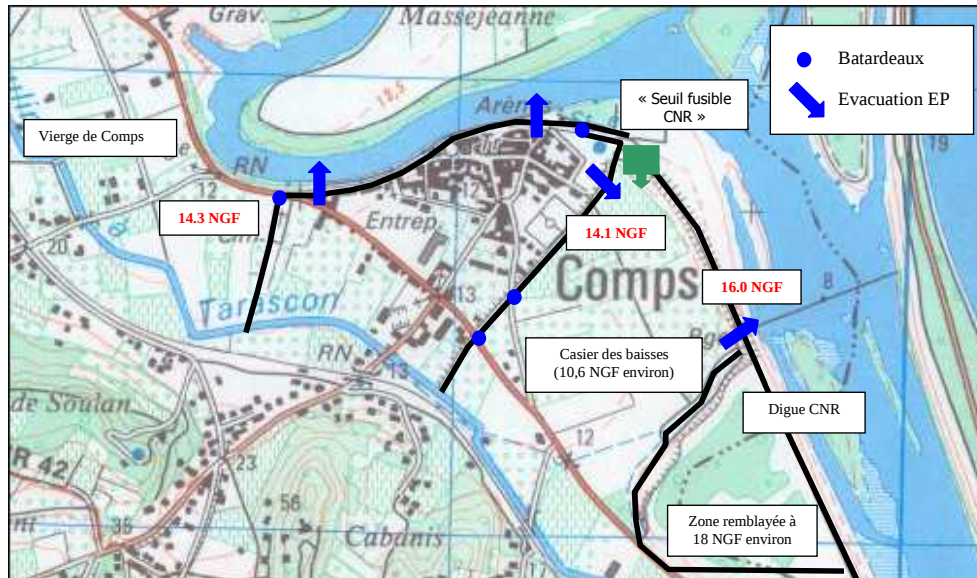


Figure 3 : système d'endiguement de Comps et du casier des Baisses

Le déversoir de Comps – qui nous intéresse ici – a été aménagé sur une longueur de 40 m tout à l'extrémité amont de la digue CNR, à son point de raccordement avec la digue en maçonnerie de Comps. Le seuil du déversoir est calé à la cote 13 NGF. Il a été doté d'un dispositif réputé fusible et constitué de deux cordons parallèles de matériaux graveleux dont le sommet est coté à environ 13,8 NGF. Au niveau du déversoir, le remblai de la digue était protégé originellement, en crête et sur ses deux talus, par une carapace en enrochements libres.

Ce dispositif a été sollicité, pour la première fois de sa vie de service, lors de la crue du Gardon du 9-10 septembre 2002. Des écoulements dans les deux sens se sont produits sur le déversoir (et ses cordons fusibles) au cours de cette crue, qui a par ailleurs provoqué plusieurs brèches dans la digue en maçonnerie de Comps. Bien que la cote maximale de la crue (de l'ordre de 14,4 NGF) ait dépassé celle du sommet des merlons fusibles, ceux-ci ne se sont pas effacés, même s'ils ont été

érodés partiellement. Cela est probablement dû à l'inondation du casier des Baisses via les brèches de la digue de Comps et, donc, à la faible différence de charge entre les deux cotés du déversoir au plus fort de la crue. Néanmoins, lors de cet événement, on pouvait déjà constater le caractère aléatoire de la fusibilité de ce dispositif rustique et ce, en dépit des travaux de scarification semble-t-il régulièrement effectués sur les cordons.

Dans les jours qui ont suivi cette crue, les cordons fusibles ont été reconstitués à l'identique et parfaitement scarifiés. Aucune intervention n'a été engagée sur le déversoir lui-même, dont la carapace n'avait pas subi de désordres significatifs.

Un an après cet événement, une petite équipe du Cemagref a pu assister « en direct » au fonctionnement du déversoir de Comps un peu avant la pointe de la crue de début décembre 2003.

2.2 Comportement pendant la crue de décembre 2003

En décembre 2003, la sollicitation des digues défendant Comps a été consécutive au remous du Rhône – le Gardon n'ayant connu qu'une crue mineure. Dès le mardi 2 décembre, la cote 12,5 NGF est atteinte au droit de la digue en maçonnerie et, dans le cadre du plan de vigilance, le village est évacué et les batardeaux mis en place.

Le 3 décembre vers 10h30, à notre arrivée sur place, le niveau du Gard s'établit à environ 13,9 NGF, soit 0,20 m sous le sommet de la digue du village, à son angle aval. Peu de temps auparavant, une pelle mécanique est venue combler les points bas du cordon fusible situé côté rivière. Cependant, quelques filets d'eau commencent déjà à couler sur le déversoir et à travers les merlons fusibles, plutôt perméables.

Vers 12h, le niveau du Gard se situe environ à 14,05 NGF (soit 5 cm sous la crête de digue en maçonnerie). L'écoulement sur le déversoir s'est élargi, rendant impossible toute traversée du déversoir, et nous assistons au début de l'érosion du merlon fusible côté val. L'érosion se concentre en un point bas de ce merlon, creusant assez rapidement cet endroit jusqu'au seuil en enrochements, mais sans s'élargir au delà de quelques mètres.

Par la suite, l'évolution de l'écoulement sur le déversoir est observée de 12 h à 15 h par un des auteurs – les principales séquences ayant fait l'objet d'un film vidéo. La chronologie des événements est la suivante :

- à 12h40, l'écoulement sur l'aval du déversoir reste très concentré, de largeur inférieure à 5 m au niveau du merlon fusible côté val et de l'ordre de 2 m seulement sur le parement aval enroché ;
- dès 13h, on entend des bruits de roulement de blocs qui, au vu de l'aspect de la ligne d'eau, ne laissent guère de doute sur le fait que des enrochements du talus aval commencent à être emportés ;
- vers 13h10, on constate nettement l'apparition puis le développement (en largeur et en longueur) d'une érosion régressive sur le déversoir ;

- de 13h25 à 14h20, le front de l'érosion a régressé d'environ 2 m dans le sens aval-amont. Une grosse marche d'escalier est apparue en aval dans la zone de concentration de l'écoulement, où pointent quelques gros enrochements de la carapace ;
- entre 14h35 et 15h, l'évolution se poursuit avec une plus nette tendance à l'approfondissement de l'entonnoir d'érosion (qui laisse à penser que la carapace d'enrochement est sérieusement entamée). La régression du front amont semble être moins rapide ;
- Lorsque nous quittons les lieux vers 15h, le niveau de la crue atteint le sommet de la digue en maçonnerie à son extrémité aval (14,1 NGF), soit 1,1 m au dessus de la cote d'arase du seuil du déversoir de la digue CNR.



Déversoir de Comps : photo prise vers 15h le 3 décembre (P. Royet)

Une visite postérieure à la crue, effectuée le 9 décembre 2003, a permis d'observer l'état du déversoir tel qu'il était en fin de crue – aucun travail de réfection n'ayant encore été réalisé à ce moment-là :

- le merlon fusible amont (côté rivière du Gard) est érodé sur toute sa hauteur, mais seulement sur 26 m de longueur. Les dépôts de matériau graveleux observables sur le talus côté Gard (estimés à environ 10 m³) sont le signe qu'une partie de l'érosion de ce merlon s'est produite à la décrue ;
- le merlon fusible aval (côté casier des Baisses) est érodé sur une vingtaine de mètres de longueur ;
- le seuil en enrochements libres (taille des blocs estimée à 200/600 mm, mais très hétérogène) est donc dégagé sur une surface importante, mais l'érosion a largement attaqué cette couche sur la moitié aval du seuil et sur une

longueur de 17 m, mettant à nu le limon compact de corps de digue et laissant voir en coupe la couche de gravier faisant transition entre les enrochements et le limon.

2.3 Conclusion sur le fonctionnement de l'ouvrage

A l'appui des observations faites au cours des crues de septembre 2002 et, surtout, de décembre 2003, on a pu, donc, conclure à un fonctionnement non conforme aux prévisions du dispositif fusible installé sur le déversoir de Comps. Non seulement la fusibilité n'a pas été assurée au niveau souhaité, mais le dysfonctionnement du système a entraîné des désordres sur le déversoir lui-même, par le biais d'une sollicitation aggravée (concentration des écoulements) par rapport à celle qu'il aurait connu en l'absence de fusibles.

Certes, ces désordres sont aussi imputables à un sous-dimensionnement de la carapace du déversoir qui, depuis, a été reprise avec, notamment, mise en place d'enrochements liés au béton sur le parement aval. Il n'en demeure pas moins que cet exemple démontre la difficulté posée par ce type d'aménagement fusible, simple dans son principe, mais non totalement fiable dans son fonctionnement.

3. Autres dispositifs fusibles envisageables

Pour tenter d'apporter une meilleure sécurité à l'effacement, divers dispositifs de rehausse fusible sont apparus ces dernières décennies, parmi lesquels on peut citer :

- les boudins gonflables ;
- les hausses fusibles type Hydroplus ;
- le mur en L, fusible.

Les deux premiers dispositifs sont déjà largement appliqués sur les barrages ou les seuils en rivière.

3.1 Les boudins gonflables

Il s'agit de boudins gonflables à l'air, constitués d'une enveloppe souple, en caoutchouc armé, d'environ 10 mm d'épaisseur. Les boudins gonflés à l'eau, capables de supporter des charges importantes ne se justifient pas pour les déversoirs de digues, justement du fait de la charge limitée (1,0 à 1,5 m). L'enveloppe est fixée à la structure au moyen d'un plat métallique boulonné sur une ligne d'ancrages dans une poutre en béton armé encastrée dans le seuil déversant. Les conduites d'alimentation en air des boudins sont, le cas échéant, noyées dans cette poutre.

Pour les rivières dont les crues sont à cinétique lente, nous proposons que les boudins soient dégonflés en temps normal, ce qui évite les risques de vandalisme (tir à la carabine) et permet d'envisager une protection contre les UV et les

différentes dégradations en disposant les boudins dans un caniveau couvert, constitué d'une réservation dans la dalle béton. L'épaisseur de 10 mm de l'enveloppe devrait permettre de prévenir les dégâts éventuels dus aux rongeurs. Lors de l'annonce de la crue, et s'il y a risque de dépassement du niveau du seuil fixe, on vient enlever la couverture des caniveaux et gonfler les boudins avec des groupes moto-compresseurs (procédure à prévoir dans le plan d'alerte). Puis, en fonction de la montée du niveau de crue, on déclenche, au moment où on le décide, le dégonflage des boudins et donc l'inondation du Val. On peut éventuellement prévoir la possibilité de venir, en cours de décrue, regonfler les boudins pour stopper l'inondation du Val. Hormis la vérification de l'état de la membrane et la remise en place de la couverture des caniveaux, aucune intervention n'est à prévoir pour remettre le dispositif en service après la crue (aspect intéressant en cas de crues successives rapprochées).

Cette solution présente donc de grands avantages de souplesse et de fiabilité. D'après le retour d'expérience sur les barrages et seuils en rivière, la durabilité des enveloppes exposées à l'air est estimée à plus de 40 ans. Dans notre cas, les enveloppes étant protégées et rarement sollicitées, on peut probablement tabler sur une durée de vie proche du siècle. Des essais de fonctionnement devraient toutefois être prévus tous les 2 à 5 ans. Ces essais serviront également d'exercices d'entraînement pour la préparation à la gestion de la situation de crue.

Éléments de coût

Le prix des boudins gonflables, dans la gamme de hauteurs comprises entre 1,0 et 1,5 m et pour des longueurs de seuil de quelques centaines de mètres s'établirait à environ 1 000 € par mètre carré de bouchure auquel il faut ajouter le prix du dispositif d'ancrage et de couverture. Pour une hauteur de rehausse de 1,5 m avec des boudins gonflables, on aboutit ainsi à un coût d'environ **2 000 €/ml** de seuil.

3.2 Les hausses fusibles type Hydroplus

Il s'agit d'éléments droits autostables (en béton vu leur hauteur) posés sur le seuil, adjacents les uns aux autres. Le basculement des éléments est provoqué automatiquement, à une cote précise, prédéterminée par la mise en charge d'une chambre aménagée à la base des éléments. Dans le cas des évacuateurs de crues de barrages, on souhaite moduler, en fonction de l'importance de la crue, le nombre de rehausses qui basculent. Dans le cas des digues, le basculement des hausses peut être commandé pour une cote unique (ou en tout cas, pour une plage réduite, de 5 à 10 cm) de façon à disposer, en un délai assez court, de la totalité de la capacité d'écrêtement du déchargeoir. Nous sommes donc dans une configuration très simple du dispositif Hydroplus.

Du point de vue génie civil, l'aménagement sera le suivant :

- base des hausses constituée d'une partie en béton armé coffré intégrée au seuil déversant ;
- piles intermédiaires tous les 100 m environ pour les prises d'eau d'alimentation des chambres à la base des hausses ;

- tuyaux d'alimentation des chambres, noyés dans le béton armé de partie supérieure du seuil ;
- hausses en béton armé préfabriquées et posées à la grue.

A noter qu'après basculement (crue centennale a priori), les hausses ne sont pas réutilisables et devront être remplacées par des hausses neuves. L'inondation du val cesse quand le niveau de la crue redescend sous le seuil fixe du déversoir.

Éléments de coût

Sur la base des coûts issus d'une étude de projet d'aménagement d'un déversoir sur la Loire (non réalisé à ce jour), on peut avancer le chiffre d'environ **2 000 €/ml** de seuil pour une hauteur de rehausse de 1,5 m.

3.3 Mur en L

Le principe de ce déversoir est issu d'une recherche bibliographique. Il reprend dans les grandes lignes le principe d'aménagement d'un déversoir expérimental projeté lors de la rénovation du barrage Milner (Etats Unis - Central Idaho) [5]. Le dispositif fusible doit s'adapter aux contraintes d'un ouvrage rustique : il doit demander un entretien simple, tout en présentant un fonctionnement sans failles.

La solution consiste à mettre en place, au dessus du seuil déversant fixe, un fusible rustique constitué d'un mur de rehausse en béton armé préfabriqué en forme de L, adossé à un remblai en graviers fins érodables placé à l'aval des panneaux béton. Le mécanisme est le suivant : l'eau atteignant la crête des panneaux en béton armé, passe en surverse et vient éroder le remblai placé à l'aval. L'appui des panneaux devenant insuffisant, il n'équilibre plus le moment de renversement de la poussée hydrostatique : les murs basculent et sont entraînés rapidement par les eaux. Etant donné la taille réduite des panneaux, le basculement de ceux-ci se produit en chaîne. Le mécanisme de rupture peut être amélioré en plaçant, sur chaque panneau, une barbacane inclinée en PVC de diamètre 50 cm. Le rôle de cette barbacane est d'introduire un gradient hydraulique à l'intérieur du remblai dans sa partie basse, juste avant la surverse par dessus les panneaux.

Éléments de coût

Pour une hauteur de rehausse de 1,5 m, le coût d'un tel dispositif rustique peut être évalué à **500 €/ml** de seuil. La contrepartie de ce coût nettement moins élevé que les deux solutions précédentes est une fiabilité moindre.

4. Conclusion

A ce jour, il existe des solutions fiables de rehausse fusible, qui ont fait leurs preuves sur les barrages ou les seuils en rivière. L'application de ce type de dispositif aux digues pose avant tout un problème de coût - de réalisation comme de maintenance ultérieure (en particulier pour les systèmes à éléments perdus) - dans la mesure où :

- il est nécessaire d'équiper de grands linéaires - les déversoirs de digue faisant souvent plusieurs centaines de mètres de longueur ;

- l'événement devant provoquer l'effacement de la totalité du fusible est a priori plus fréquent pour une digue que pour un barrage.

Les crues récentes en Europe et en Chine ont montré, par ailleurs, qu'il était très délicat d'avoir à effectuer, en période de crise, des manœuvres sur des dispositifs destinés à provoquer des inondations préventives : les populations riveraines l'acceptent mal et s'opposent, parfois physiquement, à de telles interventions. Ceci milite pour des dispositifs qui fonctionnent sans intervention humaine.

Parallèlement, un large champ de recherche et développement reste ouvert en vue de concevoir et tester des dispositifs plus rustiques pouvant répondre aux contraintes ci-dessus et résoudre l'antagonisme entre une bonne étanchéité (qui pourrait être apportée par une géomembrane) et une forte érodabilité (matériau sans cohésion, régulièrement scarifié) du fusible.

Enfin, quel que soit le type de fusible retenu, il convient de veiller à ce que le déversoir sur lequel il sera installé soit dimensionné de façon à résister sans dommage à la crue débordante, y compris dans la situation dégradée d'un dysfonctionnement du fusible provoquant une aggravation locale des contraintes d'écoulement.

Références

- [1] **ISL, Cemagref, 1998.** *Levées de la Loire Moyenne – Recherche de coûts unitaires de techniques de protection.* Rapport à l'Equipe pluridisciplinaire plan Loire grandeur nature, 57 p et annexes.
- [2] **POWLEDGE R. & al., 1989.** *Mechanics of overflow erosion on embankments, Part I Research activities, Part II Hydraulic and design considerations* - Journal of Hydraulic Engineering - vol 115 n°8 August 1989 , pp. 1040-1075.
- [3] **HUGHES A. K. & al., 1994** - *A practical appraisal of the overtopping of embankment dams* - Reservoir Safety and environment. Thomas Telford London, pp. 260-270.
- [4] **DUIJVENBODE Jan Dirk, 1997.** *Failure testing of a dike by overtopping* - 19è Congrès des Grands Barrages, Florence Q75, R35 - Vol 4, pp. 473-480.
- [5] **PUJOL-RIUS A. & al, 1991.** *Rehabilitation of Milner Dam* - Dix-septième Congrès des Grands Barrages - Vienne, 1991 - Q67/R23.