

Éléments de conception hydraulique des déversoirs des endiguements de protection contre les inondations

David Goutx ^a, Rémy Tourment ^b et Patrice Mériaux ^b

Les ouvrages hydrauliques (barrages, digues...) sont dimensionnés en prenant en compte une ou plusieurs crues données (fréquence, débit, volume). Pour des crues plus importantes, le comportement hydraulique de l'ouvrage est modifié ; il peut se produire des dommages sur l'ouvrage, allant jusqu'à sa rupture totale ou partielle, et en aval de celui-ci (pour les barrages) ou derrière celui-ci (pour les digues). Entre autres, les digues n'assurent leur fonction de protection contre les inondations que jusqu'à une certaine occurrence de crue. Au-delà, l'eau risque d'endommager la digue, particulièrement en cas de surverse sur des sections non aménagées à cet effet. La rupture par surverse crée des conditions nettement plus défavorables dans la zone protégée que l'absence de digue : vitesse de l'eau très importante, tant en déplacement horizontal qu'en montée verticale.

Il est donc nécessaire, afin d'éviter des pertes en vies humaines, de prévoir sur les digues (comme il en existe systématiquement sur les barrages) des **déversoirs** (ou parties déversantes), de manière à provoquer une **inondation lente** des zones jusqu'alors protégées.

L'implantation de déversoirs (ou déchargeoirs) sur les digues de protection contre les inondations est la solution technique à privilégier pour éviter la rupture lors d'une surverse, en cas d'événements dépassant en intensité la crue de protection. Simple dans son principe, le concept de déversoir se heurte, cependant, à des difficultés techniques

qu'il ne faut pas négliger lors de la conception de tels ouvrages, en particulier sur des digues existantes et non équipées de déversoirs, et ce, d'autant plus que l'on ne dispose que d'un relativement faible retour d'expérience pour l'application aux digues. Il est à noter qu'en France, d'après l'article 5 de l'arrêté du 13 février 2002 (réf. NOR : ATEE0210027A), les déversoirs sont obligatoires pour les nouveaux ouvrages.

La présente communication a pour objectif de cerner le problème de la conception d'ensemble de tels déversoirs de sécurité pour les digues de protection contre les inondations, en tentant de dégager l'ensemble des éléments et contraintes, techniques ou d'autres types, à prendre en compte par les projeteurs de tels aménagements.

Après avoir évoqué rapidement les avantages tirés d'une reconstruction de la digue d'Aramon en intégrant un déversement de sécurité avec les contraintes du site et un ouvrage existant, nous montrons de ce fait non seulement la faisabilité d'un déversoir de sécurité avec une digue existante, mais la preuve de son utilité ; les auteurs commentent *in abstracto* les diverses options de conception, leurs avantages, leurs impacts et leurs limites.

La sécurisation de la digue d'Aramon

La digue d'Aramon (département du Gard), qui fut détruite par surverse en septembre 2002 (photos 1 et 2), a été reconstruite en 2003, en lui intégrant une section déversante. Cette digue protégeait le

Les contacts

a. CETE Normandie-Centre, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, 11, rue Laplace, CS 2912, 41029 Blois Cedex
b. Cemagref, UR Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie, 3275, route de Cézanne CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

► Photos 1 et 2 – À gauche, une brèche totale et à droite une brèche partielle, survenues lors de la crue de septembre 2002 (photographies Paul Royet).



village d'Aramon des crues du Gard, ainsi que des inondations par remous du Rhône. Sa rupture brutale a provoqué 5 victimes.

Les principes ayant prévalu à la conception de la nouvelle digue furent les suivants :

- (i) conserver pour le village le même niveau de protection que la digue d'origine ;
- (ii) favoriser en cas de crue exceptionnelle une inondation lente du village, sans rupture de digue ;
- (iii) ne pas aggraver par rapport à la situation antérieure les lignes d'eau en crue dans la partie non protégée de la plaine.

Après l'étude d'une série de solutions et les modélisations hydrauliques associées, le dimensionnement suivant a été proposé :

- digue déversante à la cote de 14,40 NGF, sur 900 m de longueur, implantée dans la zone la plus éloignée des habitations ;
- digue non résistante à la submersion, calée à la cote de 15,50 NGF sur 900 m de longueur, à proximité des habitations.

La longueur de la partie déversante a été choisie de manière à permettre en cas de crue exceptionnelle (atteignant la cote de 15,50 NGF) un pré-remplissage du casier d'Aramon, suffisant pour que le risque de rupture en cas de surverse sur le tronçon non submersible soit le plus faible possible. On a alors une cote de l'eau en aval du déversoir de 13,50 NGF, ce qui correspond à une inondation de 0,50 m dans le centre du village et de 2,50 m en moyenne dans les parties basses.

Cet aménagement permet une protection du village d'Aramon contre des crues (du Rhône ou du Gardon) pour des occurrences supérieures à 100 ans.

Un modèle bidimensionnel a permis d'estimer pour plusieurs scénarii de crues la cinématique de remplissage du casier protégé, et ainsi à la commune d'Aramon d'affiner son plan de vigilance et d'évacuation.

En décembre 2003, lors de la crue majeure du Rhône, la plaine d'Aramon a été inondée par remous. La digue s'est mise en charge et le déversoir a fonctionné, sans dommage majeur sur l'ouvrage, pourtant pas tout à fait achevé. En parallèle, la population a pu être évacuée sans inconvénient.

Crues de projet et objectifs des déversoirs

Lorsqu'un nouveau dispositif d'endiguement est conçu, la problématique de l'implantation des déversoirs de sécurité se pose *a priori* : la question majeure pour le maître d'ouvrage est la protection des zones à enjeux. L'ensemble du dispositif, dont notamment les déversoirs, s'adaptera à la satisfaction de cet objectif prioritaire. La cote des déversoirs et la cote de la digue définissent de manière explicite le niveau de protection du casier protégé.

La suite de cet article s'attache donc à exposer les critères de prédimensionnement et de positionnement des déversoirs, et d'évaluer la faisabilité des déversoirs dans l'endiguement projeté.

Les crues associées à un projet de système d'endiguement

Un projet de système d'endiguement doit avoir, parmi ses données de base, deux ensembles de crues associant des objectifs de protection différents.

Le premier ensemble de crues de projet comprend celles pour lesquelles le casier sera protégé

contre toute inondation : on les nommera « **crues de projet de protection** ». Le second ensemble comprend les crues pour lesquelles le casier est inondé par déversement au-dessus d'un déversoir, mais où il ne se produit pas de surverse sur le reste de la digue : on les nommera « **crue de projet de sécurité hydrologique**¹ ».

Ces crues doivent être définies par les trois paramètres qui décrivent l'hydrogramme de ces phénomènes transitoires : fréquence, débit et volume (ou durée) ; en pratique, on a besoin de leur hydrogramme, pour modéliser la réponse du système. En effet, deux crues ayant le même débit de pointe mais avec des vitesses de montée différentes (et donc, des volumes différents) auront des impacts différents sur un système d'endiguements.

Le nombre satisfaisant d'hydrogrammes pour l'étude d'un projet dépend de la variabilité des types de crue rencontrés sur le cours d'eau considéré et des objectifs visés.

Objectifs des déversoirs

La conception de déversoirs dans un système d'endiguement peut répondre à plusieurs objectifs, en relation directe avec le (ou les) objectif(s) du système d'endiguement associé.

Lorsque l'on considère un casier protégé contre les crues par un système d'endiguement, l'objectif primaire de celui-ci est bien évidemment la protection de ce casier (auparavant zone inondable) contre les crues, et, en pratique contre une (ou plusieurs) crue(s) de référence, appelée(s) crue(s) de projet de protection. Mais, sur un même cours d'eau, différentes zones inondables peuvent avoir des besoins et objectifs de protection différents (par exemple en fonction de la nature et de la densité des enjeux protégés), en terme de probabilité d'occurrence d'une inondation à l'abri de la digue.

À L'ÉCHELLE DE LA ZONE PROTÉGÉE

L'objectif le plus évident pour un déversoir, lorsqu'on se réfère à une zone protégée donnée, est de protéger la digue sur laquelle il est implanté contre les dommages pouvant résulter d'une surverse en section courante de l'ouvrage. Il s'agit alors de concentrer les écoulements de submersion dans des sections conçues à cet effet, plutôt que de laisser des brèches s'ouvrir au gré des faiblesses masquées de la digue (ex. : points bas en crête) et de sollicitations hydrodynamiques locales imprévisibles.

À cet objectif de protection de la digue s'associent des objectifs complémentaires des déversoirs², d'autant plus importants qu'ils seront fréquemment sollicités :

- assurer, lorsque l'endiguement est soumis à une crue dépassant la crue de projet de protection, une submersion **progressive et contrôlée** de la zone protégée, de manière à ne pas compromettre son évacuation totale et à limiter les vitesses d'écoulement dans le casier protégé (tant horizontales que verticales) ;
- limiter, durant la submersion progressive, les **dommages occasionnés aux enjeux** protégés, ainsi qu'à la digue elle-même, par les écoulements rapides de submersion.

À L'ÉCHELLE DU COURS D'EAU

À l'échelle du cours d'eau, les déversoirs peuvent avoir pour fonction d'abaisser la ligne d'eau en crue en certaines parties du cours d'eau, en inondant volontairement certains casiers avant d'autres. Il n'y a pas opposition entre les différents objectifs, mais il faut définir clairement l'objectif prioritaire de l'endiguement, et son objectif de protection en terme hydrologique avant de dimensionner les déversoirs associés.

Une politique de gestion des crues doit être négociée et modélisée à l'échelle d'un cours d'eau (d'un bassin versant), et donc les paramètres hydrologiques permettant de dimensionner les déversoirs doivent être choisis de manière concertée et homogène à cette échelle.

En revanche, pour un casier donné et un objectif de protection donné, les déversoirs se dimensionnent de manière indépendante par rapport au reste du bassin. La modélisation à l'échelle du casier doit utiliser comme conditions aux limites les résultats de la modélisation à l'échelle du bassin et une résolution plus fine.

IMPACT DES DÉVERSOIRS SUR LES CRUES

En termes de réduction des crues, un déversoir aura plusieurs effets :

- sur l'aval, en soustrayant une partie du débit de la crue et du volume. Il s'agit probablement là de l'effet le plus incontestable et le plus efficace ;
- sur l'amont (et sur une certaine distance), si l'écoulement de la crue est de type fluvial, le déversoir aura un impact en terme d'abaissement de la ligne d'eau en crue.

1. Terminologie empruntée au bulletin 125 de la CIGB, et relative dans cet ouvrage aux barrages écrêteurs de crue.

2. Cf. étude de cas de la digue d'Aramon exposée en début d'article.

Il est intéressant de quantifier ces deux impacts lors d'un projet, ne serait-ce que pour vérifier l'adéquation du déversoir à son ou ses objectifs prioritaires.

Types de déversoirs

Déversoir à surface libre ou ouvrage de prise en charge

Les écoulements à surface libre déversés par-dessus un seuil ont lieu sans manœuvre d'aucun vannage et offrent une bonne croissance de la capacité d'évacuation en fonction de l'accroissement du niveau d'eau contre la digue, la loi d'évacuation de débit étant fonction de la puissance $3/2$ de la charge hydraulique comptée au-dessus de la cote de déversement (lorsque le seuil est dénoyé).

Les écoulements en charge traversant un ouvrage de prise d'eau dans le cours d'eau *via* un orifice hydraulique sont nécessairement asservis à l'ouverture d'un vannage assurant en situation normale l'opacité hydraulique de l'endiguement. L'ouverture de cette vanne pose des problèmes identiques à ceux des dispositifs escamotables en général (cf. ci-après). La loi d'évacuation de débit, fonction de la racine carrée de la charge hydraulique, est comptée à partir de la profondeur d'immersion de l'orifice, si bien que dès l'ouverture de la vanne qui l'obstrue en temps normal, l'orifice évacue un débit significatif. De plus, à condition de respecter une condition d'enneigement des vortex, la prise d'eau ne risque pas d'obstruction par les encombres flottantes, et n'introduit pas de pollution de surface dans la zone protégée en cours de submersion.

Dispositifs escamotables : fusibles ou mobiles

Qu'il s'agisse de dégager une hauteur initiale de surverse au déclenchement d'un déversoir à surface libre ou de libérer la capacité d'évacuation d'un orifice d'ouvrage de prise d'eau en charge, le concepteur de l'endiguement est conduit à envisager un dispositif escamotable.

Ces dispositifs posent cependant le problème de la responsabilité de l'opérateur chargé de déclencher la submersion de la zone protégée et/ou celle du service d'annonce de crue qui lui fournit des informations sur la poursuite de la montée de crue. On peut donc préférer des dispositifs ne nécessitant pas d'intervention humaine, pour autant que leur fonctionnement soit fiable.

Un dispositif escamotable envisagé peut être fusible (sacrifié au moment du déclenchement) ou mobile (mis en mouvement puis remis en place après la crise).

Un fusible peut être un merlon en matériau érodable arasé à une cote inférieure de quelques dizaines de centimètres sous le niveau de déversement généralisé, de sorte que la lame d'eau déversante l'éventre rapidement et libère la surface d'évacuation maximale. Il peut aussi s'agir d'un mur instable à la poussée qui se renverse, mais son basculement soudain peut surprendre les riverains. Certains dispositifs partiellement fusibles peuvent avoir la préférence des concepteurs, tels qu'éléments basculant sous la pression de l'eau pour libérer une plus grande capacité d'évacuation (dispositif Hydroplus, par exemple). Les photos 3 et 4 montrent un déversoir à rehausse fusible en extrémité de crête avec armure de pavés sur la crête déversante.

► Photos 3 et 4 – Déversoir du Bec de Cher à rehausse fusible en extrémité de crête côté Cher, avec armure de pavés sur la crête déversante et digues de canalisation des eaux déversées vers l'aval.



Photographie aérienne IGN

Photographie D. Goutx

Un dispositif mobile peut être un boudin gonflé à l'eau ou à l'air qui se dégonfle au moment voulu. L'inconvénient des dispositifs gonflables est leur instabilité au déversement lorsqu'ils sont, comme c'est souvent le cas, assez élancés : la charge hydraulique conduit alors le dispositif à s'effondrer par le centre en restant plus rigide aux extrémités, si bien que la surface libérée est plus proche du triangle que du rectangle. On peut également prévoir un clapet mobile actionné par des vérins pour un déversoir ou un vannage mobile mécanisé pour une prise d'eau. La principale difficulté technique liée à ces solutions est la certitude d'un bon fonctionnement au moment voulu (c'est-à-dire, très rarement, en fonction du niveau de protection à assurer), et donc, un entretien très rigoureux des mécanismes.

Ces dispositifs escamotables sont choisis pour permettre de retarder le plus possible le moment du déversement, puis de permettre alors un débit plus important, mais leur fiabilité est discutée (Royet *et al.*, 2004).

Nombre et emplacement des déversoirs

Une implantation du déversoir dans la partie aval du tracé de la digue (au point le plus bas de la zone protégée) sera préférable³, de manière à obtenir des vitesses dans le casier inondé les plus basses possible. Trop à l'amont, le déversoir risque de générer un écoulement de submersion du val bénéficiant de la pente de lit majeur réactivé, et donc, avec des vitesses qui, alliées à la soudaineté, sont plus dangereuses que si le déversoir, plutôt en aval, noie le val protégé par remous.

En revanche, si le noyage du val par remous tarde à noyer la partie amont du val (particulièrement en cas de crues réelles de montée plus rapide que les crues modélisées), le risque de submersion de la zone amont par surverse sur la partie amont de la digue reste critique.

Ainsi, le positionnement des déversoirs le long de l'endiguement peut être décisif si l'ouvrage longitudinal protège une zone s'étirant sur une distance amont/aval de l'écoulement telle qu'une dénivellée non négligeable existe dans la zone protégée. Cette dénivellée serait alors à même de fournir une force motrice aux eaux de remplissage de sécurité, générant des vitesses d'écoulement à l'intérieur de la zone protégée qui ne sont pas souhaitables, au moins dans la première phase du remplissage.

Une solution pourrait alors être de faire un premier déversoir de décharge en aval, le premier à être activé, et une deuxième en partie médiane, qui prend le relais, pour la partie amont. Cette solution semble intéressante, mais une attention particulière devra être portée dans ce cas aux hydrogrammes de crue choisis et aux modélisations hydrauliques ultérieures (destinées à caler les cotes respectives des déversoirs) : en cas de décalage entre les hydrogrammes de la crue modélisée et de la crue réelle (temps de montée par exemple) le relais calculé risque de se faire plus tôt que prévu.

Il peut être préférable de prévoir un déversoir de largeur de seuil bien calculée, avec plusieurs sections à des cotes différentes (réduisant le risque de décalage entre une crue réelle et une crue modélisée), si un seul déversoir de longueur adaptée n'est pas envisageable.

Enfin, une autre idée de dimensionnement de l'ensemble « digue plus déversoir » peut consister en l'implantation d'un déversoir vers l'aval, et plutôt que d'implanter un autre déversoir plus en amont, de prévoir une revanche qui diminue entre l'amont et le déversoir, ce qui fait que la probabilité de surverse soit plus forte dans les zones déjà noyées (aval).

Cette problématique sera d'autant plus importante à être bien traitée que le cours d'eau sera soumis à différents régimes de dynamique de crue.

Finalement, au-delà de considérations purement calculatoires, l'aspect sociologique de l'acceptation de l'implantation de déversoirs restera probablement le facteur prépondérant pour le choix de leur positionnement, et cela particulièrement sur les digues existantes.

Grandeurs caractéristiques de la conception

La phase de dimensionnement hydraulique des endiguements doit comprendre, pour les nouveaux projets d'endiguements, la réservation des emprises nécessaires à l'implantation des déversoirs de décharge. Pour cela, il convient de déterminer quelques grandeurs caractéristiques à ce stade.

Niveau de protection statique

La grandeur caractéristique la plus importante de l'endiguement est certainement le niveau de protection, exprimé soit en période de retour de

3. Sauf dans le cas évoqué « À l'échelle du cours d'eau », p.171 où un abaissement de la ligne d'eau en crue en aval du déversoir est recherché.

débit de crue, soit en niveau d'eau résultant en plusieurs endroits donnés. Ce niveau de protection doit garantir le confinement des eaux de la crue de projet du côté rivière de la digue. Nous désignons ce niveau, à un endroit donné, Z_0 .

Rappelons à ce sujet que le niveau de protection exprimé en période de retour peut occasionner certaines confusions dont il faut se garder. Il devrait surtout servir aux calculs de l'intérêt économique comparant le coût de l'aménagement avec le montant des dommages et leur probabilité d'occurrence. Car, en matière de communication (avec le public comme avec les maîtres d'ouvrage eux-mêmes), cette confusion peut être durablement dommageable à la bonne compréhension des aménagements de sécurité (de type déversoir, notamment).

Ainsi, pour une digue conçue pour contenir les eaux d'une crue centennale, on évalue la probabilité (figure 1) qu'elle soit vaincue, à :

- 10 % dans les 10 prochaines années ;
- 18 % dans les 20 prochaines années,
- 40 % dans les 50 prochaines années,
- 65 % dans les 100 prochaines années,
- 87 % dans les 200 prochaines années, etc.

Niveau de protection dynamique

Ce niveau de protection statique ne suffit cependant pas à lui seul à garantir que nulle eau ne franchira la digue du fait des effets dynamiques liés à l'agitation du plan d'eau (batillage dû au vent ou ondes de remous). Une revanche ΔZ doit être prévue au-dessus du niveau de projet ou de protection Z_0 afin de contenir ces ondulations et leur réflexion sur l'endiguement.

Au-delà des aspects dynamiques ci-dessus, il existe également des surhauteurs (par rapport à

un niveau statique moyen du cours d'eau à un débit donné) dues à des phénomènes ponctuels (fortes discontinuités géométriques, tant dans la direction verticale que dans la direction amont-aval ou dans le sens transversal, noyées en crue). Les ondes stationnaires produites par les courants hélicoïdaux résultants peuvent parfois donner des phénomènes particulièrement violents.

Il importe évidemment que la revanche ne constitue pas en soi une rehausse déguisée de l'endiguement au-delà du niveau de protection de projet, mais il ne faut pas non plus que les effets dynamiques fassent entrer trop d'eau par le déversoir calé à la cote de protection statique. La question d'une cote de déversement ajustée non pas au niveau statique de protection, mais au niveau dynamique de protection, est en débat pour la conception des déversoirs.

En règle générale, la revanche varie entre 20 et 50 cm.

Emprise des dispositifs de dissipation

L'irruption du débit déversé sur le seuil dans la zone protégée doit être contrôlée pour que l'énergie soit dissipée sans mettre en danger les enjeux environnants, ni non plus menacer la digue elle-même en érodant son pied de talus côté val.

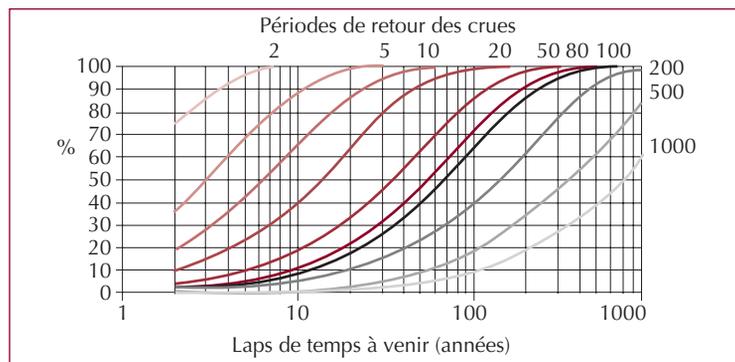
La zone située en arrière du déversoir va, en effet, subir un écoulement violent. Les retours d'expérience effectués dans le cadre du programme de recherche européen Impact montrent que même si la crête ne subit pas de brèche, les écoulements de surverse viennent saper le pied de l'endiguement et le sol sur lequel il repose et font s'écrouler l'arrière de la digue, déstabilisant tant le talus que l'ouvrage finit par céder.

Même si des dispositifs de dissipation sont mis en place pour limiter les risques d'érosion du pied de déversoir et des endiguements proches, les écoulements constitueront un aléa fort à très fort pour les personnes et les biens, jusqu'à leur tranquillisation. Il faut fermement dissuader les implantations humaines dans cette zone, qui a néanmoins l'avantage d'être connue.

Le dimensionnement de la largeur déversante

Le problème du dimensionnement des déversoirs le plus simple est évidemment celui avec un seul hydrogramme pour chacune des deux crues de

▼ Figure 1
– Probabilité de dépassement d'une protection en fonction de la période de retour d'une crue.



projet, et on peut généralement dans ce cas assez facilement trouver les caractéristiques (cote, largeur) d'un seuil permettant de protéger la digue, et le plus longtemps possible le val endigué.

Nous examinons ici les façons d'aborder simplement le calcul de pré-dimensionnement de la largeur déversante des seuils de décharge, sans encore recourir aux outils de calculs élaborés.

Cas d'un seuil de largeur fixée

Les seuils doivent permettre, en cas de crue prolongée, de remplir la zone protégée derrière l'endiguement de sorte que les eaux de déversement généralisé sur l'ouvrage soient amorties dans l'épaisseur d'eau d'inondation initiale.

Le volume déversé dans le casier protégé par un seuil-déversoir épais de largeur L pendant le temps mis par les eaux de crue (en supposant que la vitesse de montée des eaux de crue côté rivière est constante durant l'intervalle considéré) pour passer de la cote Z_0 de début de déversement à la cote $Z_0 + \Delta Z$ de haut de revanche est donné par l'expression :

$$\begin{aligned} \int_{t(Z_0)}^{t(Z_0+\Delta Z)} Q(t).dt &= \int_{Z_0}^{Z_0+\Delta Z} Q(Z) \frac{dt}{dZ} dZ \\ &= \frac{1}{dZ} \int_{Z_0}^{Z_0+\Delta Z} \mu.L.\sqrt{2g} \cdot (Z - Z_0)^{3/2} .dZ \\ &= \frac{\mu.L.\sqrt{2g}}{dZ} \int_{Z_0}^{Z_0+\Delta Z} (Z - Z_0)^{3/2} .dZ \\ &= \frac{\mu.L.\sqrt{2g}}{dZ} \left[\frac{2}{5} (Z - Z_0)^{5/2} \right]_{Z_0}^{Z_0+\Delta Z} = \frac{2\sqrt{2g} \cdot \mu.L}{5 \cdot \frac{dZ}{dt}} \cdot (\Delta Z)^{5/2} \end{aligned}$$

Volume à remplir

Le volume d'eau qu'il faut remplir est à la croisée des deux objectifs principaux du déversoir :

- la submersion lente de la zone protégée permettant l'évacuation des personnes ;
- la dissipation de la lame déversante dans le matelas d'eau pour limiter le risque de destruction de l'endiguement.

ÉVACUATION DES PERSONNES MENACÉES :

VOLUME MAXIMUM DE REMPLISSAGE CONTRÔLÉ

La submersion lente de la zone protégée permettant l'évacuation des personnes peut se traduire

par une hauteur d'eau dans la zone protégée inférieure à 50 cm (aléa faible) au moment où la submersion devient incontrôlable.

Les seuils doivent être positionnés de sorte que les eaux introduites dans la zone protégée ne puissent pas acquérir, du fait de la topographie de la zone, des vitesses sensibles et donc dangereuses (supérieures à 0,25 m/s). Ceci dépend étroitement du positionnement des seuils dans l'aménagement.

En supposant que cette condition est bien respectée, on peut faire l'hypothèse d'eaux sans vitesse dans le casier entouré de la digue, et assimiler le volume d'eau stocké dans la zone au volume sous l'horizontale de cote Z uniforme : $Volume = Volume(Z)$.

Si le casier protégé est à peu près plat, le volume maximum du remplissage avant submersion incontrôlée de la zone protégée peut s'écrire : $Volume = 0,5 \cdot Surface$.

PROTECTION DE L'ENDIGUEMENT CONTRE LES SUBMERSIONS INCONTRÔLÉES :

VOLUME DE REMPLISSAGE MINIMAL

L'épaisseur du matelas d'eau minimal à instaurer dans le casier dépend du débit linéique submergeant l'endiguement, et donc :

- de la vitesse de montée des eaux $\frac{dZ}{dt}$ dans le cours d'eau ;
- du volume restant à remplir dans la zone protégée entre la cote du matelas d'eau et l'égalisation des cotes de part et d'autre de l'ouvrage ;
- de l'énergie de l'écoulement, donc à la fois de la charge sur la partie déversante (qui va fixer le débit) et de la dénivelée entre la crête et le niveau de l'eau aval (qui va fixer la vitesse d'arrivée de l'eau).

Généralement, le matelas d'eau au pied de l'endiguement va augmenter au fur et à mesure que le débit de submersion généralisée ajouté au débit introduit au niveau du déversoir remplit la zone protégée. Sa capacité d'absorption de l'énergie du débit linéique de submersion va donc augmenter en même temps que l'augmentation du débit linéique lui-même, si bien qu'en fonction des expressions de l'une et l'autre quantité, une sorte de course de vitesse entre sollicitation érosive et amortissement s'engage. Les deux cas extrêmes permettant d'approcher le raisonnement induit sont, d'une part, celui

d'un casier avec une surface très grande et un cours d'eau faible ou moyen et, d'autre part, un casier de surface limitée (tel Aramon) protégé des crues d'un grand fleuve. Dans le deuxième cas, le calcul permettra de dimensionner de manière satisfaisante les déversoirs par rapport à cet aspect des choses, alors que dans le premier cas, il est probable que l'appel à une approche « experte » sera nécessaire.

Lorsque la maîtrise foncière le permet, il peut être très intéressant de creuser un contre-canal au pied de l'endiguement du côté de la zone protégée, clos aux extrémités, de sorte que les eaux introduites par les déversoirs s'y stockent prioritairement afin de constituer en un délai assez bref un matelas d'eau et de constituer un volume-tampon entre le déversoir et les enjeux protégés de faible capacité par rapport aux volumes de crue, mais certainement d'une grande portée psychologique. Ce contre-canal permettrait également de contenir les eaux que l'agitation de surface de la crue de projet aurait fait passer sur le déversoir sans que le déversement de sécurité soit réellement déclenché. Il jouerait alors un rôle équivalent à celui de la revanche en section courante de l'endiguement, sans entraver la capacité de déversement du seuil dès le dépassement de la cote de déclenchement statique. Il peut enfin servir au ressuyage post-crue du val protégé, à condition d'être vers l'aval raccordé au val inondable par un pertuis vanné. Il faut toutefois que ce canal en pied de digue ne porte pas atteinte à la sécurité de l'ouvrage, tant au point de vue de son dimensionnement (maintien de bonnes conditions de gradient hydraulique) que de sa surveillance et de son entretien (absence d'eau hors périodes de déversement, permettant de détecter d'éventuelles faiblesses).

L'incidence directe de la vitesse de montée des eaux $\frac{dZ}{dt}$ dans la rivière sur la largeur déversante des déchargeoirs est mise en évidence dans la formulation :

$$L = \frac{dZ}{dt} \cdot \frac{\text{Volume}}{0,682 \cdot (\Delta Z)^{3/2}}$$

Le concepteur de l'endiguement et des déversoirs devra choisir la vitesse de montée des eaux de crue pour un niveau atteignant celui du début de déversement, en considérant le cas le plus défavorable en fonction des données hydrologiques disponibles.

Dimensionnement final des déversoirs

Lorsque la phase longue et complexe de conception de l'endiguement, y compris les déversoirs, a abouti, la deuxième phase doit avoir lieu : le dimensionnement final des déversoirs.

Les outils pour ce faire sont ceux de la modélisation hydraulique sectorisée : modélisation filaire à casiers ou modélisation bidimensionnelle. À l'aide des données topographiques et bathymétriques de la zone protégée, les écoulements générés par l'intrusion de débit dans les déversoirs de décharge et leurs conséquences sur l'endiguement et sur les personnes à évacuer.

La modélisation hydraulique devra être effectuée en régime non permanent, eu égard à la nature essentiellement transitoire du phénomène modélisé, qui monte en puissance au fur et à mesure de la montée en charge du déversoir sous le niveau croissant de la crue. Les outils de calcul capables de simuler correctement le phénomène de submersion – contrôlée – de la zone protégée par un endiguement ne sont pas nombreux, car ils doivent résoudre plusieurs problèmes spécifiques à ce type d'événement : propagation d'un front de submersion sur un fond initialement sec, déplacement rapide de l'onde d'établissement d'un régime d'inondation plus lent dans un espace rendu anisotrope par l'occupation du sol, alternance de situations hydrauliques contrôlées par l'amont (partout où l'impulsion hydraulique est donnée par l'arrivée d'eau dans le déversoir) ou par l'aval (dans les lieux où l'onde de submersion contrôlée bute sur un obstacle).

Ouvrages et dispositions complémentaires aux déversoirs

Ouvrages de ressuyage

Il ne faut pas oublier le problème de la restitution des eaux depuis le val vers le cours d'eau à la décrue et de l'exutoire des ruisseaux piégés dans la zone protégée. En temps normal, il faut que l'endiguement laisse sortir de la zone protégée les eaux d'un ru affluent dont les eaux auraient été gonflées par un orage violent et localisé sur son bassin versant, par exemple. Ce n'est qu'en temps de crues concomitantes sur le cours principal et sur le ru affluent que l'endiguement fait obstacle à la sortie des eaux de ce dernier.

Mais, à la décrue du cours principal, ces rus affluents, bien qu'ayant accumulé des eaux pen-

dant toute la phase de hautes eaux de l'autre côté de l'endiguement, font souvent de bons chenaux de drainage de la zone protégée pour le ressuyage, car ils sont souvent placés « aux bons endroits ».

Il reste cependant toujours des zones en dépression qui ne sont pas drainées par le réseau hydrographique local piégé dans la zone endiguée. On devra alors concevoir un drainage spécifique (fossés de collecte et exutoire, gravitaire ou par pompage, depuis un point bas du terrain).

Reversoirs, ou déversoirs en retour

Ce type d'ouvrage se rencontre fréquemment sur les vals endigués le long de la Loire Moyenne. Il s'agit de déversoirs fonctionnant « à l'envers », c'est-à-dire destinés à laisser passer l'eau depuis le casier vers le cours d'eau ; un ou plusieurs déversoirs, situés en amont, alimentent eux le casier depuis le cours d'eau. La fonction de ces reversoirs est de permettre le transit vers l'aval de l'eau admise dans le casier par les déversoirs, une fois que le casier est plein, et donc d'éviter la surverse « à l'envers » sur la digue accompagnée éventuellement d'une rupture ou de dommages à la digue. Finalement, un casier muni d'un déversoir à l'amont et d'un reversoir à l'aval, une fois plein, joue un rôle de transit des eaux du fleuve, en parallèle du lit endigué, et participe, à la différence de casiers munis simplement d'un déversoir, à l'amortissement de la crue, par l'abaissement de la ligne d'eau de manière locale. On peut donc dire que le rôle d'un reversoir est double : protection de la digue et abaissement de la ligne d'eau en crue.

Mesures organisationnelles

Même s'ils sont indispensables, un ou plusieurs déversoirs sur une digue ne sont pas suffisants pour assurer la sécurité des personnes et des biens situés dans la zone protégée. Aussi, en complément de l'aménagement de déversoirs, il est nécessaire d'organiser :

- la surveillance des ouvrages en crue (ce qui sous-entend également une chaîne de prévision

et d'annonce de crues efficace), ou en période d'alerte météo (faute d'existence de la chaîne précitée) ;

- les moyens d'intervention (réparations et confortements d'urgence) ;

- les moyens d'information à la population (jusqu'à la possibilité d'évacuation).

L'ensemble de cette organisation doit être réfléchi, concertée et formalisée avant la crise, puis améliorée après tout retour d'expérience.

Conclusion

La problématique de la conception et de l'implantation de déversoirs sur les digues de protection contre les inondations est complexe. L'hydrologie fait évidemment partie des données de base à acquérir pour poser correctement le problème. Des modélisations hydrauliques peuvent alors être entreprises avec différentes hypothèses permettant de caler les caractéristiques géométriques (cote et largeur) des seuils déversants. Ces modélisations peuvent être assez complexes si on s'intéresse à la progression des eaux dans la zone protégée.

Par ailleurs, les éléments de conception évoqués dans cet article illustrent bien toute la difficulté de réalisation *a posteriori* d'un déversoir de sécurité pour un système d'endiguement. Cette situation est hélas rencontrée majoritairement en France où très peu de digues ont été dotées, à leur création, de déversoirs (ex. : digues de l'Agly [BRLI, Cemagref, 2002]). Dans ce contexte, la recherche en génie civil doit aussi s'intéresser à l'étude de solutions « alternatives » telles que les dispositifs de protection ou les traitements de surface des talus aval de digue qui permettraient, à moindre coût, d'améliorer significativement leur résistance à la surverse, sous une faible lame d'eau étalée sur une grande longueur. □

Résumé

Cet article présente, après la description d'un exemple, les principes de conception et de dimensionnement de déversoirs sur des digues de protection contre les crues.

Abstract

This article presents, after the description of an example, the principles of design and dimensioning of weirs on flood protection dike systems.

Bibliographie

BRLi, Cemagref, 2002, Étude hydraulique de l'Agly de Rivesaltes à la mer, Tome 1 : hydrologie, hydraulique et scénarios d'aménagement, *Rapport d'étude pour la DDE 66*.

GOUTX, D., 2003, Conception des endiguements longitudinaux : *Sollicitations hydrodynamiques*, Ponts Formation Édition Cycle aménagements fluviaux.

CIGB/ICOLD, 2003, Dams and floods, guidelines and cases histories, bulletin 125.

ROYET, P., MÉRIAUX, P., 2004, *Les déversoirs fusibles le sont-ils vraiment ?* Colloque technique CFGB 2004.

MALLET, T., ROYET, P., CAULT, J.-B., *Reconstruction de la digue d'Aramon après la crue de septembre 2002*, Colloque technique CFGB 2004.

GOUTX, D., MÉRIAUX, P., TOURMENT, R., *Conception hydraulique des déversoirs des endiguements de protection contre les inondations*, Colloque technique CFGB 2004.