



## Hausses fusibles sur déversoirs de barrages

Augmentation de la capacité utile des retenues ou de la sécurité des évacuateurs de crues

P. Royet  
G. Degoutte

La sécurité des barrages est un objectif primordial qui peut conduire à accroître la capacité des évacuateurs de crues. A l'opposé, les années sèches que l'on vient de connaître en France, l'augmentation des besoins et la diminution du nombre de sites potentiels de barrages amènent à rechercher des solutions pour accroître la capacité des retenues existantes. Bien sûr, il convient de ne pas diminuer pour autant la sécurité des ouvrages.

La présente note évoque trois types de techniques disponibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs et/ou pour augmenter la capacité utile des retenues; elle traite plus particulièrement de la technique des hausses fusibles, largement innovante, qui a fait l'objet d'un brevet déposé par la société GTM

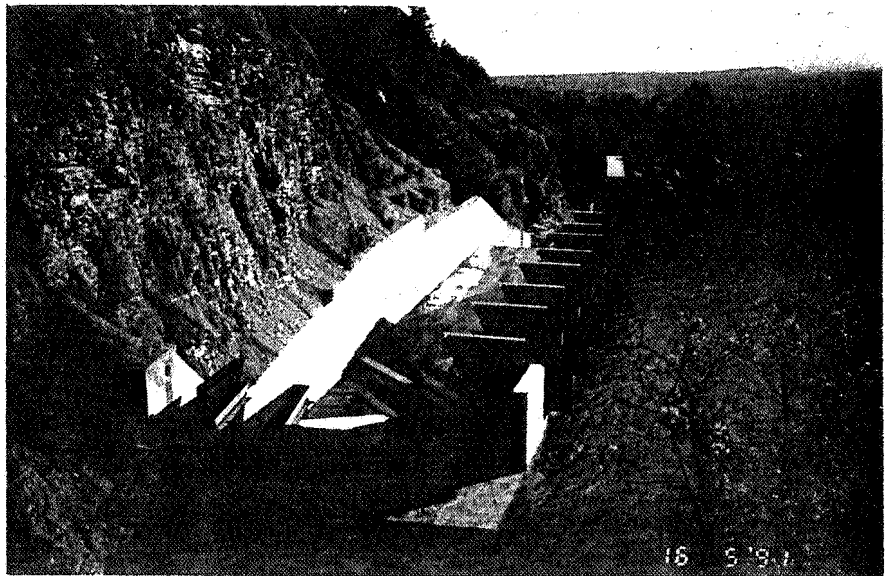


Photo 1 - Barrage de Lussas. Vue d'ensemble du déversoir équipé de ses dix hausses (CEMAGREF, Aix-en-Provence)

sous le nom commercial Hydro-plus. Le CEMAGREF a participé à la première application de ce procédé au barrage de Lussas

(Ardèche) (photo 1) et a suivi tout le programme d'études et d'essais préliminaires à la validation de cette technique.

Cette note se propose de décrire cette technique en traitant successivement du principe de fonctionnement, du dimensionnement et des dispositions constructives. Trois exemples récents d'utilisation des hausses fusibles viennent illustrer ces aspects en apportant également quelques données de coût.

## Objectifs de l'aménagement et solutions disponibles

### Augmentation de la capacité des barrages

La plupart des barrages destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation sont équipés d'un évacuateur de crues à seuil libre, ce qui représente certainement la meilleure solution pour des ouvrages non gardés. En effet, le fonctionnement d'un seuil libre est fiable en toutes circonstances, contrairement aux seuils vannés qui, malgré la redondance des systèmes de manœuvre, ne sont jamais totalement à l'abri de pannes. L'absence de parties mécaniques limite les opérations de surveillance et d'entretien à celles portant sur le génie civil.

La contrepartie de cette sécurité est la perte d'une tranche importante de retenue comprise entre le niveau normal des eaux (cote du seuil libre) et le niveau des plus hautes eaux exceptionnelles, ce dernier servant au dimensionnement du barrage. Cette tranche est généralement de l'ordre de 1 à 3 mètres. Elle représente un volume d'eau qui est couramment de 20 à 50 % de la capacité de la retenue, et qui est d'autant plus important que le barrage est situé dans une vallée large.

Tout système permettant pour un coût raisonnable de valoriser une partie de cette tranche supérieure du plan d'eau, tout en maintenant le même niveau de sécurité de l'ouvrage, paraît donc très attractif.

### Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues

Pour la plupart des barrages anciens, la révision de la crue de projet avec des données plus complètes et des méthodes modernes conduit souvent à augmenter la capacité de l'évacuateur de crues. De nombreuses solutions techniques sont envisageables.

Lorsque le barrage est doté d'un évacuateur à seuil libre, on peut penser bien sûr à abaisser ce seuil pour augmenter la charge hydraulique et donc le débit évacué, pour autant que l'écoulement ne soit pas perturbé par l'aval. Mais cet abaissement du niveau du seuil a une conséquence fâcheuse sur la capacité de la retenue qui est amputée de sa tranche supérieure.

Tout dispositif permettant d'améliorer la capacité d'un évacuateur à seuil libre sans pour autant diminuer la capacité utile de la retenue est donc intéressant.

### Trois solutions possibles

Dans les deux contextes exposés ci-dessus ou dans toute combinaison de ceux-ci, trois dispositifs sont envisageables :

- l'installation d'organes mobiles tels que clapets, vannes segment ou vannes secteur;
- la mise en place d'un boudin gonflable s'abaissant automatiquement en cas d'augmentation de la charge amont;
- la pose de hausses métalliques ou en béton, fusibles lors des grosses crues.

Mentionnons en outre pour mémoire les dispositifs à batardeaux que l'on enlève avant l'arrivée de chaque crue et les levées de terre fusibles, supposées érodées rapidement en cas de surverse; ces derniers dispositifs ne peuvent être considérés comme sûrs et sont donc à proscrire pour l'évacuateur principal.

L'installation de clapets ou vannes métalliques est tout à fait

classique. Elle permet un réglage fin et à volonté du niveau de la retenue et représente la solution à retenir lorsque l'on souhaite optimiser la gestion d'un barrage à buts multiples (écrêtement de crues, production électrique, fourniture d'eau). Cependant outre son coût, elle exige alimentation en énergie pour les manœuvres ainsi qu'une surveillance et un entretien très réguliers. Malgré l'installation de dispositifs de secours, une panne ne peut être exclue et la sécurité en crues ne peut donc être qualifiée de parfaite. Tout ceci conduit bien souvent à exclure des organes métalliques mobiles pour des barrages de moyenne dimension, non gardés et dépourvus d'alimentation électrique.

La solution du boudin gonflable présente une sécurité totale en cas de crue et n'exige une source d'énergie que pour le regonflage du boudin après la crue. Elle est décrite dans une note d'information technique du CEMAGREF du même cahier (Degoutte et al. 1992).

Un autre système présente des avantages similaires : il s'agit des hausses fusibles.

## Description et dimensionnement du système des hausses fusibles

### Principe de fonctionnement

L'idée de départ est d'obstruer le seuil sur une hauteur de l'ordre de 1 à 3 mètres par des éléments :

- qui sont autostables jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont;
- qui s'effacent automatiquement en cas de forte crue sans intervention humaine ni alimentation en énergie.

En contrepartie, les éléments qui se sont effacés ne se relèvent pas après la crue et doivent être remplacés pour rétablir le déversoir dans son intégrité.

Selon le niveau d'eau dans la retenue, les éléments de rehausse fonctionnent comme un barrage, un déversoir, ou un fusible (figure 1).

a) Lorsque le niveau de l'eau est inférieur ou égal au niveau d'arase des hausses, celles-ci fonctionnent comme un barrage. Chaque élément est largement autostable et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son poids propre, au poids de l'eau conte-

nue dans l'alvéole amont et à la butée en pied aval de la hausse.

b) Lorsque le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote d'arase des hausses, celles-ci fonctionnent comme un déversoir à surface libre, jusqu'à une certaine épaisseur de lame d'eau. La forme dite en labyrinthe de la partie supérieure des hausses permet d'allonger la longueur du seuil déversant qui peut être de l'ordre de quatre fois la longueur

du seuil d'origine. Pendant cette phase de fonctionnement, chaque élément reste largement autostable comme dans la phase précédente.

c) En cas de forte crue, au-delà d'une fréquence choisie, le niveau de l'eau atteint la cote d'entrée d'un puits par lequel l'eau pénètre dans une chambre à la base de l'élément. La sous-pression ainsi introduite sous l'élément modifie radicalement ses conditions de stabilité et provoque brutalement son basculement, libérant ainsi une brèche dans laquelle le niveau du seuil libre redevient celui du seuil initial dérasé.

Lorsque le seuil est équipé de plusieurs hausses, les cotes d'entrée des puits sont décalées de quelques centimètres, de façon à ce que les éléments puissent, si nécessaire, basculer les uns après les autres au fur et à mesure de la montée du plan d'eau. En cas de crue moyenne, un seul élément bascule, les autres restant en place.

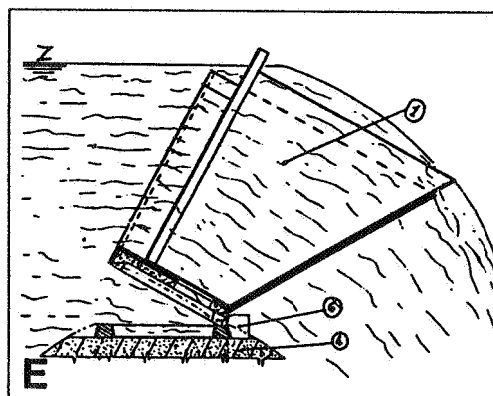
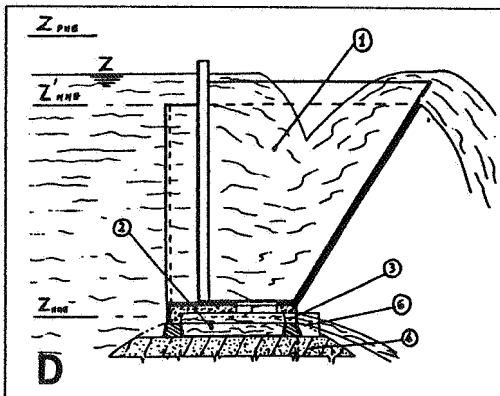
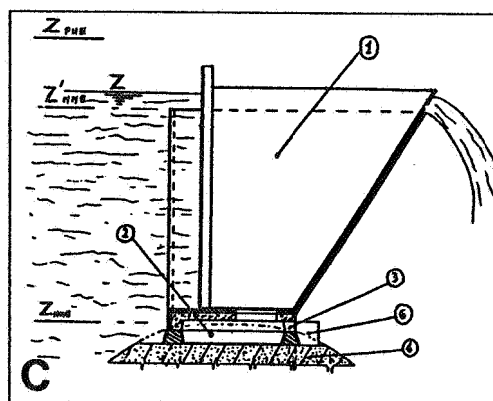
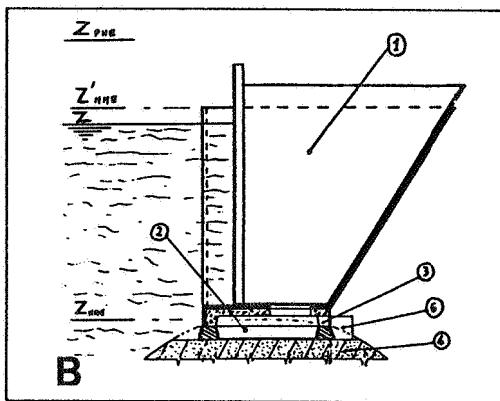
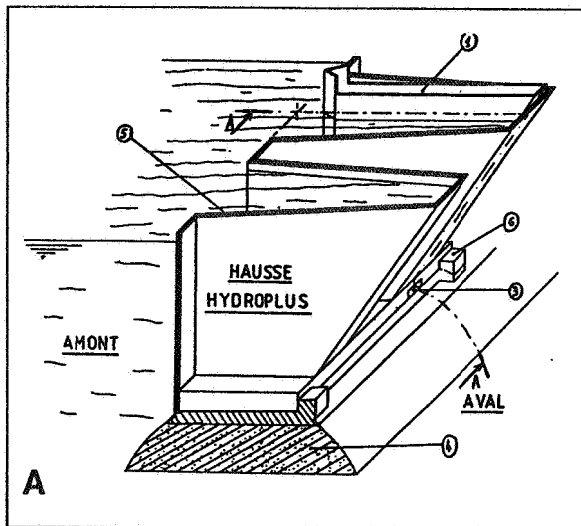


Figure 1 - Principe de fonctionnement des hausses fusibles

A. Vue perspective d'une hausse deux ondes avant déversement.

B. Coupe AA avant déversement.

C. Crue modérée avec déversement sur le labyrinthe.

D. Crue importante avec remplissage du puits et de la chambre.

E. Mise en pression et basculement de la hausse.

1. Puits
2. Chambre
3. Purge
4. Seuil dérasé
5. Labyrinthe
6. Butée

### Description détaillée

Les éléments de rehausse sont de dimensions standard, ce qui facilite les opérations d'installation et de remplacement après fortes crues et permet de traiter la plupart des situations courantes. Ainsi la hauteur des éléments varie de 0,50 à 2,50 m et leur longueur de 1 à 5 m, pour un poids unitaire variant de quelques centaines de kilogrammes à une dizaine de tonnes.

Le support de chaque hausse est constitué d'un cadre préfabriqué en béton armé scellé dans le seuil (photo 2), cadre sur lequel vient se poser la base de la hausse également préfabriquée en béton (photo 3). Sur cette base vient se fixer la partie supérieure de la hausse en tôles d'acier disposées sur un tracé en labyrinthe (photo 4). Les hausses de petite dimension peuvent être totalement en béton. La forme du support et de la base de la hausse permet de créer une chambre qui s'emplit pour une cote précise du plan d'eau, grâce à un puits d'alimentation. Différents joints assurent l'étanchéité, d'une part entre les hausses et leurs cadres supports et, d'autre part, entre les faces verticales des hausses.

Une purge vers l'aval évite toute mise en pression intempestive des chambres (par exemple par des fuites au niveau des joints). La section de cette purge est nettement inférieure à celle du puits alimentant la chambre de façon à provoquer à coup sûr la sous-pression en cas de déversement dans le puits.

d) Lorsqu'un ou plusieurs éléments ont basculé, le niveau de la retenue s'établit, à la fin de la crue, au niveau du seuil initial dérasé. Il faut alors venir remplacer les éléments effacés afin de retrouver la pleine capacité de la retenue. Si l'accès au seuil est aisé, le remplacement des éléments basculés ne pose pas de problèmes particuliers, compte tenu de la standardisation des hausses.

### Principes de dimensionnement

#### Dimensionnement hydraulique

Soit un barrage existant, à seuil libre de longueur  $L$ , arasé à une cote  $Z_{NNE}$  et pour lequel la crue de projet (période de retour 1.000 à 5.000 ans) induit en pointe une montée du plan d'eau à la cote  $Z_{PHE}$ . La charge maximale sur le seuil est donc :

$$h_{PHE} = Z_{PHE} - Z_{NNE}$$

a) Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique n'amène

pas à modifier le débit de la crue de projet, l'installation de hausses fusibles permet de récupérer une tranche utile de retenue de l'ordre de 75% de  $h_{PHE}$ .

Le nouveau déversoir est alors constitué d'un seuil labyrinthe d'environ  $4 \times L$  de longueur développée, arasé à la cote :

$$Z'_{NNE} = Z_{NNE} + 0,75 h_{PHE}$$

On détermine la cote d'entrée du premier puits de façon à ce que les crues les plus fréquentes (jusqu'à 20 à 50 ans de période de retour) ne provoquent le basculement d'aucun élément. Les cotes d'entrée des différents puits sont étagées entre la cote ainsi déterminée et une cote légèrement inférieure à la cote  $Z_{PHE}$  pour laquelle basculera le dernier élément.

Avec un tel principe de dimensionnement, le niveau des plus hautes eaux pour la crue de projet n'est pas modifié par rapport à la situation antérieure, ce qui ne change pas les conditions de sécurité de l'ouvrage.

b) Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique amène à modifier le débit de la crue de projet, et afin de ne pas modifier le niveau des plus hautes eaux, on peut être conduit à déraser significativement le seuil existant pour le passage de la crue du projet. La tranche disponible pour l'augmentation de capacité de la retenue par le système des hausses est donc légèrement diminuée par rapport à la situation précédente.

#### Dimensionnement mécanique

Le principe des hausses est de passer brutalement, pour une cote d'eau déterminée, d'une situation de stabilité largement assurée à une situation de nette instabilité. Lors du remplissage du puits et de la chambre, on modifie rapidement le système de forces auxquelles est soumise la hausse, par application d'une sous-pression sous sa base.

a) Avant remplissage de la chambre

Forces stabilisatrices :

- poids propre;
- poids d'eau dans l'alvéole amont;
- butée aval.

Forces de basculement :

- poussée hydrostatique sur la face verticale amont.

b) Après remplissage de la chambre

Forces stabilisatrices : idem.

Forces de basculement :

- poussée hydrostatique sur la face verticale amont;
- sous-pression sous la base de la hausse.

Pour tenir compte de la présence d'une purge de la chambre, on ne prend pas en compte dans les calculs la pleine sous-pression mais seulement 70 à 80% de cette dernière.

On peut définir le coefficient de sécurité  $Fr$  au renversement de l'élément comme étant le rapport entre le moment des forces stabilisatrices et le moment des forces de basculement telles que définies plus haut. Ces moments sont calculés par rapport à la butée de pied aval de l'élément.

Avec une telle définition de  $Fr$ , on obtient en général :

$Fr > 1,5$  avant remplissage du puits de la chambre;

$Fr < 0,7$  après mise en pression de la chambre.

Ceci donne toute assurance sur la fiabilité du système, aussi bien vis-à-vis de la stabilité avant remplissage de la chambre que vis-à-vis de l'occurrence du basculement après introduction de la sous-pression.

### Aspects particuliers

#### Dispositions constructives pour les déversoirs déjà en service

Dans ses angles éventuels et à ses extrémités, le seuil existant doit être aménagé de façon à présenter des piliers verticaux

contre lesquels viennent s'adapter les hausses par l'intermédiaire de joints étanches.

Sur toute sa longueur, le seuil est légèrement dérasé pour disposer d'une largeur d'assise suffisante et pour mettre en place les cadres préfabriqués en béton. Après scellement des cadres préfabriqués, le seuil se trouve reconstitué à sa cote d'origine (on a une cote différente si l'on recalcule une crue de projet différente). Des réservations sont ménagées dans le béton pour le logement des joints d'étanchéité des chambres et surtout du joint longitudinal.

Les hausses sont ensuite mises en place d'un seul bloc ou en plusieurs morceaux à l'aide d'un engin de levage par mise en contact des butées.

Il est donc indispensable qu'un engin de levage puisse accéder près du seuil, cet accès étant nécessaire non seulement pendant la construction de la rehausse, mais également pour le remplacement des éléments basculés en cas de forte crue.

### ***Influence sur les débits en aval***

Pour une crue donnée entrant dans la retenue, l'hydrogramme en aval du barrage est peu différent de celui obtenu avant rehaussement du seuil.

La seule différence tient au fait que la courbe des débits évacués présente, pour les très fortes crues, une partie montante en forme de marches d'escalier correspondant aux basculements successifs d'un certain nombre de hausses. Les à-coups de débits sont cependant faibles et admissibles pour l'aval. Le débit de pointe de la crue n'est pas modifié de façon significative.

### ***Evacuation des hausses basculées***

Lors d'une forte crue, les hausses basculées sont entraînées par le courant jusqu'à une zone

d'eaux calmes où elles vont s'échouer. Il convient cependant de vérifier qu'elles ne peuvent en aucun cas perturber l'écoulement de la crue au niveau du barrage ou à son aval proche.

Deux situations appellent une attention particulière :

- dans le cas d'un évacuateur comportant un coursier à surface libre, la largeur du canal doit être supérieure à la plus grande diagonale des hausses et il est préférable de n'avoir aucun tronçon du coursier en régime fluvial ;
- pour un évacuateur en puits, le puits et la galerie doivent être de diamètres supérieurs à la plus grande dimension des hausses et ne doivent présenter aucun point singulier susceptible de provoquer le blocage d'une hausse.

## **Conséquences sur le barrage d'une modification du niveau normal des eaux**

### ***Etanchéité du barrage***

Pour un barrage correctement conçu, l'étanchéité doit être assurée, y compris pour le niveau des plus hautes eaux. Ce dernier niveau n'étant pas modifié par le système des hausses fusibles, il n'y a théori-

quement aucune disposition complémentaire à prévoir sur ce point. Cependant, le système d'étanchéité du barrage doit être systématiquement vérifié dans le cadre du projet de rehaussement du seuil.

### **Sécurité au vandalisme**

Le vandalisme peut porter sur trois points :

- les joints entre éléments peuvent être endommagés par malveillance, ce qui n'a pas de conséquences sur la sécurité de l'ouvrage; le remplacement ou la réparation des joints sont faciles et peu coûteux;
- les purges des chambres peuvent être obturées par malveillance avec, comme conséquence, un basculement prématuré de l'élément concerné; une simple surveillance visuelle régulière de l'ouvrage permet de parer à une telle éventualité ;
- les puits peuvent être obturés par malveillance, bien que ce soit difficile vu leur dimension; cela entraînerait un retard dans le basculement de l'élément; ici aussi, une surveillance visuelle régulière permet de parer à cette éventualité.

### **Corps flottants, glaces**

Les essais sur modèles réduits (Péron S., Foulon G., 1990) ont montré que les corps flottants n'ont pas d'influence sur la stabilité et n'ont qu'une influence faible sur la précision du basculement. Les corps flottants transitent vers l'aval soit lors du déversement sur le seuil labyrinthe, soit lors de l'effacement d'un élément en crue. Les efforts liés aux poussées des glaces ne sont à prendre en compte que pour les lacs susceptibles d'être gelés sur une forte épaisseur.

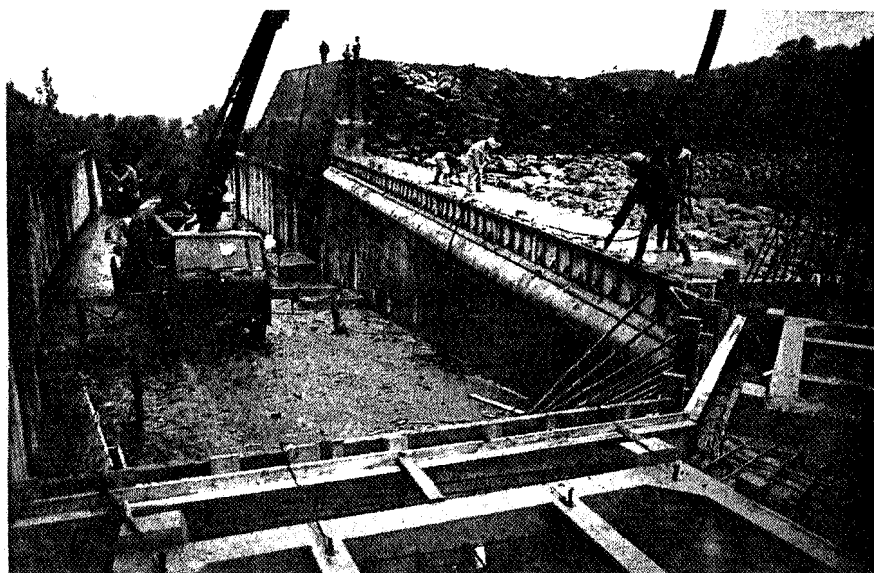


Photo 2 - Scellement des cadres préfabriqués sur le seuil préalablement dérasé (CEMAGREF Aix-en-Provence)

Deux situations peuvent en effet conduire à renforcer l'étanchéité :

- le dispositif original d'étanchéité était sous-dimensionné et le rehaussement va accroître ce sous-dimensionnement; c'est le cas par exemple d'un noyau arasé en-dessous du niveau des plus hautes eaux; le noyau devra alors être prolongé vers le haut ;
- l'analyse des débits de fuite en fonction de la cote du plan d'eau et leur extrapolation pour le futur niveau normal des eaux

conduisent à des débits non admissibles pour la sécurité ou jugés préjudiciables pour l'économie d'exploitation; l'étanchéité devra être renforcée en ses points de faiblesse si on est en mesure de les identifier (injections complémentaires en fondation, injections ponctuelles de zones fuyardes, paroi moulée dans un remblai homogène...).

### Drainage

En général, le dispositif de drainage d'un barrage est large-

ment surdimensionné, en ce sens qu'il permet l'évacuation d'un débit de fuite nettement supérieur à celui que l'on escompte. Il pourra le plus souvent accepter sans problèmes l'augmentation du débit des fuites consécutives à l'élévation du niveau normal de la retenue. Ce point reste cependant à vérifier au cas par cas.

Pour les barrages en remblai, l'élévation du niveau normal des eaux va se traduire par une montée de la ligne piézométrique qui peut être, dans certains cas, lourde de conséquences. Outre la diminution de la sécurité au glissement du remblai aval, on peut également craindre le développement de renards si la ligne piézométrique vient à affleurer le talus aval.

A ce titre, deux situations sont particulièrement dangereuses :

- pour un barrage en remblai équipé d'un drain cheminée dont la cote d'arase est significativement inférieure à la cote du niveau normal des eaux, on accroît considérablement le risque de contournement du drain par le haut, surtout si le remblai présente une forte anisotropie de perméabilité; il faut alors prolonger le drain de plusieurs mètres à sa partie haute, ce qui est une opération délicate ;
- pour un barrage en remblai équipé seulement d'un tapis drainant sous sa partie aval, la remontée de la ligne piézométrique risque de la faire affleurer au parement aval, en particulier pour un remblai anisotrope.

Le renforcement du dispositif de drainage est alors très délicat et parfois aléatoire. Le coût des dispositions à adopter (drains subhorizontaux, tranchées drainantes, épaulement aval par un remblai perméable) pourra parfois conduire à revoir totalement, voire à abandonner le projet de rehaussement du seuil de déversoir.

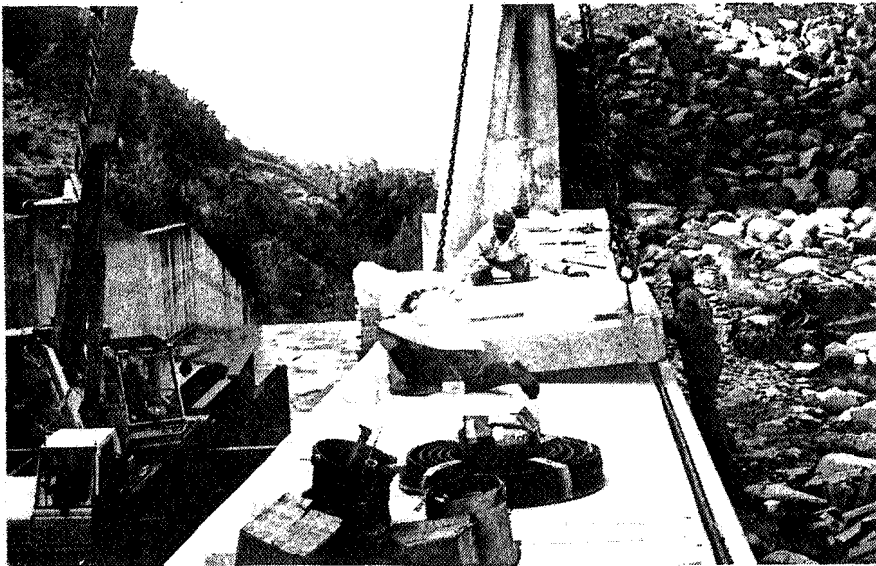


Photo 3 - Pose de la base d'une hausse, sur le seuil restauré. Remarquer, à gauche, les butées et, à droite, le joint longitudinal dans sa rainure (CEMAGREF Aix-en-Provence)

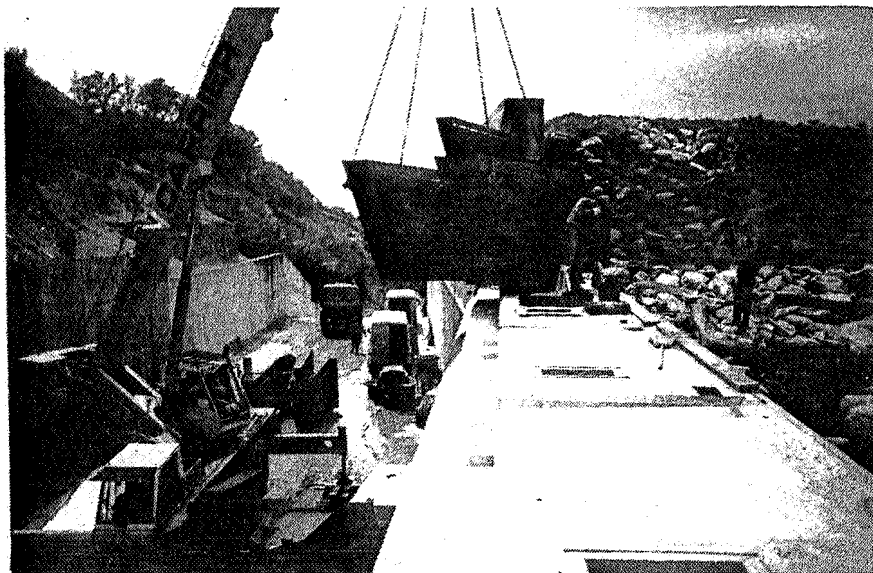


Photo 4 - Pose de la partie supérieure de la première hausse. Remarquer au premier plan l'orifice de la chambre de mise en sous pression de la hausse (CEMAGREF Aix-en-Provence)

## Applications du procédé des hausses fusibles

### Evacuateur latéral à seuil libre - Barrage de Lussas (Ardèche) (photos 1 à 4)

Le barrage de Lussas est le premier ouvrage rehaussé par ce système. Il s'agit d'un barrage en remblai avec noyau étanche dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- hauteur au-dessus de la fondation : 18 m;
- cote de la crête : 117,3;
- niveau normal initial de la retenue : 113,0;
- volume initial de la retenue : 320.000 m<sup>3</sup>;
- crue de projet : 250 m<sup>3</sup>/s;
- déversoir latéral à seuil libre : 36 m de longueur;
- lame d'eau pour la crue de projet : 2,5 m.

Après la pose des hausses fusibles, les caractéristiques modifiées sont les suivantes :

- volume de la retenue : 450.000 m<sup>3</sup> (+ 40%);
- niveau normal de la retenue : 115,00 (+ 2,0 m).

Après dérasement du seuil existant sur 15 cm, dix éléments ont été posés, chacun de 2,15 m de hauteur, 3,5 m de longueur et 5,4 t de masse.

Le noyau étanche, arasé à l'origine à la cote 114,20, a dû être rehaussé. Une tranchée a été creusée à la pelle mécanique jusqu'à recouper la partie supérieure du noyau et a été emplie de coulis bentonite-ciment. Enfin, quelques drains ont été forés dans le radier de la "boîte" du déversoir, pour contrer le risque, de soulèvement consécutif à l'augmentation des sous pressions sous le radier.

L'ensemble des travaux a duré moins de trois mois; le coût total a été de 1.250.000 F HT., soit 9,6 F/m<sup>3</sup> supplémentaire stocké. Ces chiffres n'ont qu'une valeur

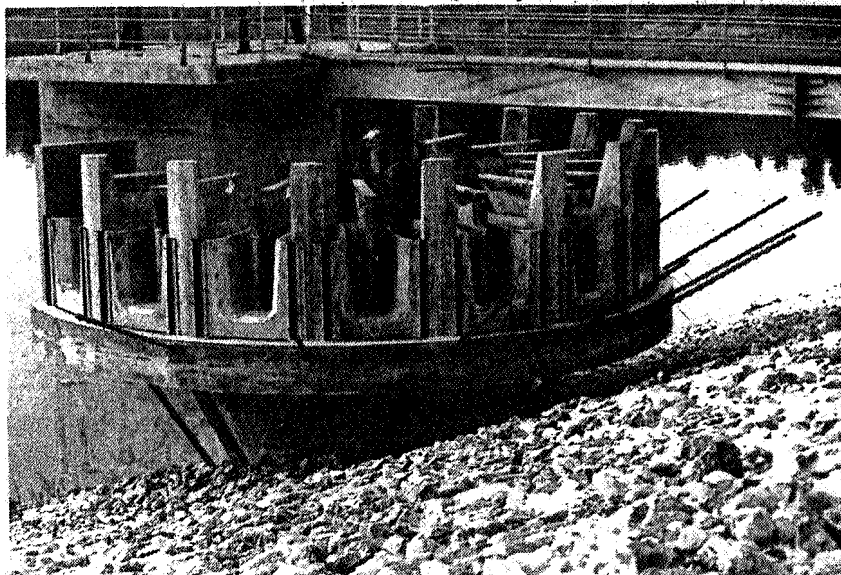


Photo 5 - Vue du déversoir équipé de ses douze hausses (GTM) (CEMAGREF Aix-en-Provence)

indicative, car il s'agissait d'un ouvrage prototype.

### Evacuateur tulipe - Barrage du Gouyre (Tarn-et-Garonne) (photo 5)

Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes :-

- cote de la crête : 130,0;
- hauteur au-dessus de la fondation : 19 m;
- niveau normal initial de la retenue : 127,9;
- volume initial de la retenue : 2.900.000 m<sup>3</sup>;
- crue de projet après laminage : 35 m<sup>3</sup>/s;
- évacuateur tulipe à seuil libre : 12 m de longueur;
- lame d'eau pour la crue de projet : 1,5 m.

Après la pose de douze hausses monobloc en béton sur la périphérie de la corolle, les caractéristiques suivantes ont été modifiées :

- niveau normal de la retenue : 128,7 (+ 0,80 m);
- volume de la retenue : 3.360.000 m<sup>3</sup> (+ 16 %).

La dimension des hausses (h = 1,0 m; l = 1,0 m) permet leur passage sans risque de blocage

dans le puits et la galerie. Les têtes des puits sont étagées entre les cotes 129,09 et 129,20, le premier basculement étant provoqué pour la crue laminée de période de retour 20 ans environ.

La capacité utile de la retenue est accrue de 460.000 m<sup>3</sup> (+ 16 %) et on valorise ainsi 53 % de la tranche d'eau initialement affectée au transit de la crue de projet. La capacité maximale de l'évacuateur reste inchangée car elle est limitée par la mise en charge de la galerie.

Le remblai n'a nécessité aucun renforcement particulier. Les travaux ont duré au total deux mois. Le coût total de l'aménagement a été de 1.515.000 F HT, soit un coût de 3,3 F/m<sup>3</sup> supplémentaire stocké.

### Evacuateur tulipe - Barrage neuf du Tordre (Tarn-et-Garonne)

L'installation de hausses fusibles a été proposée en variante. La pose des hausses n'a pas été réalisée dans la première étape de travaux, mais le seuil de la tulipe a été dès le départ conçu et réalisé pour recevoir ultérieurement ces hausses.

Par rapport à la solution de base (tulipe classique), la variante d'installation de hausses fusibles permettra un gain d'environ 600.000 m<sup>3</sup> sur la capacité utile de la retenue (+ 20 %) et améliorera légèrement la capacité d'évacuation du déversoir à niveau des plus hautes eaux identique. Les huit hausses monobloc de 1 m de hauteur et 1 m de largeur seront réparties sur la périphérie de la corolle.

Les caractéristiques du barrage après pose des hausses seront les suivantes :

- niveau normal de la retenue : 132,3 (+ 0,80 m par rapport à la solution de base);
- volume de la retenue : 3.300.000 m<sup>3</sup> (+ 20 % par rapport à la solution de base).

Les têtes de puits seront étagées entre les cotes 132,55 et 132,62, le premier basculement étant provoqué par la crue cinquantennale écrêtée.

Le surcoût prévisionnel de la variante est de 970.000 F HT., soit 1,6 F/m<sup>3</sup> supplémentaire stocké.

## Conclusion

Que ce soit pour améliorer la capacité d'un évacuateur sans perdre sur le volume de la retenue, ou pour augmenter le volume d'une retenue sans perdre sur la capacité de l'évacuateur, le système des hausses

fusibles doit être envisagé. Comme le montre l'exemple du barrage du Tordre, ce système peut également équiper des projets neufs pour lesquels il permet de diminuer la tranche "perdue" nécessaire au transit des crues.

La sécurité de ce système peut être considérée comme totale ainsi que l'ont montré les nombreux essais sur modèles réduits. Par contre, en cas de très forte crue provoquant le basculement d'une ou plusieurs hausses, il faut venir remplacer les éléments basculés afin de restaurer l'ouvrage dans son intégrité. Cela ne se produira cependant que rarement : statistiquement, une fois tous les vingt à cinquante ans.

Ce procédé apparaît économiquement très intéressant pour l'augmentation de la capacité utile des retenues existantes. Le prix de revient au mètre cube supplémentaire stocké est évidemment très variable suivant la dimension du déversoir et la superficie du plan d'eau. On peut citer une fourchette de 2 à 10 F/m<sup>3</sup>, les coûts les plus élevés correspondant à des retenues de faible surface avec de fortes crues du projet. Les coûts d'exploitation correspondent essentiellement au remplacement des hausses basculées lors des fortes crues.

L'économie du projet de rehaussement peut être remise

en cause lorsque l'élévation du niveau de la retenue impose sur un barrage en terre de coûteux travaux de renforcement des dispositifs d'étanchéité et/ou de drainage.

Enfin comme pour tous les travaux importants entrepris sur des barrages en service, il convient d'être particulièrement attentif à l'auscultation de l'ouvrage. Lors de l'établissement du projet de rehaussement, l'auscultation permet de juger de l'efficacité de l'étanchéité et du drainage du barrage, d'estimer son comportement avec un niveau d'exploitation plus élevé et de prescrire les éventuels travaux de confortement, y compris concernant le dispositif d'auscultation. Basée essentiellement sur des mesures de piézométrie et de débits de fuite, l'auscultation permettra de vérifier après travaux que le barrage a bien le comportement attendu à sa nouvelle cote d'exploitation. □

*Division Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation groupement d'Aix-en-Provence*

### Remerciements

La rédaction de cet article a été rendue possible grâce à la collaboration de GTM, inventeur du procédé Hydroplus, DDAF de l'Ardèche, conducteur d'opération pour le barrage de Lussas, SEEE, maître d'œuvre des travaux à Lussas, DDAF du Tarn-et-Garonne, conducteur d'opération pour les barrages du Gouyre et du Tordre, SAFEGE, maître d'œuvre des barrages du Gouyre et du Tordre.

### Bibliographie.

Péron S., Foulon G. août 1990 - Etude sur modèle réduit de seuils fusibles procédé Hydroplus, 121 p., six annexes EDF - DER.  
GTM. décembre 1990 - Barrage de Lussas - Augmentation de la capacité de la retenue. Dossier d'APD.  
Degoutte G. août 1990 - Procédé Hydroplus, Rapport d'expertise technico-économique à l'ANVAR, 17 p.

Royet P. Barrage de Lussas, juillet 1990 - Analyse du comportement du barrage et dispositions constructives liées au rehaussement, 10 p. et annexes, CEMAGREF.  
GTM, octobre 1991 - Barrages du Tordre et du Gouyre. Dossier Technique Hydroplus, 2 p. et 4 annexes.  
Degoutte G., Royet P., Alonso E. 1992 - Les seuils souples 8 p., Infos Techniques du CEMAGREF.

*Pour obtenir des informations complémentaires, on pourra consulter les auteurs : Paul Royet et Gérard Degoutte, groupement d'Aix-en-Provence, Le Tholonet, B.P. 31, 13612 Aix-en-Provence CEDEX 1, Tél : 42.66.93.10.*

Extrait des Informations Techniques du CEMAGREF, Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. Rédaction administration : CEMAGREF-DICOVA, BP 22, 92162 Antony Cedex. Tél. : (1) 40.96.61.21. 4 numéros par an - Uniquement sur abonnement à «Technique et Documentation», 94230 Cachan. Tél. : (1) 47.40.67.00