

LES COURS D'EAU LATÉRAUX COMME AGRESSEURS EXTERNES : UN ENJEU SÛRETE SPECIFIQUE AUX CANAUX DE LA DURANCE

Lateral rivers as external aggressors: a safety issue specific to the Durance canals

Bruno DAUMAS, Nicolas LEBRUN, Thomas VIARD, Vanessa MARTIN, Jean-Robert COURIVAUD
EDF-CIH, Savoie Technolac, 4 allée du Lac de Tignes, 73290 La motte-Servolex
bruno.daumas@edf.fr; nicolas-jean-claude.lebrun@edf.fr; thomas.viard@edf.fr; vanessa-audrey.martin@edf.fr; jean-robert.courivaud@edf.fr

David PENOT
EDF-DTG, 134 et 200 Chemin de l'Étang, 38950 Saint-Martin-le-Vinoux
david.penot@edf.fr

MOTS CLEFS

Canal, cours d'eau latéraux, aléa hydrologique, très petit bassin versant, hydrogramme de crue, risques géotechniques, ouverture de brèche

KEY WORDS

Canal, lateral rivers, hydrological hazard, very small watershed, hydrograph, geotechnical risks, breach opening

RÉSUMÉ

La rivière Durance a fait l'objet d'un aménagement hydroélectrique sur 200 km entre le barrage de Serre Ponçon et la mer Méditerranée par la construction de canaux et d'une quinzaine d'usine. Ces 200 km de canaux ont, entre autres, comme spécificité d'avoir été terrassés sur la plus grande partie de leur linéaire à flanc de colline. Se faisant, ils recoupent plusieurs centaines de cours d'eau latéraux, permanents ou temporaires, représentant des bassins versants de quelques hectares à quelques centaines de km². Ils sont dénommés BVL (Bassin Versant Latéraux).

Lors de la réalisation des EDD de ces canaux (qui sont bien sûr considérés comme des barrages au sens de la réglementation), les crues de ces BVL sont considérées comme des agresseurs externes. Afin d'étudier leurs impacts sûreté sur les canaux, de nombreux développements méthodologiques ont été menés dans les domaines de l'hydrologie, l'hydraulique et la géotechnique, compte tenu de leur nombre (plusieurs centaines), de leur diversité de surface (de quelques hectares à quelques centaines de km²) et du nombre de cas de charge à étudier (temps de retour de 10 ans à 10 000 ans).

Ces développements techniques, pour certains toujours en cours, permettent d'apporter une vision précise et quantifiée des risques sûreté apportés par les crues des BVL sur les canaux de la Durance.

Enfin, il paraît certain que les méthodologies déployées sont tout à fait applicables à d'autres aménagements de grand linéaire recoupant des cours d'eau latéraux, qu'ils soient hydroélectriques ou non, comme les remblais routiers et ferroviaires. En effet, les mécanismes qui régissent les crues des cours d'eau latéraux (pluies, écoulements) et les mécanismes de rupture de ces remblais (érosion interne, érosion externe et perte de stabilité) sont les mêmes.

ABSTRACT

The Durance River has been the subject of hydroelectric development over a 200 km stretch between the Serre Ponçon dam and the Mediterranean Sea through the construction of canals and about fifteen power plants. These 200 km of canals have the particularity of being excavated along hillsides for most of their length. In doing so, they intersect several hundred lateral watercourses, both permanent and temporary, representing catchment areas ranging from a few hectares to several hundred km². These are referred to as « BVL » (Lateral Watershed).

During the design of these canals (which are considered dams according to regulations), floods from these lateral watersheds are considered as external aggressors. To study their safety impact on the canals, numerous methodological developments have been carried out in the fields of hydrology, hydraulics, and geotechnics, given their large number (several hundred), diverse surface areas (from a few hectares to several hundred km²), and the range of scenarios to be studied (return periods from 10 years to 10,000 years).

These ongoing technical developments provide a precise and quantified understanding of the safety risks posed by BVL floods on the Durance canals. Furthermore, it appears that the methodologies deployed are entirely applicable to other large linear projects intersecting lateral watercourses, whether hydroelectric or not, for example, road and rail embankments. After all, the mechanisms governing the flooding of lateral watercourses and the mechanisms of rupture of these embankments (internal erosion, external erosion and loss of stability) are the same.

1. L'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE DE LA DURANCE ET LES ENJEUX SPECIFIQUES SURETE DES COURS D'EAU LATERAUX

La rivière Durance, et son principal affluent le Verdon, sont des puissants affluents rive gauche du Rhône qui était connu pour ses crues dévastatrices et ses étiages sévères aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècle.

Au début des années 1960, un vaste programme d'aménagement hydraulique et hydroélectrique est engagé pour réguler les débits de la Durance et du Verdon, assurer l'irrigation de l'ensemble du territoire, distribuer de l'eau potable à une grande partie de la Provence et produire de l'électricité. De 1963 à 1975, sont mis en service le plus grand réservoir artificiel d'Europe (Serre Ponçon 1,2 milliard de m³ sur la Durance), en tête d'aménagement, et 200 km de canaux qui permettent de faire transiter jusqu'à 250 m³/s jusqu'à la méditerranée. Ces canaux sont entrecoupés d'une quinzaine d'usines hydroélectriques pour une puissance totale d'équipement de 2 000 MW. Par ailleurs, ils sont munis de très nombreuses prises d'eau agricoles et d'eau potables pour un débit estival atteignant 100 m³/s.

Ces 200 km de canaux ont, entre autres, comme spécificité d'avoir été terrassés sur la plus grande partie de leur linéaire à flanc de colline. Se faisant, ils recoupent plusieurs centaines de cours d'eau latéraux, permanents ou temporaires, représentant des bassins versants de quelques hectares à quelques centaines de km². Ils sont dénommés BVL (Bassin Versant Latéraux). Le rétablissement de l'écoulement de ces cours d'eau est réalisé soit par-dessous le canal (au travers d'un ouvrage en béton armé dénommé génériquement « ovoïde » quel que soit sa forme), soit par-dessus grâce à un pont bêche, soit le BVL s'écoule directement dans le canal. Ce dernier type de rétablissement concerne plus particulièrement les plus petits bassins versants (de quelques hectares à quelques centaines d'hectares maximum) et qui sont les plus nombreux.

Lors de la réalisation des analyses de sûreté des canaux (qui sont considérés comme des barrages au sens de la réglementation française sur les barrages) dans le cadre de l'élaboration de leur EDD, les crues de ces BVL sont considérées comme des agresseurs externes potentiels pouvant conduire à la création d'une brèche (cf. figure 1 pour la position générique d'un ovoïde et l'exemple de rupture d'un remblai au droit d'un ovoïde). Afin d'étudier le plus justement possible leurs impacts sûreté sur les canaux, de nombreux développements méthodologiques ont été menés dans les domaines de l'hydrologie, l'hydraulique et la géotechnique.

Ainsi, la méthodologie générale employée se divise en 3 grandes étapes :

- La première concerne la détermination de l'aléa hydrologique qui nécessite des méthodes différentes pour les BVL de grande taille et ceux plus petits (limite vers 10 km²). De plus, l'estimation des aléas se fait sur une plage de temps de retour s'étalant de 10 ans à 10 000 ans afin de couvrir tous les cas d'analyse de sûreté demandés dans une EDD. Enfin, les aléas sont déterminés pour un BVL seul, indépendamment des autres (l'approche dite « mono BVL ») et pour l'ensemble des BVL d'un même canal (l'approche dite « crue concomitante »), afin de pouvoir estimer le risque de débordement du

canal dû à une conjonction de crues de l'ensemble des BVL d'un même canal (quel que soit leur mode de rétablissement, par-dessous, par-dessus et directement). En effet, pour un BVL donné et un temps de retour donné, la crue « mono BVL » est plus importante que la crue « concomitante », car l'intensité de pluie prise en compte est plus forte (plus la surface est petite, plus l'intensité est forte).

- Ensuite, l'analyse hydraulique des écoulements permet de prendre en compte les risques embâcle et transport solide afin de déterminer pour chaque temps de retour étudiés le niveau d'eau atteint contre les remblais, le risque de débordement vers l'intérieur et vers l'extérieur du canal, le temps d'application des chargements hydrauliques, etc....
- Enfin, l'analyse géotechnique, à partir de la liste des mécanismes de rupture potentiels et des cas de charge hydraulique, évalue les probabilités (temps de retour) d'apparition d'une brèche. Compte tenu du très grand nombre de combinaisons possibles (mode de rupture x cas de charge hydraulique), cette étape nécessite la mise en œuvre d'approches globales afin de concentrer les analyses sur les cas les plus critiques.

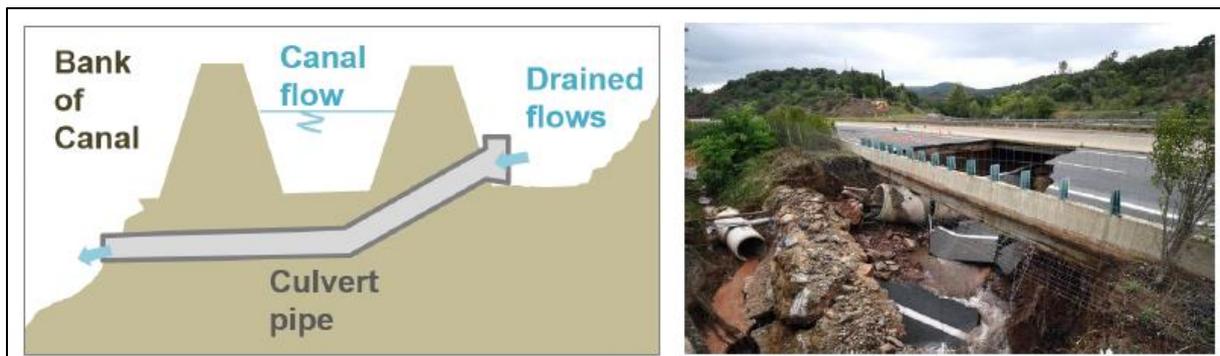


Figure 1 - Schéma de principe d'un ovoïde passant sous un canal et cas de rupture d'un remblai (autoroute française) muni d'un ovoïde à la suite d'une crue du cours d'eau latéral

2. L'ALEA HYDROLOGIQUE DES COURS D'EAU LATÉRAUX : SPECIFICITES ET DEFIS METHODOLOGIQUES

2.1. L'estimation de l'aléa hydrologique sur des bassins versant latéraux de tailles très différentes

Les bassins versants recoupés par les canaux de la Durance sont de tailles très différentes, s'échelonnant de quelques hectares, voire moins, à quelques centaines de kilomètres carré. Plus de 80% des bassins versants ont une surface inférieure à 10 km² (cf. figure 2).

Pour les bassins versants latéraux qui ont une taille en général de moins de 10 kilomètre carré, l'estimation de l'hydrologie peut s'avérer difficile. Les approches hydrologiques classiques du type GRADEX ou SCHADEx, applicables pour estimer le risque crues sur des bassins versants plus grands, montrent leurs limites. En effet, dès que la surface des bassins versants est plus faible, les processus hydrologiques à l'origine des forts débits se rapprochent de ce que l'on peut observer dans le domaine de l'hydrologie urbaine.

Ainsi, il a été décidé d'utiliser la méthode GRADEX pour les bassins versants supérieurs à 10 km² environ et de mettre en œuvre une méthodologie spécifique et dédiée pour les plus petits bassins versants qui puisse prendre en compte leurs spécificités et le besoin d'obtenir des temps de retours élevés. Cette méthodologie se déroule en deux temps : l'estimation de l'aléa pluie par la construction de hyétogrammes, puis leur transformation en hydrogramme de crue prenant en compte le laminage possible en tête amont des ovoïdes et les risques embâcle et transport solide.

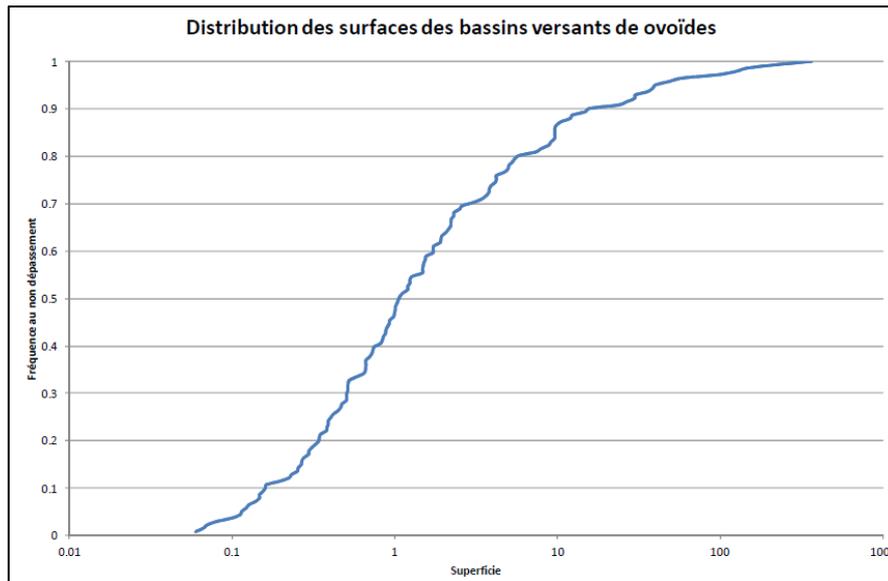


Figure 2 – distribution des superficies (km²) des bassins versant des ovoïdes de l'aménagement de la Durance

2.2. Détermination de l'aléa pluie sur les petits bassins versant latéraux

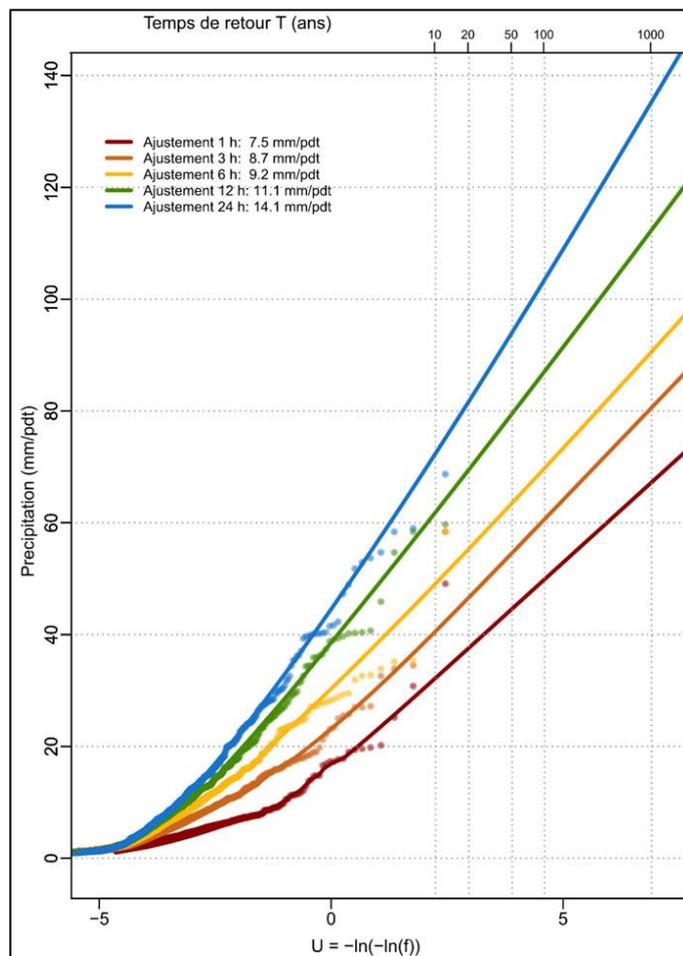


Figure 3 - Ajustements régionaux pour des précipitations de 24 heures à une heure

L'estimation de l'aléa pluie repose sur la construction d'un panier de voisinage homogène sur lequel on réalise un ajustement local-régional par saison. Selon la disponibilité des postes, ce travail peut être réalisé sur des durées allant du pas de temps horaire au pas de temps journalier ou bien, un pas de temps 6 minutes. L'échantillon de pluies pour l'ajustement régional d'une saison donnée est constitué en regroupant les échantillons de pluie de chacune des stations du panier ramenés à la moyenne de l'échantillon d'un témoin local souvent choisi pour sa proximité au site d'intérêt. La loi marginale utilisée pour chaque sous échantillon est une loi exponentielle.

Des courbes IDF s'appuyant sur la formulation de Montana sont ainsi construites sur ces échantillons et peuvent être extrapolées vers des durées plus courtes si nécessaire (en pointillé sur la figure 4). La pertinence de ces extrapolations a fait l'objet d'études minutieuses et est au cœur de la méthode [1]. Cette méthode a pu s'appuyer sur l'observatoire de Draix de l'INRAE (situé à proximité) qui possède des enregistrements à pas court (de l'ordre de la minute), et sur une période longue, qui a permis de valider cette extrapolation pour les autres pluviomètres de la région.

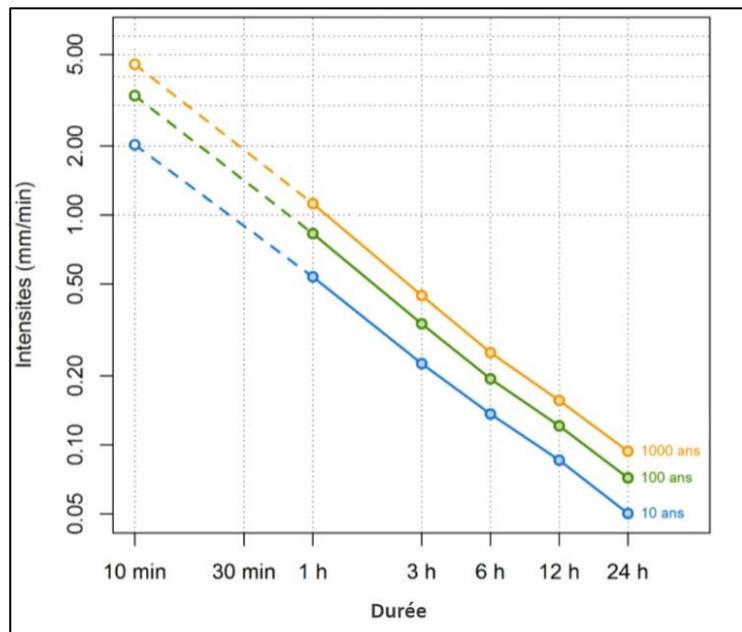


Figure 4 - Courbes Intensité-Durée-Fréquence obtenue par l'approche régionale

Le hyétogramme de période de retour T est déterminé au pas de temps de résolution de 10 minutes en commençant par le pic puis en respectant les volumes de pluies pour toutes les durées sur une durée globale adaptée à la dynamique des pluies (hyétogrammes en pointillés sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le hyétogramme est supposé symétrique autour de sa pointe.

Les pluies efficaces représentent la partie des pluies brutes précipitées qui vont réellement contribuer à l'écoulement. Les pluies efficaces P_E s'expriment souvent en fonction des pluies brutes P en tenant compte de pertes initiales I_a qui représentent la capacité d'absorption du sol (déficit hydrique) avant l'épisode **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :

$$P_{E(d)} = \frac{P^2(d)}{P(d) + I_a(d)}$$

Avec ce modèle SCS, l'ensemble des pertes sur un épisode ne peut dépasser une valeur maximale représentant la capacité maximale à partir de laquelle le sol devient saturé et toute pluie brute supplémentaire est totalement efficace. Cette valeur dépend des caractéristiques et de l'état hydrologique du bassin. Elle possède une moyenne sur laquelle, on peut s'appuyer pour lier les quantiles extrêmes de pluie et d'écoulement. Cette estimation peut être réalisée via des témoins de pluie-débit locaux ou avec l'approche du Curve Number.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** synthétise les résultats des hyétogrammes efficaces pour différentes périodes de retour.

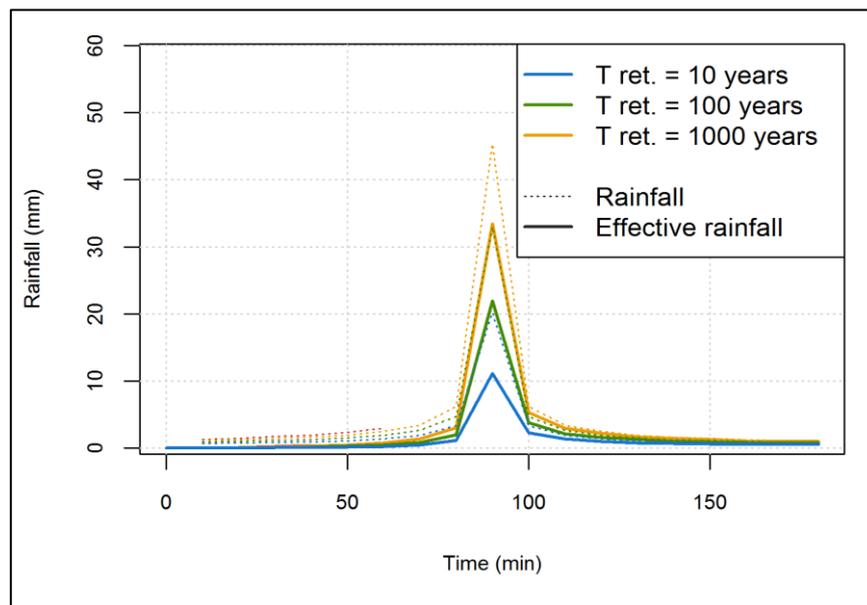


Figure 5 - Hyétochromes de période de retour T à une résolution 10 minutes

2.3. Les hydrogrammes de crue pour les petits bassins latéraux

L'intégralité du hyétochromes efficace ruisselle. Il faut donc déterminer une fonction de transfert avec conservation du volume pour déterminer l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant, au droit de l'ovoïde, du pont bêche ou du déversement direct. La thèse de Benjamin Graff [2] aborde aussi cette problématique en analysant l'observatoire de Draix proche de la Durance. Étant donné le peu d'informations disponibles pour les bassins versants de l'étude, une fonction de transfert simple de type hydrogramme unitaire symétrique défini uniquement par son temps de montée peut être utilisé. Le modèle conceptuel global GR3H [3] fournit une expression analytique en t^2 permettant de concentrer la pluie efficace à transférer autour du pic de l'hydrogramme (cf. figure 6).

$$\begin{aligned}
 t \in [0; TM], \quad q(t) &= \frac{3 \cdot t^2}{2 \cdot TM^3} & / \\
 t \in [TM; 2 \cdot TM], \quad q(t) &= \frac{3 \cdot (2 \cdot TM - t)^2}{2 \cdot TM^3} \\
 \text{sinon,} \quad q(t) &= 0
 \end{aligned}$$

Avec t – Temps [min], q – Débit [m^3/min] et TM – Temps de montée [min]

Les temps de montée peuvent être choisis par analogie avec les bassins versants de Draix, par observation du boisement de l'ensemble du BVL sur des vues satellite : du boisement faible (Laval) – 20 minutes, jusqu'au boisement conséquent (Brusquet) – 60 minutes.

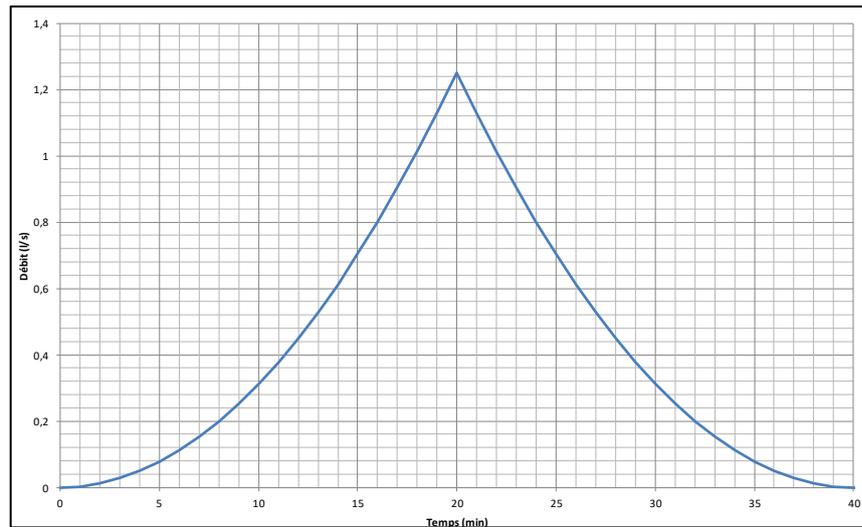


Figure 6 - Hydrogramme unitaire (pour 1 m³ écoulé en 1 pas de temps de 10 minutes) - Temps de montée : 20 minutes

2.4. L'estimation du risque débordement dans et en dehors des canaux

Une fois les hydrogrammes de crue connus au droit des ovoïdes, le calcul de leur débitance en eau claire ne pose pas de difficultés particulières. En effet, la théorie des ponceaux peut être appliquée [4]. Cette théorie est mise en pratique selon la méthodologie développée par l'université de Laval [5].

Aucune information historique n'est disponible pour évaluer pendant les crues l'impact des embâcles et du transport solide (cf. figure 7). Le retour d'expérience post-crue permet toutefois de mettre en évidence que des ovoïdes ont déjà été partiellement obstrués par des embâcles et totalement obstrués par du transport solide.



Figure 7 - Embâcles et transport solide dans les ovoïdes

Ainsi, une méthode en deux étapes séparant les risques embâcle et transport solide a été élaborée afin d'évaluer finement l'impact :

Évaluation de la sensibilité au risque. Par analogie avec d'autres méthodes concernant le risque embâcles [6], des logigrammes sont mis en place prenant en compte les incidents notables de la vie de l'ouvrage, la sensibilité de son bassin versant, la forme du thalweg, les protections existantes, l'entonnement de l'ouvrage et les observations de terrains. Ces logigrammes permettent à partir de questions simples de savoir si un ovoïde est sujet au risque embâcle, au risque transport solide ou aux deux,

Application forfaitaire des conséquences en cas de sensibilité. Si un ovoïde est supposé sujet au risque embâcle, sa capacité de transit est forfaitairement divisée par 2 et s'il est sujet au risque transport solide, son obstruction est supposée une demi-heure avant le passage de la pointe de crue entraînant un stockage de la crue et du transport solide (défini selon un pourcentage du volume d'eau) en amont de l'ovoïde.

Enfin, des calculs d'écroulement de crues sont réalisés en « mono-BVL » et en crue « concomitante » au droit de chaque ovoïde afin d'estimer les volumes, débits, temps de surverse éventuels dans le canal, ainsi que les hauteurs d'eau devant les digues. Les études de venue d'eau dans le canal sont également réalisées pour les « ponts bêche » qui sont des passages dans de petits canaux suspendus pour vérifier le risque de déversement dans le canal. Les BVL à déversement direct dans le canal ne sont pas étudiés en « mono BVL » car prévus et dimensionnés pour déversés directement dans le canal. Toutefois, ils sont pris en compte dans l'analyse en crue « concomitante ». Ensuite, la somme de tous les débits unitaires entrant dans le canal est réalisée afin d'évaluer la capacité du canal à stocker le surplus d'eau et donc de conclure au risque de surverse et d'ouverture de brèche.

Une simulation complémentaire peut aussi être réalisée pour connaître la dynamique des écoulements entrant dans le canal si nécessaire.

3. EVALUATION DES RISQUES DE RUPTURE DES CANAUX (OUVERTURE DE BRECHES)

3.1. Mécanismes de rupture considérés

Le fonctionnement des barrages latéraux soumis à une crue d'un BVL est spécifique et l'analyse comportementale de l'ouvrage fournit des informations souvent limitées. L'ouvrage assure néanmoins une fonction de rétention de l'eau contenue dans le talweg du BVL, alors que l'ensemble de ses organes, de sûreté notamment, présentent un fonctionnement différent de celui qui leur a été assigné par conception : les masques amont n'assurent pas de fonction d'étanchéité, les systèmes de drainage peuvent contribuer à propager les pressions dans l'ouvrage etc.

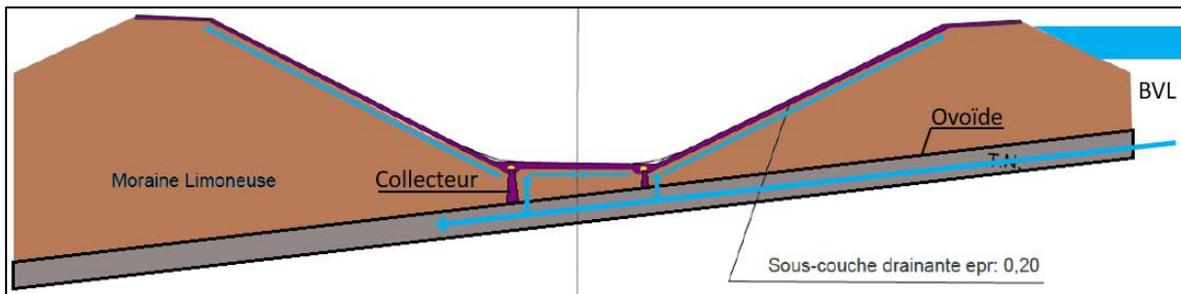


Figure 8 – Propagation des pressions depuis le BVL via le système de drainage pour un ouvrage à masque amont

Les différents mécanismes de ruptures principaux considérés sont localisés sur la figure suivante :

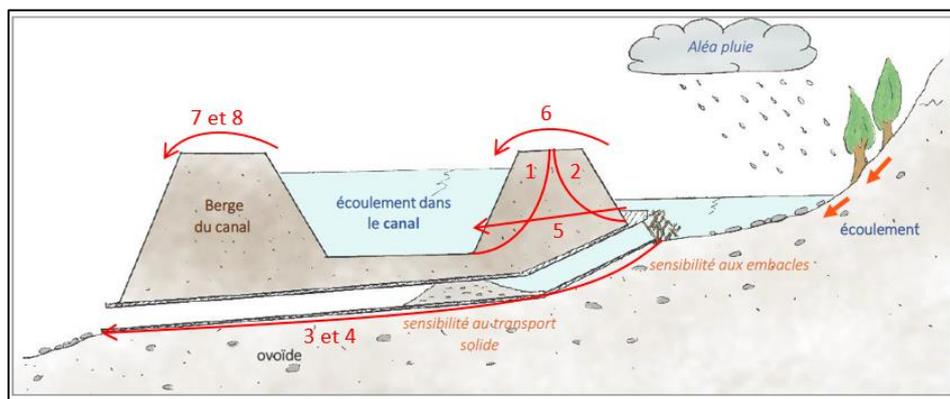


Figure 9 – Localisation des principaux mécanismes (mode) de rupture

Mode 1 : cisaillement du talus intérieur du canal. Les montées de pressions interstitielles dans le remblai ont une incidence sur ce mode.

Mode 2 : cisaillement du talus extérieur du canal. Les montées de pressions interstitielles dans le remblai ont une incidence sur ce mode. En particulier la situation de vidange du talweg du BVL, potentiellement rapide, peut être défavorable. Le mode 2 peut aussi concerner le talus extérieur de la rive opposée.

Mode 3 : érosion régressive sous l'ovoïde dans certains sols pulvérulents. L'ouvrage peut constituer un toit continu sur un chemin d'érosion traversant.

Mode 4 : érosion de fissure au contact de l'ovoïde dans les sols cohésifs. Une fissure peut constituer un chemin d'érosion traversant.

Mode 5 : érosion de contact entre un matériau fin et un matériau grossier. Ce mécanisme concerne notamment les situations où la cote de l'eau dans le talweg BVL dépasse celle de la retenue.

Mode 6 : érosion externe par surverse depuis le talweg du BVL vers le canal.

Mode 7 : érosion externe par surverse côté opposé, depuis le canal vers l'extérieur, causé par les remous en cas de surverse du BVL vers le canal.

Mode 8 : érosion externe par surverse côté opposé en cas de débordement du canal. Ce mode prend en compte les possibles crues concomitantes de plusieurs BVL.

3.2.Méthodologie d'analyse systématique

Compte-tenu de la complexité relative des phénomènes étudiés, du nombre de BVL présents sur un aménagement (usuellement plusieurs dizaines sur un linéaire de l'ordre de 10 à 30km) et du nombre de cas de chargement à considérer (crues de plusieurs périodes de retour), une approche graduée a été développée.

1. Analyse de saturation

Pour les modes 1, 2, 3 et 4, le risque de rupture peut être écarté dès lors que la durée la crue dans le BVL est trop courte pour atteindre un état de saturation de l'ouvrage suffisant. La première étape de l'analyse consiste donc à vérifier ce critère. A cet égard, nous soulignons que la possibilité de colmatage de l'ovoïde joue un rôle important puisque la durée de la crue peut, dans ce cas, passer de quelques heures à plusieurs dizaines de jours.

La durée de saturation, dans les cas simples, peut être estimée de manière analytique. Pour les cas plus complexes, où le système de drainage joue notamment un rôle dans la saturation, cette durée a été déterminée par des formules simplifiées, sur la base d'un modèle conceptuel de l'ouvrage et de calculs numériques paramétriques d'écoulement en régime transitoire.

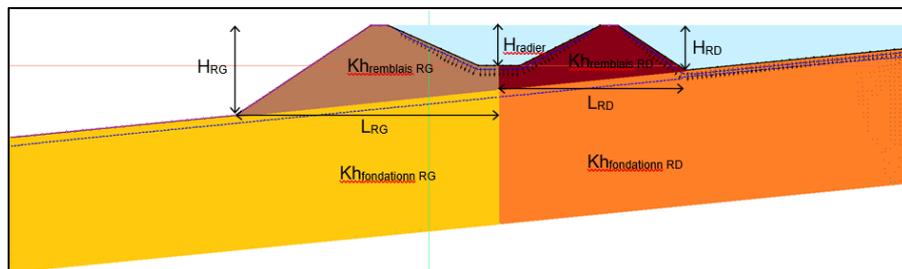


Figure 10 – Modèle conceptuel de l'ouvrage au niveau d'un BVL (Kh = perméabilité horizontale)

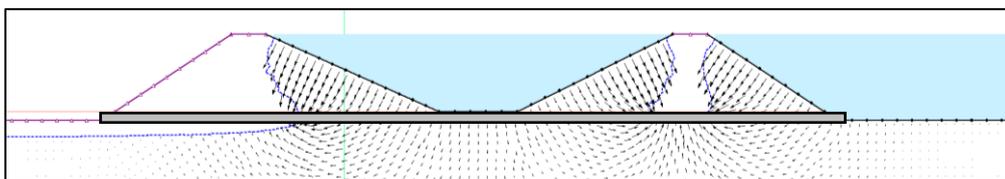


Figure 11 – Atteinte de la saturation du barrage RD, pour le mode de rupture 3, dans le cas où le système de drainage joue un rôle dans la saturation (modèle numérique pour le cas de topographie horizontale)

A titre d'illustration, pour le mode de rupture 3, le temps de saturation pour un BVL particulier, correspond au temps nécessaire pour que le chemin d'érosion, soit la sous face de l'ovoïde depuis la rive droite jusqu'à la rive gauche, soit entièrement saturé. Il est estimé par la relation suivante :

$$t_{\text{saturation}} = \max(t_{\text{saturation RD}} = t_{\text{réf RD}} \times K_{\text{réf}} / K_{\text{RD}} / \% \text{remplissage du BVL} ; t_{\text{saturation RG}} = t_{\text{réf RG}} \times K_{\text{réf}} / K_{\text{RG}} / \% \text{remplissage du BVL})$$

Avec $t_{\text{saturation}}$ la durée nécessaire à la saturation, $t_{\text{réf RD/RG}}$ le temps de saturation du barrage RD/RG calculé par le modèle numérique, $K_{\text{réf}}$ la perméabilité du modèle numérique, $K_{\text{RD/RG}}$ la perméabilité du barrage RD/RG et $\% \text{remplissage du BVL}$ le pourcentage de remplissage du BVL depuis son fond, jusqu'à la crête du barrage RD.

Finalement, pour chaque ovoïde, chaque crue et chaque mode de rupture étudié, le risque de rupture est écarté si le temps estimé nécessaire à la saturation tsaturation est supérieur à la durée de la crue du BVL.

2. Choix des BVL pour lesquels la stabilité de l'ouvrage fera l'objet d'une étude détaillée

Pour les différents modes de rupture étudiés, le choix des BVL qui feront l'objet d'une étude détaillée est réalisé sur la base des critères suivants :

Mode 1 et 2 : si la saturation n'est pas atteinte, le BVL est écarté. Pour les BVL restants, les BVL les plus défavorables sur la base du pourcentage de remplissage du BVL, de la hauteur des remblais, du fruit de la surface de rupture et de la nature des matériaux sont retenus.

Mode 3 : si la saturation n'est pas atteinte, le BVL est écarté. Pour les BVL restants, tous les BVL pour lesquels un sol érodable est identifié sur les deux rives sont étudiés.

Mode 4 : il est considéré que la saturation peut être très rapide dès lors qu'une fissure existe. Tous les BVL pour lesquels un sol cohésif est présent sur les deux rives sont étudiés.

Mode 5 : il est considéré que la durée de crue des BVL est trop courte (au plus quelques dizaines de jours, majoré par 100 jours) pour que l'érosion de contact puisse se développer jusqu'à la rupture.

Mode 6, 7 et 8 : tous les BVL sont étudiés. Dès lors qu'une surverse importante possible a été caractérisée, la rupture de l'ouvrage n'est pas écartée.

3. Principe de l'étude détaillée

Mode 1 et 2 : l'étude détaillée des profils retenus consiste à réaliser un modèle d'écoulement numérique aux éléments finis en régime transitoire. Les pressions interstitielles calculées sont ensuite importées dans un modèle mécanique numérique de stabilité de pente par la méthode des tranches.

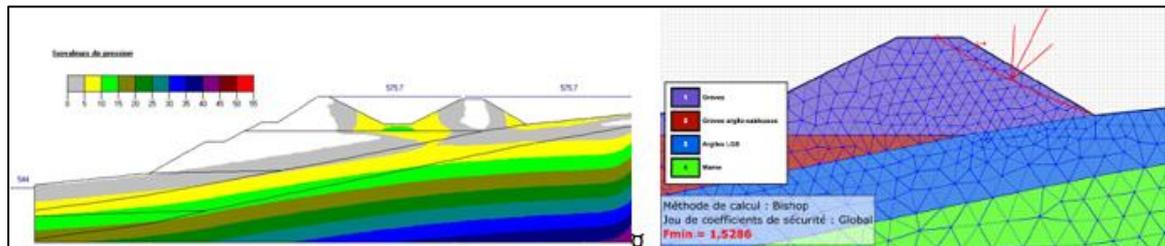


Figure 12 – Isovaleurs de pression au pic de la crue d'un BVL et vérification de stabilité du talus aval RD après la décrue

Mode 3 : l'analyse d'érosion régressive est réalisée conformément aux règles de l'art et aux recommandations du Bulletin 164 de la CIGB en particulier. En ce qui concerne la phase d'initiation, les méthodes de Sellmeijer 2012 ou de Schmertmann 2000 sont utilisées en fonction de la nature des matériaux.

Mode 4 : l'analyse d'érosion de fissure est réalisée conformément aux règles de l'art et aux recommandations du Bulletin 164 de la CIGB en particulier. En ce qui concerne la phase d'initiation, l'approche consistant à estimer et comparer la contrainte d'érosion et la contrainte critique d'érosion est utilisée. Pour l'estimation de la contrainte critique d'érosion des essais Hole-Erosion-Test peuvent être réalisés.

3.3.Exemple d'application de la méthode au canal de Sisteron

Le canal de Sisteron est un aménagement hydro-électrique de la Durance exploité par EDF. Sur une longueur de 32km environ, il recoupe 23 BVL au niveau desquels l'ouvrage est réalisé en remblais et est équipé d'un ovoïde.

Pour la crue la plus extrême considérée (temps de retour 10 ans, puis 100 ans, puis 1 000 ans et enfin 10 000ans), l'analyse de la saturation des remblais appliquée aux localisations possibles des différents modes de rupture a conduit à retenir :

- 4 BVL pour le mode 2 en rive droite ;
- 5 BVL pour le mode 2 en rive gauche.

Finalement, 4 profils au total ont été retenus en crue extrême pour une étude détaillée car considérés comme enveloppe de tous les autres.

Digues aval RD						Digues aval RD					
Nom	Saturation atteinte	Remblais RD	% remplissage du BVL	Hauteur remblais m	Fruit V/H	Nom	Saturation atteinte	Remblais RD	% remplissage du BVL	Hauteur remblais	Fruit V/H
BVL 1	N	Ag-si-gr-sa	0,36	13,1	2	BVL 14	N	Gr-ag-sa	1,00	10,0	3
BVL 2	O	Gr	0,97	1,5	27	BVL 15	N	Gr-ag-sa	0,62	4,6	4
BVL 5	N	Gr-ag-sa	1,00	6,5	3	BVL 16	N	Gr-ag-sa	1,00	6,8	2
BVL 6	N	Gr-ag-sa	1,00	9,3	2	BVL 17	N	Gr-ag-sa	1,00	5,0	4
BVL 7	N	Gr	1,00	3,9	3	BVL 18	N	Gr-ag-sa	0,49	12,1	2
BVL 8	O	Ag-si-gr-sa	0,72	11,4	3	BVL 19	N	Gr-ag-sa	0,57	10,9	2
BVL 9	O	Ag-si-gr-sa	0,75	10,0	3	BVL 20	N	Ag-si-gr-sa	1,00	2,0	5
BVL 10	O	Gr	0,66	10,0	3	BVL 21	N	Gr	1,00	9,8	2
BVL 11	O	Gr	0,41	39,0	2	BVL 22	N	Gr	0,49	10,9	1
BVL 12	N	Gr	1,00	5,1	3	BVL 23	N	Gr-ag-sa	0,16	15,8	1
BVL 13	N	Gr	1,00	8,1	2	BVL 24	N	Mixte	0,14	16,9	2
						BVL 25	N	Gr-ag-sa	0,06	12,0	2

Figure 13 – Extrait du choix des BVL pour une étude détaillée vis-à-vis du mode 2 en crue extrême

L'étude détaillée a permis de conclure à l'absence de risque de rupture par cisaillement.

Par ailleurs, le mode de rupture 3 a été écarté pour l'ensemble des BVL. L'ensemble des sondages de reconnaissances réalisés dans le cadre de l'étude (51 forages carottés ou SPT et 75 analyses granulométriques) a conduit à écarter l'hypothèse d'une couche traversante érodable.

Enfin, l'étude détaillée du mode de rupture 4 a été réalisée pour l'ensemble des BVL, car les ovoïdes y traversent en rive droite et en rive gauche des matériaux cohésifs. Pour l'ensemble des BVL, la contrainte critique estimée à partir d'essais HET s'est avérée bien plus élevée que celle estimée le long du chemin d'érosion.

Au final, le déploiement de la méthode d'analyse a permis d'écarter l'ensemble des modes de rupture, à l'exception du mode 6 pour 6 BVL, et de limiter les études détaillées chronophages des modes 1 et 2 à 5 profils (4 pour la crue la plus extrême et 1 pour une crue moins sévère).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La problématique du passage des crues des BVL est spécifique aux ouvrages de grands linaires construits principalement à flanc de colline. Dans le cadre des analyses de sûreté des canaux de la Durance, les développements techniques menés (hydrologiques, hydrauliques et géotechniques) permettent d'apporter une vision précise et quantifiée des risques sûreté apportés par les crues des BVL.

Toutefois, certaines méthodes nécessitent la poursuite de développement afin de mieux prendre en compte la réalité physiques des phénomènes et d'éviter les conservatismes trop importants. En effet, la méthode actuellement employée pour l'estimation des crues concomitantes est structurellement conservatrice et se trouve assez éloignée de la réalité. Des développements sont donc en cours pour exploiter les champs de précipitation COMEPHORE de Météo France et l'approche Shypre de l'INRAE afin de générer des épisodes de pluie à l'échelle du canal prenant en compte une bonne représentation spatiale de l'aléa pluie sur les différents bassins versants latéraux et donc de mieux représenter les volumes totaux pouvant se déverser directement dans le canal.

Enfin, il paraît certain que les méthodologies déployées pour l'analyse des crues des BVL des canaux de la Durance sont tout à fait applicables à d'autres aménagements de grand linéaire recoupant des cours d'eau latéraux, qu'ils soient hydroélectriques ou non, comme les remblais routiers et ferroviaires. En effet, les mécanismes qui régissent les crues des cours d'eau latéraux (pluie, écoulement) et les mécanismes de rupture de ces remblais (érosion interne, érosion externe et perte de stabilité) sont les mêmes.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] PENOT D., VIARD T., Estimation de l'aléa hydrologique sur les ouvrages traversants un canal de grande capacité, CIGB, 26ième congrès des grands barrages, Vienne juillet 2018
- [2] GRAFF B., Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels, Thèse de doctorat (Université Montpellier II), 2004
- [3] EDIJATNO, MICHEL C. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, La Houille Blanche, N°2 pages 113-121, 1989
- [4] SINNIGER R., HAGER W. Constructions hydrauliques, Écoulements stationnaires, Traité de Génie Civil volume 15, EPFL, 1989
- [5] LAGACÉ R. Notions d'hydraulique en milieu rural - Chapitre 9, Université Laval, 2011
- [6] CFBR Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, CFBR, 2013